UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Transportes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes

CASSIANO AUGUSTO ISLER

Avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária regional para o transporte de passageiros

São Carlos
2015

CASSIANO AUGUSTO ISLER

Avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária regional para o transporte de passageiros

Tese de Doutorado submetida à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Doutor em Ciências*, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes

Orientador: Prof. Dr. João Alexandre Widmer

São Carlos

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

I82a Isler, Cassiano Augusto
Avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária regional para o transporte de passageiros / Cassiano Augusto Isler; orientador João Alexandre Widmer. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Ferrovia. 2. Passageiro. 3. Computação Paralela. 4. Escolha Modal. 5. Análise Sócioeconômica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **CASSIANO AUGUSTO ISLER.**

Título da tese: "Avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária regional para o transporte de passageiros"

Data da defesa: 15/05/2015

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **João Aleandre Widmer**
(Orientador)

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Titular **Antônio Galvão Naclério Novaes**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Prof. Dr. **Orlando Fontes Lima Júnior**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. **Márcio de Almeida D'Agosto**
(Universidade Federal do Rio de Janeiro/UFRJ)

Prof. Dr. **Reinaldo Morabito Neto**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

aprovado

aprovado

APROVADO

APROVADO

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Agradecimentos

Ao Prof. João Alexandre Widmer pelo acompanhamento da minha trajetória acadêmica e pelos valiosos conselhos e orientações em momentos oportunos. Ao Prof. Chris Nash e Prof. Mark Wardman pela recepção na Universidade de Leeds, na realização de um projeto profissional e pessoal, e pelas importantes contribuições para o avanço da pesquisa.

Aos meus pais Sérgio e Isolina pela educação, exemplo e apoio nas decisões, e aos meus irmãos Juliana e Érico pelo convívio e incentivo nos períodos desafiadores.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia de Transportes da EESC, pelas sugestões e apoio na concretização deste e de outros trabalhos anteriores. Ao Prof. José Reinaldo A. Setti, pela elaboração do *template* específico para teses e dissertações do STT em $\text{\LaTeX}$ que profundamente contribuiu para a qualidade da formatação deste texto.

Aos colegas de jornada acadêmica no STT, pelo compartilhamento de experiências e momentos de descontração: Andrea Nicola, Andressa Ng, Antonio Nilson, Artur Piatti, Fernando Piva, Gabriela Moraes, Iara Alves, José Elievam Bessa, Mateus Gama e Monique Martins.

Aos amigos que desinteressadamente apoiaram-me em diversos momentos: Aline Perine, Ana Furlan, Cleber Rocco, Elaine Carvalho, Erika e Isabela Uagaia, Glaucia Pereira, Ísis Sartori, Marcelo Haack, Pedro Brandão, Rochele Ribeiro e Tatiane Bianchini.

É impossível relatar todos os envolvidos nesse importante processo, mas estendo meus agradecimentos às pessoas que compartilharam-no de alguma maneira.

Resumo

ISLER, C.A. **Avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária regional para o transporte de passageiros**. 299 p. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

A utilização majoritária da malha ferroviária brasileira para o transporte de cargas e a sua incompatibilidade para desenvolvimento de altas velocidades inviabiliza a oferta de serviços competitivos para o transporte intermunicipal de passageiros. A questão explorada nesta tese é sobre qual tecnologia ferroviária provê melhores resultados socioeconômicos no contexto de uma nova rede para o transporte intermunicipal de passageiros com operação exclusiva de Trens de Alto Desempenho (*High Performance Trains – HPTs*) ou Trens de Alta Velocidade (*High Speed Trains – HSTs*), caracterizados por velocidades médias de 150 km/h e 300 km/h respectivamente. Nesse sentido, a hipótese é que a diferença entre benefícios e custos socioeconômicos da oferta de serviços de *HSTs* resultam em valores positivos e maiores do que aquelas decorrentes da operação de *HPTs*, mediante parâmetros específicos de avaliação socioeconômica e uma configuração hipotética de rede na Região Sudeste do Brasil. Assim, o objetivo principal da tese é estimar e comparar os custos e benefícios socioeconômicos de uma rede ferroviária pela estimativa dos investimentos para a construção de novos traçados ferroviários, estimativa do número de viagens intermunicipais na Região Sudeste em um horizonte de planejamento estratégico e a propensão à escolha modal, estabelecimento de uma formulação de Análise Custo-Benefício (*Cost Benefit Analysis – CBA*) e aplicação dos modelos em cenários considerando a operação exclusiva de *HPTs* ou de *HSTs*. A resolução do problema de otimização de traçados ferroviários, com uma abordagem de computação paralela aplicada a um Algoritmo Genético, indica que os investimentos em infraestrutura variam majoritariamente em função da topografia, os custos de desapropriações são proporcionalmente pequenos e as restrições geométricas dos traçados não influenciam significativamente nesses resultados.

Após a projeção do número de viagens intermunicipais por modelos analíticos, os dados coletados em uma pesquisa de preferência declarada são utilizados para modelagem da propensão à escolha modal. Finalmente, uma proposta de formulação para o cálculo dos principais itens de custos e benefícios de uma avaliação socioeconômica para o transporte ferroviário de passageiros viabiliza a análise de cenários em função de produtividade da construção da infraestrutura, variabilidade dos investimentos estimados e capacidade de atração de demanda reprimida. Os resultados dos cenários indicam que a diferença entre os benefícios estritamente econômicos (receita operacional e valor residual dos investimentos em infraestrutura) e os custos de construção e operacionais são negativos para qualquer tarifa ferroviária, apesar dos resultados para a rede de *HSTs* serem maiores do que para a de *HPTs*. Considerando os aspectos sociais, os benefícios totais da operação ferroviária sobrepõem-se aos seus custos em situações tarifárias específicas, novamente com resultados maiores para uma rede de *HSTs*, cuja tendência também é observada quando apenas os benefícios sociais são relacionados com custos totais através de uma Razão Benefício-Custo (*Benefit-Cost Ratio – BCR*). Portanto, segundo as premissas desta tese, há indícios que o investimento em uma infraestrutura ferroviária aparentemente não é uma decisão promissora em termos de viabilidade socioeconômica, apesar da operação de *HSTs* ser mais conveniente do que *HPTs* nas condições analisadas.

Palavras-chave: Ferrovia; Passageiro; Computação Paralela; Escolha Modal; Análise Sócioeconômica.

Abstract

ISLER, C.A. **Socioeconomic assessment of a regional railway network for passenger transport**. 299 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2015.

The major use of the Brazilian railway network for freight transport and its incompatibility with high speed trains does not enable running competitive services of intercity passenger transport. The research question of this thesis is which rolling stock technology provides better socioeconomic results on a new intercity passenger network with exclusive operation of High Performance Trains (HPTs) or High Speed Trains (HSTs) with average speeds of 150 km/h and 300 km/h respectively. The hypothesis is that the difference between the socioeconomic benefits and costs of operating HSTs results in positive values and greater than those from the operation of HPTs given specific socioeconomic parameters and a hypothetical network in the Southeastern region of Brazil. The main goal of this research is to estimate and compare the major socioeconomic costs and benefits of a hypothetical railway network by first estimating the required investments of new alignments. Furthermore, the number of trips among cities in the Southeastern Region over a strategic planning horizon and the mode choice are estimated and a Cost-Benefit Analysis formulation is provided to be applied to scenarios of exclusive operation of HPTs or HSTs. The solution of the railway alignment optimization problem with a parallel computing approach applied to a Genetic Algorithm shows that the infrastructure investments vary mainly due to the topography, whereas the expropriation costs are proportionally small and the railway geometric constraints do not significantly affect the results. The number of trips by transport mode over a planning horizon is expanded analytically and the collected data of a stated preference survey is applied to a mode choice modeling approach. Finally, a formulation for the major items of costs and benefits of a socioeconomic assessment for a rail passenger transport project is proposed and it is applied to specific scenarios where the effects of the infrastructure building productivity, variability of the estimated investments,

and the ability to attract new passengers are analyzed. The results from these scenarios show that the difference between the operating income and the net residual value of investments in infrastructure, construction and operating costs are negative for any rail fare, despite the results for the network of HSTs being higher than for HPTs. Furthermore, the overall benefits of the railway operation outweigh the costs in specific pricing policies with better results for a network operating HSTs. This trend is also noticed when only the social benefits are compared to the total costs by a Benefit-Cost Ratio (BCR). Therefore, there is evidence that the investment in railway infrastructure for passenger transport apparently is not a promising decision in terms of socioeconomic feasibility under the assumptions of this thesis, despite the operation of HSTs being more attractive than HPTs under the specified conditions.

Keywords: Railway; Passenger; Parallel Computing; Mode Choice; Socioeconomic Analysis.

Lista de ilustrações

Figura 1.1	Evolução do transporte ferroviário de cargas e passageiros no Brasil no século XX	30
Figura 1.2	Proposta de hierarquia para redes ferroviárias brasileiras para o transporte de passageiros	31
Figura 1.3	Fluxograma do procedimento proposto para avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária para o transporte de passageiros na Região Sudeste . .	34
Figura 2.1	Componentes dos custos de construção de elementos lineares de infraestrutura	39
Figura 2.2	Exemplo de comparação de traçados	40
Figura 2.3	Alinhamento <i>non-backtracking</i> e <i>backtracking</i>	43
Figura 2.4	Representação dos limites de um traçado ferroviário	44
Figura 2.5	Representação de um alinhamento tridimensional	44
Figura 2.6	Representação dos planos perpendiculares ao alinhamento entre a origem e o destino de um traçado	47
Figura 2.7	Traçado com excessivas curvas circulares	48
Figura 2.8	Exemplo de descontinuidade entre curvas circulares horizontais sucessivas .	48
Figura 2.9	Elementos das curvas circulares horizontais do traçado	49
Figura 2.10	Sucessão de PVs na seção longitudinal	49
Figura 2.11	Exemplo de coincidência dos PIs na projeção horizontal e da seção longitudinal em um alinhamento	50
Figura 2.12	Sucessão de pontos de interseção verticais e exemplo de descontinuidade na seção longitudinal	50
Figura 2.13	Definição de estações na projeção horizontal da ferrovia	51
Figura 2.14	Definição de estações na seção longitudinal da ferrovia	51
Figura 2.15	<i>Rasters</i> de elevação do terreno e de uso do solo da Região Sudeste do Brasil	52
Figura 2.16	Exemplo de avaliação de uso do solo	53

Figura 2.17	Seções transversais de corte e aterro e exemplo de seção transversal com áreas de bota-fora e empréstimo	53
Figura 2.18	Exemplos de operadores de mutação	55
Figura 2.19	Exemplos de operadores de cruzamento	56
Figura 2.20	Página de acesso ao ambiente Nuvem USP e exemplo de lista de máquinas virtuais	59
Figura 2.21	Topologias possíveis de redes estabelecidas no <i>JPPF</i>	60
Figura 2.22	Fluxograma de processamento de dados utilizando o <i>JPPF</i>	61
Figura 2.23	Interface do usuário representando a conexão entre <i>nodes</i> e <i>server</i> no <i>Administration Tool</i> do <i>JPPF</i>	62
Figura 2.24	Topologia da rede de máquinas virtuais no <i>Administration Tool</i> do <i>JPPF</i>	62
Figura 2.25	Gráfico do tempo de processamento durante execução do <i>GA</i> em paralelo no <i>Administration Tool</i> do <i>JPPF</i>	63
Figura 2.26	Exemplo de representação das medidas de desempenho durante a execução do <i>GA</i> em paralelo no <i>Administration Tool</i> do <i>JPPF</i>	63
Figura 2.27	Fluxograma do <i>GA</i> adaptado ao <i>JPPF</i>	65
Figura 2.28	Modelo teórico de representação das forças atuantes no trem em uma curva circular horizontal	67
Figura 2.29	Gráficos de desempenho do <i>GA</i> em paralelo de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	70
Figura 2.30	Gráficos de desempenho do <i>GA</i> em paralelo de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	72
Figura 2.31	Gráficos de desempenho do <i>GA</i> em paralelo de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Campinas e Poços de Caldas	76
Figura 2.32	Gráficos de desempenho do <i>GA</i> em paralelo de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Campinas e Poços de Caldas	78
Figura 2.33	Gráficos de desempenho do <i>GA</i> em paralelo de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	81
Figura 2.34	Gráficos de desempenho do <i>GA</i> em paralelo de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	83
Figura 2.35	Custos médios por quilômetro para construção de novos alinhamentos ferroviários de <i>HST</i>	87
Figura 2.36	Representação do traçado de mínimo custo para operação de <i>HPT</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	88
Figura 2.37	Representação do traçado de mínimo custo para operação de <i>HST</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	89
Figura 2.38	Representação do traçado de mínimo custo para operação de <i>HPT</i> entre Campinas e Poços de Caldas	90

Figura 2.39	Representação do traçado de mínimo custo para operação de <i>HST</i> entre Campinas e Poços de Caldas	91
Figura 2.40	Representação do traçado de mínimo custo para operação de <i>HPT</i> entre Araquara e Ribeirão Preto	92
Figura 2.41	Representação do traçado de mínimo custo para operação de <i>HST</i> entre Araquara e Ribeirão Preto	93
Figura 3.1	Fluxograma do método de modelagem quatro etapas	96
Figura 3.2	Alocação dos carregamentos decorrentes das projeções do PNLT para 2015 .	109
Figura 3.3	Exemplo de alocação de tráfego para estimativa de matriz OD pelo método "Tudo-ou-Nada" no TRANSCAD	111
Figura 3.4	Linhas de Desejo dos dados observados para calibração do modelo gravitacional para o Modo Avião	117
Figura 3.5	Estimativa de crescimento da população brasileira	121
Figura 3.6	Estimativa de crescimento da renda média <i>per capita</i> brasileira	121
Figura 3.7	Alocação dos fluxos anuais estimados para o número de viagens pelo modo Ônibus	123
Figura 3.8	Alocação dos fluxos anuais estimados para o número de viagens pelo modo Automóvel	125
Figura 3.9	Linhas de Desejo dos fluxos anuais estimados para o Modo Avião	127
Figura 3.10	Escolha da cidade de origem de onde o participante respondeu a pesquisa . .	138
Figura 3.11	Escolha de um destino para onde o participante já tenha viajado	138
Figura 3.12	Escolha do modo da viagem realizada pelo participante	139
Figura 3.13	Escolha do motivo da viagem realizada pelo participante	139
Figura 3.14	Obtenção de informações a respeito da viagem realizada	140
Figura 3.15	Caracterização dos modos de transporte considerados na pesquisa	140
Figura 3.16	Cenário de escolha modal mediante diferentes níveis de atributos	141
Figura 3.17	Obtenção de informações socioeconômicas	142
Figura 3.18	Distribuição da escolha dos modos de transporte na pesquisa <i>online</i>	143
Figura 3.19	Número de respostas entre pares Origem-Destino	144
Figura 3.20	Modos de transporte utilizados nas viagens realizadas pelos participantes . .	144
Figura 3.21	Histograma dos tempos de acesso nas viagens realizadas	145
Figura 3.22	Histograma dos tempos de egresso dispendidos nas viagens realizadas . . .	145
Figura 3.23	Histograma dos tempos de acesso estimados para os modos de transporte não utilizados nas viagens realizadas	146
Figura 3.24	Histograma dos tempos de egresso estimados para os modos de transporte não utilizados nas viagens realizadas	147
Figura 3.25	Distribuição dos valores observados dos atributos socioeconômicos	148
Figura 3.26	Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Automóvel	148

Figura 3.27	Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Ônibus	149
Figura 3.28	Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Avião	149
Figura 3.29	Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Trem (<i>HPT</i>)	149
Figura 3.30	Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Trem (<i>HST</i>)	149
Figura 3.31	Exemplo de arquivo de um <i>MNL</i> no <i>Biogeme</i>	160
Figura 3.32	Gráfico da verossimilhança dos modelos estimados para o motivo trabalho e lazer	170
Figura 3.33	Gráfico de acertos dos modelos estimados em relação às respostas da pesquisa para o motivo trabalho <i>W</i>	172
Figura 3.34	Gráfico de acertos dos modelos estimados em relação às respostas da pesquisa para o motivo lazer <i>L</i>	173
Figura 4.1	Extensão dos sistemas ferroviários que operam trens com velocidade maior que 200 km/h no mundo	177
Figura 4.2	Relação entre os elementos de uma Análise Custo-Benefício	180
Figura 4.3	Estimativa do excedente do consumidor considerando demanda inelástica	192
Figura 4.4	<i>Rule of Half</i> para estimativa do excedente do consumidor considerando demanda elástica	193
Figura 4.5	Modelo teórico para estimativa do excedente do consumidor	195
Figura 4.6	Aproximação numérica do <i>Rule of Half</i> para estimativa do excedente do consumidor	196
Figura 5.1	Proposta de rede ferroviária hipotética conectando os principais centros urbanos da Região Sudeste	214
Figura 5.2	Segregação dos serviços da rede hipotética em eixos ferroviários para avaliação socioeconômica	215
Figura 5.3	Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por <i>HPT</i> sobre a projeção de declividade do terreno	221
Figura 5.4	Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por <i>HPT</i> sobre a projeção de uso do solo	221
Figura 5.5	Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por <i>HST</i> sobre a projeção de declividade do terreno	222
Figura 5.6	Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por <i>HST</i> sobre a projeção de uso do solo	222
Figura 5.7	Representação esquemática para estimativa dos tempos de viagem entre uma origem e um destino pelos diferentes modos de transporte	227

Figura 5.8	Valor Presente Líquido Econômico ($ENPV$) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HPT	231
Figura 5.9	Valor Presente Líquido Econômico ($ENPV$) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HST	232
Figura 5.10	Valor Presente Líquido Total ($TNPV$) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HPT	235
Figura 5.11	Valor Presente Líquido Total ($TNPV$) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HST	236
Figura 5.12	Razão Benefício Custo (BCR) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HPT	238
Figura 5.13	Razão Benefício Custo (BCR) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HST	239
Figura 5.14	Proporções de custos e benefícios da operação de HPT no cenário Conservador	242
Figura 5.15	Proporções de custos e benefícios da operação de HPT no cenário Intermediário	243
Figura 5.16	Proporções de custos e benefícios da operação de HPT no cenário Otimista .	244
Figura 5.17	Proporções de custos e benefícios da operação de HST no cenário Conservador	246
Figura 5.18	Proporções de custos e benefícios da operação de HST no cenário Intermediário	247
Figura 5.19	Proporções de custos e benefícios da operação de HST no cenário Otimista .	248
Figura 5.20	Valor Presente Líquido Econômico ($ENPV$) mediante a variação do valor residual dos investimentos em infraestrutura para o cenário Intermediário . .	250
Figura 5.21	Razão Benefício-Custo (BCR) mediante a variação do valor residual dos investimentos em infraestrutura para o cenário Intermediário	251
Figura 5.22	Valor Presente Líquido Econômico ($ENPV$) mediante a variação da taxa mínima de atratividade para o cenário Intermediário	252
Figura 5.23	Razão Benefício-Custo (BCR) mediante a variação da taxa mínima de atratividade para o cenário Intermediário	253
Figura A.1	Representação esquemática da seção transversal dos traçados ferroviários . .	276

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Custos totais de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	69
Tabela 2.2	Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	69
Tabela 2.3	Comprimentos dos alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	69
Tabela 2.4	Custos médios de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	69
Tabela 2.5	Custos totais de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	71
Tabela 2.6	Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	71
Tabela 2.7	Comprimentos dos alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	71
Tabela 2.8	Custos médios de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora	71
Tabela 2.9	Custos totais de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Campinas e Poços de Caldas	75
Tabela 2.10	Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Campinas e Poços de Caldas	75
Tabela 2.11	Comprimentos dos alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Campinas e Poços de Caldas	75
Tabela 2.12	Custos médios de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Campinas e Poços de Caldas	75
Tabela 2.13	Custos totais de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Campinas e Poços de Caldas	77

Tabela 2.14	Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Campinas e Poços de Caldas	77
Tabela 2.15	Comprimentos dos alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Campinas e Poços de Caldas	77
Tabela 2.16	Custos médios de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Campinas e Poços de Caldas	77
Tabela 2.17	Custos totais de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	80
Tabela 2.18	Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	80
Tabela 2.19	Comprimentos dos alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	80
Tabela 2.20	Custos médios de alinhamentos para operação de <i>HPT</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	80
Tabela 2.21	Custos totais de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	82
Tabela 2.22	Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	82
Tabela 2.23	Comprimentos dos alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	82
Tabela 2.24	Custos médios de alinhamentos para operação de <i>HST</i> entre Ribeirão Preto e Araraquara	82
Tabela 2.25	Resultados relativos aos traçados de menor custo	85
Tabela 3.1	Fatores de regionalidade para o modelo gravitacional do modo Ônibus . . .	103
Tabela 3.2	Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Ônibus em viagens entre capitais (Grupo A)	105
Tabela 3.3	Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Ônibus em viagens interestaduais excluindo-se as capitais (Grupo B)	106
Tabela 3.4	Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Ônibus em viagens intermunicipais (Grupo C)	107
Tabela 3.5	Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Automóvel em viagens entre capitais (Grupo A)	112
Tabela 3.6	Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Automóvel em viagens interestaduais excluindo-se as capitais (Grupo B)	113
Tabela 3.7	Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Automóvel em viagens intermunicipais (Grupo C)	115
Tabela 3.8	Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Avião . . .	118
Tabela 3.9	Atributos considerados nas pesquisa de preferência declarada	130
Tabela 3.10	Níveis de velocidade média para definição dos tempos de viagem	131

Tabela 3.11	Formulação para cálculo dos níveis de custo dos modos de transporte em função da distância média de viagem	131
Tabela 3.12	Aeroportos com maior movimentação de passageiros em voos domésticos na Região Sudeste no ano de 2011	132
Tabela 3.13	Cidades de origem, destino, distâncias rodoviárias aproximadas e distâncias estabelecidas para definição dos níveis dos atributos	133
Tabela 3.14	Exemplo de bloco para um cenário de <i>HST</i> com <i>AIR</i> de 400 km	135
Tabela 3.15	Número de repostas obtidas na pesquisa de preferência declarada	142
Tabela 3.16	Número de respostas das amostras para calibração e validação dos modelos de escolha discreta relativos à pesquisa de preferência declarada	161
Tabela 3.17	Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo A . . .	162
Tabela 3.18	Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo B . . .	163
Tabela 3.19	Testes de razão de verossimilhança entre o Modelo A e o Modelo B	163
Tabela 3.20	Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo C . . .	164
Tabela 3.21	Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo D . . .	165
Tabela 3.22	Intervalos das classes de atributos socioeconômicos para inserção nos modelos de escolha modal	166
Tabela 3.23	Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo E . . .	167
Tabela 3.24	Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo F . . .	170
Tabela 3.25	Diferenças percentuais de verossimilhanças entre modelos pelo motivo <i>W</i> .	171
Tabela 3.26	Diferenças percentuais de verossimilhanças entre modelos pelo motivo <i>L</i> . .	171
Tabela 3.27	Resumo das estatísticas ρ^2 e $\bar{\rho}^2$ da calibração dos modelos de escolha modal	172
Tabela 3.28	Porcentagem de acertos das Árvores de Decisão na modelagem da pesquisa de preferência declarada	174
Tabela 4.1	Investimentos estimados e realizados para construção de novos alinhamentos ferroviários para Trens de Alta Velocidade em países europeus	184
Tabela 4.2	Alternativas para estimativa do tempo médio de viagem por motivo trabalho	201
Tabela 4.3	Alternativas para estimativa do tempo médio de viagem por motivo lazer . .	202
Tabela 5.1	Resumo dos investimentos necessários à implantação de um rede ferroviária hipotética para operação de <i>HPT</i>	218
Tabela 5.2	Resumo dos investimentos necessários à implantação de um rede ferroviária hipotética para operação de <i>HST</i>	218
Tabela 5.3	Estimativa de tempo necessário para construção da rede ferroviária em cada cenário mediante a tecnologia ferroviária	224
Tabela 5.4	Regressão dos tempos de acesso e egresso segundo a pesquisa de preferência declarada e as características das cidades	228
Tabela 5.5	Tempo médio de bloco pelo modo Aéreo (minutos) – Fonte: ANAC (2014b)	229
Tabela 5.6	Definição dos parâmetros dos cenários para avaliação socioeconômica . . .	230

Tabela B.1	Siglas e respectivos municípios sob influencia das estações consideradas na análise socioeconômica	277
Tabela B.2	Projeções do número de viagens pelo modo Ônibus (2015 – 2032)	278
Tabela B.3	Projeções do número de viagens pelo modo Ônibus (2033 – 2050)	279
Tabela B.4	Projeções do número de viagens pelo modo Automóvel (2015 – 2032)	280
Tabela B.5	Projeções do número de viagens pelo modo Automóvel (2033 – 2050)	281
Tabela B.6	Projeções do número de viagens pelo modo Avião (2015 – 2032)	282
Tabela B.7	Projeções do número de viagens pelo modo Avião (2033 – 2050)	283
Tabela C.1	Modelo A (W)	286
Tabela C.2	Modelo A (L)	286
Tabela C.3	Modelo B (W)	286
Tabela C.4	Modelo B (L)	286
Tabela C.5	Modelo C (W)	287
Tabela C.6	Modelo C (L)	287
Tabela C.7	Modelo D (W)	287
Tabela C.8	Modelo D (L)	287
Tabela C.9	Modelo E (W)	288
Tabela C.10	Modelo E (L)	288
Tabela C.11	Modelo F (W)	289
Tabela C.12	Modelo F (L)	290
Tabela E.1	Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de <i>HPTs</i> no Cenário Conservador	294
Tabela E.2	Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de <i>HPTs</i> no Cenário Intermediário	295
Tabela E.3	Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de <i>HPTs</i> no Cenário Otimista	296
Tabela E.4	Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de <i>HSTs</i> no Cenário Conservador	297
Tabela E.5	Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de <i>HSTs</i> no Cenário Intermediário	298
Tabela E.6	Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de <i>HSTs</i> no Cenário Otimista	299

Lista de Siglas

AGE Idade

AIR Modo Aéreo

ASC Constante Específica da Alternativa

ABCR Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias

AD Árvore de Decisão

ANAC Agência Nacional de Aviação Civil

ANP Agência Nacional de Petróleo

ANTT Agência Nacional de Transportes Terrestres

ARTESP Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo

BCR Razão Benefício-Custo

BUS Modo Ônibus

CAD Desenho assistido por Computador

CAR Modo Automóvel

CBA Análise Custo-Benefício

CC Custo Total de Construção de um Novo Traçado

CNH Carteira Nacional de Habilitação

CPTM Companhia Paulista de Trens Metropolitanos

DB Banco de Dados

DRIV_{LUC} Carteira de Habilitação

DER Departamento de Estradas de Rodagem

EMP Empregabilidade

ENPV Valor Presente Líquido Econômico

EWC Custo de Terraplenagem

FA Tarifa de Viagem

FR Frequência de Serviços

GA Algoritmo Genético

GIS Sistema de Informações Geográficas

HPT Trem de Alto Desempenho

HST Trem de Alta Velocidade

IaaS Infraestrutura como um Serviço

IC^C Valor Presente Líquido dos Investimentos para Construção da Infraestrutura

IC^M Valor Presente Líquido das Despesas de Manutenção da Infraestrutura

IID Independente e Igualmente Distribuído

INC Renda Média per Capita

IRR Taxa Interna de Retorno

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDH Índice de Desenvolvimento Humano

JPPF *Java Parallel Programming Framework*

LR Razão de Verossimilhança

LUC Custo de Desapropriações

MARR Taxa Mínima de Atratividade

MCA Análise Multicritério

OD Origem-Destino

<i>PaaS</i>	Plataforma como um Serviço
<i>PE</i>	Custo de Combustível
<i>PI</i>	Ponto de Interseção
<i>PIB</i>	Produto Interno Bruto
<i>PV</i>	Ponto de Interseção Vertical
<i>RSC^A</i>	Valor Presente Líquido dos Investimentos em Aquisição do Material Rodante
<i>RSC^M</i>	Valor Presente Líquido das Despesas de Manutenção do Material Rodante
<i>RSC^O</i>	Valor Presente Líquido das Despesas de Operação do Material Rodante
<i>SaaS</i>	<i>Software</i> como um Serviço
<i>TAR</i>	Valor Presente Líquido pela Redução de Acidentes
<i>TBC</i>	Custo de Túneis e Viadutos
<i>TCSTS</i>	Valor Presente Líquido do Excedente do Consumidor pelo Tempo de Viagem
<i>TCSUC</i>	Valor Presente Líquido do Excedente do Consumidor pela Tarificação
<i>TER</i>	Valor Presente Líquido pela Redução de Externalidades
<i>TINA</i>	<i>Transport Infrastructure Needs Assessment</i>
<i>TNPV</i>	Valor Residual Total
<i>TO</i>	Custo de Pedágio
<i>TRC</i>	Custo da Superestrutura
<i>TRV</i>	Valor Presente Líquido do Valor Residual da Infraestrutura
<i>TR</i>	Valor Presente Líquido da Receita Total
<i>TT</i>	Tempo de Viagem
<i>VM</i>	Máquina Virtual
<i>VDMA</i>	Volume Diário Médio Anual

Sumário

1	Introdução	29
1.1	Escopo e problema de tese	33
1.2	Objetivos	33
1.3	Contribuições da pesquisa	35
1.4	Estrutura da Tese	35
2	Estimativa de Custos de Traçados Ferroviários	37
2.1	Algoritmo Genético para o Problema de Definição de Traçados Ferroviários .	42
2.2	Algoritmo Genético e Programação Paralela	58
2.3	Análise de Desempenho	64
2.3.1	Definição de Parâmetros	66
2.3.2	Resultados da Análise de Desempenho	68
3	Estimativa de Demanda	95
3.1	Distribuição de viagens	96
3.1.1	Método do Fator de Crescimento	97
3.1.2	Modelo Gravitacional	98
3.1.3	Maximização da Entropia	99
3.1.4	Modelos Econométricos de Regressão Linear	100
3.1.5	Estimativa de Viagens no Ano Base	101
3.1.6	Projeção das Viagens Estimadas	119

3.2	Escolha Modal	128
3.2.1	Pesquisa de Preferência Declarada	128
3.2.2	Análise dos Dados Coletados na Pesquisa	143
3.2.3	Modelagem de Escolha Modal	151
3.2.4	Estimativa dos modelos	159
3.2.5	Considerações sobre a Modelagem de Escolha Modal	170
4	Análise Socioeconômica de Projetos Ferroviários	175
4.1	Análise Custo-Benefício de Projetos de Transporte Ferroviário	176
4.2	Formulação para Análise Custo-Benefício de Projetos Ferroviários	178
4.2.1	Recomendações do Banco Mundial	179
4.2.2	Recomendações do <i>WebTAG</i>	181
4.2.3	Parâmetros de Entrada	182
4.2.4	Custos	183
4.2.5	Benefícios	189
4.2.6	Medidas de Desempenho	210
5	Cenários para o Transporte Ferroviário Regional de Passageiros	213
5.1	Definição de Traçados e Estimativa de Investimentos	216
5.2	Estimativa de Número de Passageiros e Divisão Modal	224
5.3	Definição dos Tempos de Viagem e Tarifas	226
5.4	Análise Socioeconômica de Cenários	229
5.5	Considerações sobre a Análise Socioeconômica	249
6	Considerações Finais e Recomendações	255
6.1	Recomendações para Pesquisas Futuras	258
	Referências	261
	Apêndices	273
	APÊNDICE A Parâmetros para Estimativa de Investimentos em Traçados	275

APÊNDICE B	Projeções do Número de Viagens	277
APÊNDICE C	Resultados dos Modelos de Escolha Modal	285
APÊNDICE D	Parâmetros para Análise Custo-Benefício	291
APÊNDICE E	Resultados dos Cenários de Análise Socioeconômica	293

Introdução

1

O contexto de construção e operação das ferrovias difere historicamente entre países. Na Europa Ocidental, a infraestrutura para operação do modo ferroviário foi implantada para conexão de cidades que se formaram durante os séculos anteriores ao surgimento desse meio de transporte. Atualmente, verifica-se que a densa malha ferroviária do continente é utilizada majoritariamente para o deslocamento de pessoas entre os centros urbanos (UIC, 2011).

Por outro lado, a instalação desse tipo de infraestrutura no continente americano contribuiu principalmente para a expansão das fronteiras e o estabelecimento das cidades. Nesse caso, o sistema ferroviário fora mais suscetível à influência dos avanços da indústria automobilística a partir da segunda metade do século XX. No caso específico dos Estados Unidos, as ferrovias foram reestruturadas nas últimas décadas daquele século e sua utilização culminou no atual cenário de predominância do transporte de cargas a longas distâncias (UIC, 2011).

Essa tendência norte-americana pode ser observada também no Brasil, onde o transporte ferroviário contribuiu para o desenvolvimento do interior do país, sobretudo no âmbito do transporte de passageiros na primeira metade do século XX (SCHOPPA, 2004), com utilização majoritária para o transporte de cargas a partir de meados da década de 1960, conforme a Figura 1.1.

Entretanto, ao contrário dos EUA, no caso brasileiro não houve uma política consistente de utilização da malha ferroviária durante o século XX, cuja reestruturação deu-se tardiamente ao final da década de 1990 pelas concessões do transporte de cargas à iniciativa privada.

Figura 1.1 – Evolução do transporte ferroviário de cargas e passageiros no Brasil no século XX –

Fonte: IBGE (1990)

Relegados a alguns trechos da malha ferroviária, os serviços de transporte de passageiros permaneceram em operação apenas nas localidades em que se mostraram indispensáveis – como nas áreas urbanas das principais capitais brasileiras, por exemplo, nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e de São Paulo – ou para viagens a longa distância em situações particulares como entre Belo Horizonte (MG) e Vitória (ES) ou Parauapebas (PA) e São Luís (MA).

Porém, ainda que em operação, esses serviços mostram-se ineficientes em relação aos tempos de viagens dos outros modos de transporte, particularmente devido ao compartilhamento das vias com trens de carga que impõem restrições de velocidades aos de passageiros.

Nesse contexto, é considerado impróprio planejar a reativação do transporte ferroviário intermunicipal de passageiros no Brasil tendo como referência as experiências norte-americana e europeia, dadas as discrepâncias históricas e respectivas políticas de planejamento.

No ano de 2010 o Governo Federal do Brasil apresentou uma proposta de projeto de Trem de Alta Velocidade (*High Speed Train – HST*) para conexão das cidades de Campinas, São Paulo e Rio de Janeiro com veículos caracterizados por velocidade média de 300 km/h (TAV, 2014). Entretanto, até 2015, o projeto não apresenta perspectivas de implantação em um futuro

próximo sobretudo pelas dúvidas que suscita a respeito da demanda que possa utilizar o sistema.

Concomitantemente, o Governo do Estado de São Paulo, sob representação da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), apresentou propostas de conexões da Região Metropolitana de São Paulo às cidades de Campinas, Sorocaba, São José dos Campos e Santos (CPTM, 2014a) através de trens caracterizados por velocidade média de 150 km/h.

Apesar dessas propostas, não existe uma terminologia adequada e comum às esferas governamentais para denominação dos diferentes tipos de serviços que são prestados ou que eventualmente serão ofertados aos usuários. Portanto, com intuito de padronizar uma terminologia para esta tese, foi feita uma adaptação da classificação de Wang et al. (2012) para hierarquização das ferrovias para o transporte de passageiros no Brasil conforme a Figura 1.2.

Figura 1.2 – Proposta de hierarquia para redes ferroviárias brasileiras para o transporte de passageiros – Fonte: adaptado de Wang et al. (2012)

No escopo das ferrovias intermunicipais enquadram-se os Trens de Alto Desempenho (*High Performance Train – HPT*), que englobam as propostas da CPTM para conexão das cidades do interior do Estado de São Paulo à capital (CPTM, 2014b).

Nessa mesma categoria de ferrovias, os *HSTs* podem operar nas linhas intermunicipais com o objetivo de redução dos tempos de viagem como, por exemplo, a proposta de conexão entre as Regiões Metropolitanas de São Paulo, do Rio de Janeiro e à cidade de Campinas (TAV, 2014).

Os serviços de *HSTs* em geral mostram-se viáveis quando conectam regiões de grandes concentrações populacionais e distâncias de aproximadamente 600 km entre si, tornando o modo competitivo com o transporte aéreo (LACERDA, 2008). Em conexões com distâncias maiores que 300 km os *HSTs* são mais competitivos que os aviões devido à maior facilidade de embarque e desembarque, porém, em percursos acima de 800 km, o modo ferroviário atrai menores fluxos pelo aumento dos tempos de viagem quando comparado aos aviões (GLEAVE, 2004).

A captura da demanda pelos *HSTs* não depende apenas dos tempos de viagem em relação aos outros modos, mas também das tarifas praticadas e condições de conforto dos passageiros, indicando que a operação dessa tecnologia e a dos *HPTs* apresentam distinções significativas quanto ao padrão de serviço ofertado ao usuário (GIVONI, 2006).

Mediante o interesse das esferas governamentais a respeito da implantação de novos serviços ferroviários para o transporte de passageiros no Brasil (sobretudo na Região Sudeste), as discussões sobre o tema permeiam as estimativas de investimentos necessários à construção de novos traçados ou a possibilidade de utilização das vias existentes.

Pesquisas anteriores corroboram o fato de que a infraestrutura ferroviária existente na Região Sudeste inviabiliza a oferta de serviços ferroviários competitivos para o transporte de passageiros, principalmente pela incompatibilidade da geometria e dos níveis de manutenção requeridos para operação de trens com maiores velocidades (BATISTA, 2006; ISLER, 2010).

Isler e Widmer (2012) mostram que essa infraestrutura ferroviária brasileira foi concebida com padrão geométrico de raios de curvas circulares horizontais que restringem a velocidade média dos trens, sobretudo para aqueles que transportam cargas com centro de gravidade elevado (como no caso de contêineres empilhados, ou *double-stack*).

Assim, é pertinente considerar uma investigação sobre alternativas de implantação de uma infraestrutura ferroviária para o transporte de passageiros baseada em concepções geométricas que permitam a redução dos tempos de viagem e que sejam atraentes para os investidores no âmbito econômico-financeiro e para os usuários do ponto de vista econômico e social.

1.1 Escopo e problema de tese

A Região Sudeste do Brasil se destaca em relação às demais regiões nos aspectos econômicos e em termos de padrões de viagens entre cidades (IBGE, 2010), com população maior do que 85 milhões de habitantes e Produto Interno Bruto (PIB) acima de dois trilhões de reais no ano de 2010 (equivalentes a aproximadamente 44% e 49% do total nacional, respectivamente).

Nesse sentido, o escopo da pesquisa apresentada nesta tese delimita-se à investigação de possibilidades de oferta de serviços ferroviários para o transporte de passageiros no âmbito regional dos estados de Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.

Nesta tese são avaliadas alternativas de implantação de serviços ferroviários para o transporte de passageiros de longa distância (acima de 100 km) na Região Sudeste do Brasil. A investigação abrange a proposta de novos serviços em Linhas Intermunicipais com operação de *HPTs* de velocidade média de 150 km/h ou de *HSTs* caracterizados por velocidade média de 300 km/h.

Sob essas definições, o problema da pesquisa de doutorado é a ausência de comparações da viabilidade socioeconômica da operação de *HPTs* e *HSTs* no âmbito do transporte de passageiros na Região Sudeste do Brasil. Assim, a pergunta de tese sobre esse problema é: "Qual tipo de serviço oferecido pela operação de *HPTs* ou de *HSTs* provê melhores resultados socioeconômicos no contexto de uma rede ferroviária para o transporte intermunicipal de passageiros?"

Como resposta a essa pergunta propõe-se a seguinte hipótese: "Dada uma configuração específica de conexões ferroviárias intermunicipais na Região Sudeste do Brasil, a diferença entre os benefícios e custos socioeconômicos da oferta de serviços de *HSTs* resultam em valores positivos e maiores do que a diferença resultante da oferta de serviços de *HPTs*, mediante as particularidades dessas tecnologias e parâmetros específicos de avaliação socioeconômica."

1.2 Objetivos

O objetivo principal da tese é estimar os custos e benefícios socioeconômicos de uma rede ferroviária hipotética para o transporte intermunicipal de passageiros na Região Sudeste do Brasil com operação de *HPTs*, e compará-los com os resultados de uma avaliação socioeconômica

sob as mesmas condições de rede com operação de *HSTs*. Assim, para atingir esse objetivo precípua da pesquisa são estabelecidos os objetivos secundários a seguir.

- a. Estimar os valores econômicos dos investimentos necessários para a construção de novos traçados ferroviários, mediante diferentes restrições geométricas segundo as especificidades das tecnologias ferroviárias contempladas nesta tese;
- b. Estimar o número de viagens intermunicipais na Região Sudeste em um horizonte de planejamento estratégico e a propensão à escolha modal na eventualidade da oferta de serviços ferroviários para o transporte de passageiros;
- c. Estabelecer uma formulação de Análise Custo-Benefício (*Cost-Benefit Analysis*) de projetos ferroviários para o transporte de passageiros contemplando os investimentos, as despesas operacionais, e os benefícios econômicos e sociais decorrentes da sua construção e operação;
- d. Aplicar os modelos propostos e a formulação de *CBA* em cenários de uma rede ferroviária hipotética na Região Sudeste do Brasil considerando a operação exclusiva de *HPTs* ou de *HSTs*.

O fluxograma da Figura 1.3 relaciona os objetivos secundários da pesquisa, sintetizando o procedimento proposto para atingir o objetivo principal de avaliação socioeconômica de diferentes tecnologias ferroviárias para o transporte de passageiros na Região Sudeste do Brasil.

Figura 1.3 – Fluxograma do procedimento proposto para avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária para o transporte de passageiros na Região Sudeste

1.3 Contribuições da pesquisa

O Brasil apresenta inexpressiva operação de trens intermunicipais de passageiros de longa distância e não possui uma estratégia consolidada e comum às diferentes esferas governamentais para oferta de serviços competitivos dessa natureza. Assim, a principal contribuição desta pesquisa é a comparação da operação *HPTs* e *HSTs* do ponto de vista socioeconômico, de modo a cooperar com decisões sobre a escolha de uma alternativa condizente às necessidades de melhoria das condições dos deslocamentos da população na Região Sudeste do Brasil.

Do ponto de vista da modelagem, constata-se que os atuais estudos para oferta de serviços ferroviários no Brasil carecem de um procedimento explícito de avaliação socioeconômica seja para a operação de *HPTs* ou de *HSTs*.

Assim, a proposta de formulação de análise socioeconômica contida nesta tese exige a estimativa dos investimentos para construção de novos traçados com os padrões requeridos pelas tecnologias de *HPT* e *HST*. Entretanto, dadas as particularidades topográficas do território brasileiro, a utilização de um valor médio por quilômetro para definição dos investimentos nesse tipo de infraestrutura não é realista, sendo portanto justificável a proposta de um método mais acurado para tal propósito conforme descrito nesta tese.

Diferentemente de muitos países europeus em que a malha ferroviária de trens convencionais está consolidada e existe uma propensão à expansão dos *HSTs*, a carência desses serviços no Brasil dificulta a estimativa da divisão modal no caso da oferta de transporte ferroviário de passageiros. Portanto, a execução de uma pesquisa de preferência declarada contribui para a mitigação das incertezas a respeito da caracterização dos padrões de viagens e permite a comparação da escolha de diferentes tipos de serviços dessa natureza.

1.4 Estrutura da Tese

Esta tese está estruturada em 6 capítulos, com a descrição da revisão da literatura naqueles pertinentes a cada um dos itens abordados na pesquisa. Após esta Introdução o Capítulo 2 contém o método para estimativa dos investimentos para a construção de traçados ferroviários adequados ao transporte de passageiros respeitando-se as restrições dos *HPTs* e *HSTs*.

No Capítulo 3 são descritos os procedimentos considerados para estimativa do número de viagens intermunicipais na Região Sudeste do Brasil pelos modos de transporte atualmente disponíveis e para projeção dessas viagens em um horizonte de planejamento estratégico. Ainda naquele capítulo é apresentado o método para estimativa da propensão à escolha modal mediante a modelagem das respostas de uma pesquisa de preferência declarada.

No Capítulo 4 os métodos usuais de análise de projetos de transporte são descritos, sendo apresentada uma proposta de formulação explícita para avaliação socioeconômica agregando os itens descritos nos capítulos anteriores, as despesas operacionais e de manutenção, e os benefícios sociais de economia de tempo e redução de acidentes e externalidades.

No Capítulo 5 são apresentados os cenários de aplicação das abordagens dos capítulos anteriores para avaliação da hipótese de tese e, finalmente, no Capítulo 6 são indicadas as considerações finais a respeito dos resultados obtidos e propostas de pesquisas futuras sobre o tema.

Estimativa de Custos de Traçados Ferroviários

Segundo Kim, Jha e Son (2005), o problema de definição de traçados rodoferroviários envolve a escolha do alinhamento de menor custo que conecta duas localidades e é formalizado pela seguinte proposição: "Dada a localização de dois pontos e a possibilidade de alteração da configuração do terreno na região em que estão contidos, determinar o alinhamento constituído por trechos em tangente conectados por curvas horizontais que minimiza o valor de uma função objetivo específica segundo as restrições geométricas e operacionais do modo de transporte".

Esse problema tem sido extensamente explorado na literatura científica. Ao estabelecer uma ferramenta de planejamento para definição de traçados rodoviários entre áreas urbanas utilizando um Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm – GA*), Kang, Jha e Schonfeld (2012) apresentam uma abrangente revisão sobre as principais abordagens propostas para resolução do problema considerando as características horizontais e verticais dos alinhamentos separada ou simultaneamente. Além de distinguir cada método de solução, os autores apresentam uma análise das principais deficiências de alguns desses métodos.

Existem algumas distinções entre abordagens para otimização de traçados rodoviários e ferroviários, entretanto estas diferenças mostram-se mais significativas na definição da função objetivo do problema, sendo que os métodos de solução geralmente são generalizados para ambos os modos, com algumas alterações no cálculo dos parâmetros geométricos dos traçados.

Parker (1977) e Trietsch (1987) propõem modelos de redes que utilizam uma abordagem de

otimização em dois estágios, os quais podem ser considerados uma combinação de modelos em duas dimensões (horizontal e vertical).

No contexto da programação dinâmica, a otimização tridimensional de alinhamentos (horizontal e vertical simultaneamente) consiste na definição dos estágios como planos igualmente espaçados entre o ponto inicial e final do traçado, os quais são perpendiculares ao segmento que conecta essas localidades. Hogan (1973) e Nicholson, Elms e Williman (1976) são exemplos de aplicação dessa abordagem e sua precisão varia conforme o nível de tolerância estabelecido nas malhas perpendiculares ao traçado.

Um modelo de traçado tridimensional suavizado foi desenvolvido por Chew, Goh e Fwa (1989) como extensão de um modelo contínuo para otimização de alinhamentos verticais proposto em Goh, Chew e Fwa (1988). No problema de cálculo variacional um conjunto de funções cúbicas contínuas são utilizadas para interpolação do traçado. Nesse contexto, a função objetivo envolve a resolução de integrais matemáticas, cuja solução proposta pelos autores é uma integração numérica associada a um "Algoritmo de Quase-Newton em Descida".

Com base em Jong e Schonfeld (2003), Kang, Jha e Schonfeld (2012) argumentam que o GA tem se mostrado como a estratégia de solução mais eficiente na resolução do problema de otimização simultânea de alinhamentos horizontais e verticais de rodovias, uma vez que nesse método a região factível é intensamente explorada evitando-se soluções ótimas locais.

No aspecto econômico, segundo OECD (1973) e Chew, Goh e Fwa (1989), a distribuição dos valores econômicos dos itens necessários à construção de elementos lineares de infraestrutura (rodovias e ferrovias) é categorizada conforme indicado na Figura 2.1. Nessa representação, 75% dos custos correspondem a apenas três itens específicos: terraplenagem, implantação da superestrutura, e construção de pontes, viadutos e túneis.

Schonfeld et al. (2007) classificam esses valores quanto aos custos de construção e despesas operacionais incidentes sobre o operador e o usuário. Ao operador do sistema cabem os custos de implantação da via (trilhos, dormentes e demais elementos), construção das estações, desapropriações, terraplenagem e as despesas operacionais dos veículos. Por outro lado, os usuários arcam com as despesas de acesso, egresso e tarifa da viagem.

Figura 2.1 – Componentes dos custos de construção de elementos lineares de infraestrutura – Fonte: adaptado de Jha et al. (2006)

Um importante aspecto vinculado à aquisição e desapropriação de terrenos foi contemplado em Jha e Schonfeld (2000), pela associação de um modelo de otimização de traçados rodoviários à um Sistema de Informações Geográficas (*Geographic Information System – GIS*). No artigo os autores contemplam os investimentos totais e despesas atribuídos ao operador e aos usuários, vinculando um *GIS* aos valores monetários de aquisição de propriedades e aos impactos ambientais das áreas investigadas na solução de um problema real.

Jha, McCall e Schonfeld (2001) apresentam um aprimoramento da pesquisa anterior pela associação de um *GA* e um *GIS* a um modelo de visualização computacional, de modo que os aspectos não contemplados pelo algoritmo pudessem ser investigados pela intervenção do planejador. Esse modelo permite um maior detalhamento do traçado e a avaliação das interferências da via em relação aos possíveis obstáculos nas suas adjacências.

Jha (2003) propõe um sistema de suporte à decisão que considera não apenas a minimização de custos econômicos, mas também as interferências das novas vias no meio ambiente e nas aglomerações urbanas. A proposta do autor é comparar um conjunto de alinhamentos provenientes do *GA* com um traçado de referência em função dos seus comprimentos e áreas de interseção (ver Figura 2.2), permitindo que os tomadores de decisão avaliem as consequências de implantação de um traçado em termos de impactos ambientais e sociais.

Figura 2.2 – Exemplo de comparação de traçados – Fonte: Jha (2003)

Kim et al. (2004) apresentam uma metodologia que contempla os custos requeridos para a construção das interseções com um sistema rodoviário existente. Os autores consideram as principais características geométricas de interseções rodoviárias, incluindo um procedimento de busca local da geometria que minimiza o custo total estimado, incluindo os itens associados à desapropriação, terraplenagem e pavimentação.

Um compêndio das pesquisas apresentadas anteriormente pode ser identificado em Jha et al. (2006), cujas contribuições são interpretadas como o trabalho mais significativo sobre o tema, contendo uma abrangente revisão de literatura, além de instruções detalhadas sobre o cálculo dos parâmetros geométricos horizontais e verticais de alinhamentos rodoviários, bem como a vinculação do GA a Sistemas de Informações Geográficas.

No âmbito ferroviário, Jha, Schonfeld e Samanta (2007) apresentam uma extensão dos procedimentos associados à definição de alinhamentos rodoviários de mínimo custo. Os autores formalizam os elementos do GA baseado em Jha et al. (2006), bem como os operadores de cruzamento e mutação associados ao método. Na função objetivo do modelo são considerados os custos incidentes sobre o operador do sistema (implantação da via, construção das estações, desapropriações, terraplenagem e despesas operacionais) e os custos incorridos aos usuários (tempo de acesso às estações, tempo de viagem e tempo de egresso).

Na mesma temática ferroviária, Samanta e Jha (2011) apresentam uma modelagem de localização de estações que integra despesas dos usuários aos custos de construção dos traçados.

Os autores apresentam um algoritmo para escolha das estações e também utilizam um *GA* para estimativa dos custos dos alinhamentos entre as instalações.

Além do conjunto de pesquisas apresentados por esses autores, existem outras propostas metodológicas para resolução do problema de definição de alinhamentos rodoferroviários, bem como a abrangência de diferentes funções objetivo aplicadas ao problema.

Dado o alinhamento horizontal de uma rodovia, Lee e Cheng (2001) apresentam uma modelagem matemática que determina a configuração ótima das rampas e curvas verticais com vistas à minimização dos custos de terraplenagem e maximização da velocidade de tráfego. Um algoritmo em três níveis é proposto para resolução do problema: no primeiro nível é realizada uma busca em vizinhança para identificação dos pontos de mudança de declividade da via; no segundo nível os intervalos das declividades dos trechos previamente definidos são calculados com base no desempenho dos veículos; e no terceiro nível a configuração da seção longitudinal é estabelecida pela resolução de um modelo de programação linear inteira.

Ainda sobre a determinação da configuração ótima da seção longitudinal de alinhamentos rodoviários, Goktepe, Lav e Altun (2009) apresentam um método que considera as propriedades do solo com o intuito de minimizar os custos de terraplenagem. Um *GA* é aplicado à resolução do problema, que contempla o cálculo dos volumes de corte e aterro nas seções entre estacas sucessivas do alinhamento.

Tunalioglu e Soykan (2011) apresentam uma modelagem distinta para o problema de traçados rodoferroviários. Os autores propõem um algoritmo que estabelece as estacas sucessivas na via e ajusta o traçado a uma função polinomial sob restrições de geometria previamente estabelecidas. Apesar da redução do tempo de processamento computacional, o método não é eficiente em regiões com grandes dimensões a serem exploradas.

Huang, Chen e Dzung (2011) apresentam um procedimento expedito para definição de traçados rodoferroviários baseado em uma ferramenta de desenho assistida por computador (*Computer Aided Design - CAD*). A ferramenta computacional permite considerar os obstáculos existentes entre duas localidades e executa os cálculos dos parâmetros geométricos em tempo real, de modo que a atenção do planejador permanece nos aspectos de compatibilidade da via

com os elementos em seu entorno e de conformidade com as restrições geométricas.

Koc e Palikowska (2001) apresentam uma abordagem alternativa para o problema de definição de traçados em terrenos com obstáculos. Os autores propõem um *GA* para ajuste dos pontos de uma curva circular horizontal representada por uma função polinomial, em que os genes dos indivíduos do algoritmo representam os pontos adjacentes na curva e a função objetivo contempla as interações entre os trens e a via em relação às oscilações laterais dos veículos.

Na mesma tendência de aplicação de *GA* à resolução do problema otimização de traçados, Avdagic, Smajevic e Boskovic (2008) apresentam um método cuja função aptidão dos indivíduos a ser minimizada é dada pela soma da relação entre a declividade e a distância entre estações sucessivas de um alinhamento.

Apesar da existência de diferentes abordagens para resolução do problema de otimização de traçados rodoferroviários, a aplicação de um *GA* tem se mostrado como a mais promissora em termos de qualidade dos resultados e desempenho computacional. Nesse caso, é preponderante que a função objetivo seja adequadamente definida para que essa técnica de resolução de problemas de análise combinatória apresente resultados satisfatórios.

2.1 Algoritmo Genético para o Problema de Definição de Traçados Ferroviários

Um modelo de otimização de traçados ferroviários deve contemplar várias propriedades (JHA et al., 2006): considerar os itens de custos mais expressivos na função objetivo, como terraplenagem e obras de arte; respeitar as principais restrições do problema, sobretudo quanto à geometria da via; resultar em um alinhamento realista; identificar traçados em qualquer direção da região de estudo; otimizar o alinhamento sobre as projeções horizontal e vertical simultaneamente; e identificar soluções com a menor variabilidade possível.

Além disso, os autores citam propriedades como eficiência em termos de tempo de processamento, baixo armazenamento de dados, identificação de soluções em uma região factível contínua, desvio de regiões de alto custo de desapropriação, e compatibilidade com um *SIG*.

A ênfase em alguns desses itens pode negligenciar a importância de outros e resultar em soluções inadequadas ao problema proposto. Apesar dos avanços no desenvolvimento dos modelos de otimização de traçados, existem ainda dificuldades práticas na obtenção de alinhamentos de mínimo custo pela análise simultânea da geometria horizontal e vertical.

Conforme descrito na seção anterior, a aplicação de heurísticas tem se consolidado como estratégia de solução para o problema, pela disponibilidade atual de equipamentos computacionais para o processamento de grande quantidade de dados.

Na sequência deste capítulo um *GA* é descrito com base no procedimento detalhado por Jha et al. (2006), cuja implementação foi realizada para estimativa dos custos de novas infraestruturas ferroviárias como um dos objetivos desta tese.

Existem duas abordagens principais consideradas por Jha et al. (2006) para definição de um novo alinhamento: *non-backtracking* e *backtracking* (Figura 2.3). Na primeira, a progressão do alinhamento é sempre na direção do ponto de origem (*S*) para o ponto de destino (*E*), de modo que o traçado é interceptado por apenas um segmento de reta perpendicular à $\overline{SE}$. Na segunda abordagem esse segmento perpendicular pode interceptar o alinhamento ferroviário em mais de um ponto, resultando em maior complexidade na definição do traçado em contrapartida de um maior realismo da solução fornecida pelo *GA*.

Nesta tese foi implementado um modelo *backtracking* para proposta de novos alinhamentos ferroviários tridimensionais. Para isso, os pontos de alteração da orientação dos trechos em tangente (Pontos de Interseção - PIs) são definidos sob a forma de pares de coordenadas (*x*, *y*) relativos a suas respectivas longitude e latitude.

Figura 2.3 – Alinhamento *non-backtracking* (a) e *backtracking* (b) – Fonte: Jha et al. (2006)

Seja (x_0, y_0) o par de coordenadas do ponto extremo inferior esquerdo da região de estudo para possível implantação de um traçado ferroviário, e (x_{max}, y_{max}) as coordenadas do ponto superior direito dessa região conforme ilustrado na Figura 2.4. Considere ainda um alinhamento ferroviário com n PIs representados por $P(x_{P_i}, y_{P_i})$ para o i -ésimo ponto, tal que $P_0 = S$ e $P_{n+1} = E$, resultando na representação tridimensional de um traçado como da Figura 2.5.

Figura 2.4 – Representação dos limites de um traçado ferroviário – Fonte: Jha et al. (2006)

Figura 2.5 – Representação de um alinhamento tridimensional – Fonte: Jha et al. (2006)

Jha et al. (2006) formalizam um modelo matemático para o problema de otimização de traçados em que o alinhamento é caracterizado como uma função contínua diferenciável nos PIs. Nesse caso, as restrições dos raios mínimos das curvas horizontais e verticais, e declividades mínimas e máximas, são estabelecidas como relações entre essas derivadas nesses pontos.

Entretanto, existem dificuldades na definição de um traçado apropriado sob essa perspectiva, sobretudo pela representação adequada do relevo como uma superfície contínua e sua compatibilização com a função representativa do traçado. Assim, a resolução desse problema pelos métodos mencionados no início deste capítulo, como alternativas à modelagem mate-

mática, considera a função objetivo da Equação (2.1) e restrições entre a Equação (2.2) e a Equação (2.5) com vistas à minimização do custo total de construção da via.

$$\text{Minimizar } CC = TRC + LUC + EWC + TBC \quad (2.1)$$

sujeito a

$$x_0 \leq x_{P_i} \leq x_{max} \quad \forall \quad i = 1, \dots, n \quad (2.2)$$

$$y_0 \leq y_{P_i} \leq y_{max} \quad \forall \quad i = 1, \dots, n \quad (2.3)$$

$$L_{v_i} \geq L_{m_i} \quad \forall \quad i = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

$$|g_i| \leq G_{max} \quad \forall \quad i = 0, \dots, n \quad (2.5)$$

onde CC = custo total de construção de um traçado ; TRC = custo da superestrutura (trilhos, dormentes etc.) ; LUC = custo de desapropriações ; EWC = custo de terraplenagem ; TBC = custo para implantação de túneis e viadutos ; L_{v_i} = comprimento da curva vertical no i -ésimo ponto de interseção vertical (PV); L_{m_i} = comprimento mínimo da curva vertical no i -ésimo PV; $|g_i| = |z_r(i) - z_r(i + 1)|$ = declividade da via entre o i -ésimo e $(i + 1)$ -ésimo PV; G_{max} = declividade máxima estabelecida para a via.

Nas restrições, o domínio das variáveis está condicionado à delimitação da área de estudo, aos limites de declividade da via (definidos *a priori* como dados de entrada do modelo) e aos comprimentos mínimos das curvas verticais.

As etapas do GA são representadas no pseudocódigo a seguir com base nos procedimentos descritos em Jha et al. (2006). Na sequência desta seção os passos do GA são apresentados sumariamente, sem o detalhamento da formulação matemática e algoritmos auxiliares.

Inicialmente as coordenadas dos pontos inicial (S) e final (E) do alinhamento são definidos e os valores indicados no Apêndice A são atribuídos aos respectivos parâmetros do método de solução, incluindo o número de indivíduos n_p (equivalente ao número de alternativas de traçados avaliados), o número de gerações N (iterações) que define o critério de parada do GA, e os valores unitários para estimativa da função aptidão dos indivíduos da população.

Na sequência, o algoritmo procede à inicialização dos indivíduos, ou seja, à criação dos vetores que definem os traçados. Nesse processo, as coordenadas dos PIs de cada indivíduo são definidas aleatoriamente entre as cinco possibilidades descritas a seguir.

Inicialização de parâmetros

Criação de indivíduos

Escolha das coordenadas dos PIs no alinhamento horizontal

Para cada indivíduo executar a SUB-ROTINA

- Verificar adequação do traçado (eliminação de curvas circulares horizontais)
- Definir os raios das curvas circulares horizontais
- Definir os atributos das curvas circulares horizontais
- Definir a posição e altitude dos Pontos de Interseção Verticais (PVs)
- Calcular o comprimento das curvas parabólicas verticais
- Definir os atributos das curvas parabólicas verticais
- Caracterizar os pontos em estações sucessivas
- Calcular o custo total do alinhamento (aptidão do indivíduo)

Ordenar a população em função da aptidão

Identificar indivíduo de menor valor de aptidão

Calcular a probabilidade acumulada de alteração e exclusão de um indivíduo

Enquanto NÚMERO DE GERAÇÕES $\neq$ N

- Calcular o número de operadores de cruzamento e mutação ($N_{operadores}$)
- Escolher aleatoriamente os operadores a serem executados ($1 \leq OPERADOR \leq 8$)
 - Se $1 \leq OPERADOR \leq 4$
 - Executar operador de CRUZAMENTO
 - Executar SUB-ROTINA
 - Se $5 \leq OPERADOR \leq 8$ então MUTAÇÃO
 - Executar Operador de MUTAÇÃO
 - Executar SUB-ROTINA
- Ordenar população em função do custo total do alinhamento (aptidão)
- Identificar indivíduo com menor valor de aptidão
- Verificar se a menor aptidão é do mesmo indivíduo da iteração anterior
 - Se o indivíduo de menor aptidão permanece inalterado então $N = N + 1$
 - Se o indivíduo de menor aptidão é alterado então $N = 0$

Fim Enquanto

Impressão de resultados (traçado de menor custo, tempo de processamento, atributos do traçado de mínimo custo e arquivo vetorial georreferenciado)

1. **Pontos de Interseção Equidistantes no Alinhamento $\overline{SE}$:** as coordenadas (x_i, y_i) são estabelecidas nas interseções de planos verticais equidistantes na reta $\overline{SE}$, conforme ilustrado na Figura 2.6. As coordenadas verticais (z_n) desses pontos são definidas nessa mesma proporção em relação à diferença de altitude entre os pontos $S(z_S)$ e $E(z_E)$.

Figura 2.6 – Representação dos planos perpendiculares ao alinhamento entre a origem e o destino de um traçado – Fonte: Jha et al. (2006)

2. Pontos de Interseção sobre os Planos Perpendiculares Equidistantes no Alinhamento

$\overline{SE}$ e Elevações Definidas Aleatoriamente: as coordenadas (x_n, y_n) são estabelecidas aleatoriamente sobre os planos de corte verticais equidistantes na reta $\overline{SE}$, e as coordenadas verticais (z_n) são definidas aleatoriamente em um intervalo restrito às declividades máxima e mínima preestabelecidas.

3. Pontos de Interseção sobre os Planos Perpendiculares Equidistantes no Alinhamento

$\overline{SE}$ e Elevações Definidas Próximas do Perfil do Terreno: as coordenadas (x_n, y_n) são estabelecidas aleatoriamente sobre os planos de corte verticais equidistantes na reta $\overline{SE}$, e as respectivas coordenadas verticais (z_n) são definidas como as mais próximas do perfil do terreno com base em um arquivo *raster* de elevação.

4. Pontos de Interseção Escolhidos Aleatoriamente sobre a Região de Estudo e Elevações Escolhidas Aleatoriamente

Elevações Escolhidas Aleatoriamente: as coordenadas (x_n, y_n) são escolhidas aleatoriamente no intervalo da região factível de estudo do traçado, delimitado pelas coordenadas (x_0, y_0) e (x_{max}, y_{max}) . As coordenadas verticais (z_n) desses pontos são definidas aleatoriamente em um intervalo restrito às declividades máxima e mínima preestabelecidas.

5. Pontos de Interseção Escolhidos Aleatoriamente sobre a Região de Estudo e Elevações Definidas Próximas do Perfil do Terreno

Elevações Definidas Próximas do Perfil do Terreno: as coordenadas (x_n, y_n) são escolhidas aleatoriamente no intervalo da região factível de estudo do traçado, e as respectivas coordenadas verticais (z_n) são estabelecidas como as mais próximas do perfil do terreno com base em um arquivo *raster* de elevação.

Após a atribuição de valores às coordenadas dos PIs, o algoritmo executa uma SUB-ROTINA de caracterização de cada traçado com base nesses valores. O primeiro procedimento é a verificação do excesso de curvas circulares horizontais em um traçado conforme exemplificado na Figura 2.7. Para solucionar esse eventual problema, uma correção é executada de modo que curvas circulares são transformadas em tangentes pela reconfiguração da posição dos PIs.

Figura 2.7 – Traçado com excessivas curvas circulares – Fonte: Jha et al. (2006)

Em seguida, procede-se à definição dos raios das curvas circulares horizontais mediante um valor de raio mínimo limitado pela tecnologia ferroviária que deve ser operada na infraestrutura, sob a restrição de que os comprimentos das seções em tangente entre curvas sucessivas seja sempre maior ou igual a zero para evitar a sobreposição de curvas (ou descontinuidade do traçado) como na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Exemplo de descontinuidade entre curvas circulares horizontais sucessivas – Fonte: Jha et al. (2006)

No próximo passo da SUB-ROTINA, o GA calcula os atributos indicados na Figura 2.9 para cada curva circular horizontal, sendo excluídas as transições entre tangentes e curvas circulares,

uma vez que esse nível de detalhamento não condiz com a proposta de estimativa dos custos no nível de anteprojeto como considerado nesta tese.

Figura 2.9 – Elementos das curvas circulares horizontais do traçado – Fonte: Jha et al. (2006)

Ainda na SUB-ROTINA, as posições dos pontos de interseção das curvas verticais (PVs) são definidas onde há alteração da declividade na seção longitudinal da ferrovia (Figura 2.10).

Figura 2.10 – Sucessão de PVs na seção longitudinal – Fonte: Jha et al. (2006)

É importante ressaltar que o número de PVs (e, portanto, o número de curvas verticais) é equivalente ao de PIs definidos *a priori*, de modo que a posição daqueles coincide com a desses (Figura 2.11). Assim, existem três possibilidades de elementos geométricos na posição de um ponto de interseção: i) uma curva circular horizontal ($R_{min} \leq R_i < \infty$) e uma curva vertical ($z_{v_{i-1}} \neq z_{v_i} \neq z_{v_{i+1}}$), perfazendo uma seção de curva mista; ii) uma curva horizontal

($R_{min} \leq R_i < \infty$) em trecho plano, em aclave ou declive ($z_{v_{i-1}} = z_{v_i} = z_{v_{i+1}}$); iii) e um trecho tangente ($R_i \approx \infty$) em uma curva vertical ($z_{v_{i-1}} \neq z_{v_i} \neq z_{v_{i+1}}$).

Figura 2.11 – Exemplo de coincidência dos PIs na projeção horizontal (P) e da seção longitudinal (V) em um alinhamento – Fonte: Jha et al. (2006)

A partir da definição das altitudes dos PIs (z_n) segundo uma das cinco regras apresentadas anteriormente (ou após a execução de um operador de mutação ou cruzamento), a altitude (h_{V_n}) nos pontos de interseção das curvas parábolicas verticais (PVs) é estabelecida com base em um algoritmo auxiliar para verificação da eventual violação de restrições de declividade.

Uma vez definidas as altitudes desses pontos de interseção verticais, as declividades da ferrovia são calculadas nas seções entre curvas parábolicas sucessivas. A partir disso, os comprimentos dessas curvas (L_v) são calculados de modo a evitar a descontinuidade dos traçados em relação à seção longitudinal conforme ilustrado na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Sucessão de pontos de interseção verticais e exemplo de descontinuidade na seção longitudinal – Fonte: Jha et al. (2006)

No caso da definição de alinhamentos rodoviários, Jha et al. (2006) tratam do comprimento mínimo de curvas verticais mediante restrições de visibilidade. Entretanto, na SUB-ROTINA do GA para alinhamentos ferroviários essa restrição é desconsiderada devido às características operacionais do modo de transporte.

Após caracterização dos pontos de interseção das curvas horizontais e verticais, e os pontos de transição entre as seções em tangente e essas curvas (C_i e T_i na Figura 2.13, e C_i^V e T_i^V na Figura 2.14), o próximo passo da SUB-ROTINA é executar o estaqueamento de cada traçado, ou seja, identificar a posição e altitude de estacas separadas por uma distância preestabelecida.

A Figura 2.13 (esq.) representa graficamente a posição de uma estação (S_i) em um trecho em tangente e a Figura 2.13 (dir.) ilustra esse ponto em uma curva circular da projeção horizontal. Analogamente, a estação é representada na seção longitudinal à esquerda da Figura 2.14 em um trecho em tangente e à direita em uma curva vertical parabólica.

Figura 2.13 – Definição de estações na projeção horizontal da ferrovia – Fonte: Jha et al. (2006)

Figura 2.14 – Definição de estações na seção longitudinal da ferrovia – Fonte: Jha et al. (2006)

A distância entre estacas (S_i) é definida em função das dimensões do *pixel* dos arquivos *rasters* de configuração do terreno (Figura 2.15, esq.) disponibilizados pela *U.S. Geological Survey* (USGS, 2014) através da interface *online EarthExplorer* (USGS, 2014). Esses arquivos contêm

valores numéricos sobre a topografia do Brasil com *pixels* representados por quadrículas de 90 metros (*i.e.* $D_x = D_y = 90$ metros na Figura 2.4).

Para estimativa de custos de desapropriação foram obtidos arquivos do tipo *raster* de uso e cobertura do solo providos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014a), cuja classificação foi generalizada para áreas urbanas e rurais (Figura 2.15, dir.).

Figura 2.15 – *Rasters* de elevação do terreno (NASA, 2014) e de uso do solo (IBGE, 2014a) da Região Sudeste do Brasil

Uma vez que os *rasters* são georreferenciados, a elevação do terreno na posição das estacas e o uso do solo em que estão localizadas são facilmente identificados e convertidos em valores numéricos para cálculo da função aptidão dos indivíduos da população do GA.

Nesse sentido, o primeiro item de custo da Equação 2.1 (TRC) diz respeito ao custo total para implantação dos elementos lineares da via (trilhos, dormentes, eletrificação quando existente etc.), que é calculado com base no comprimento total do alinhamento (considerando os trechos sucessivos em tangente e curvas circulares horizontais) e um custo médio por quilômetro indicado no Apêndice A.

O segundo item (LUC) está associado aos valores de desapropriações na faixa de domínio da via a ser implantada. Para isso, define-se *a priori* uma distância entre o eixo da ferrovia e as bordas limítrofes da faixa de domínio e calcula-se a área de desapropriação (Figura 2.16), multiplicando esse valor por um custo médio (Apêndice A) em função do tipo de uso do solo.

O terceiro item equivale à estimativa dos valores econômicos de terraplenagem ($EW C$). Para isso, após a obtenção das elevações nas estações do traçado com base no perfil longitudinal do terreno e da ferrovia, procede-se ao cálculo das áreas de corte e aterro nas seções transversais e

Figura 2.16 – Exemplo de avaliação de uso do solo – Fonte: Jha et al. (2006)

do volume de movimentação de terra entre estações sucessivas do alinhamento.

A Figura 2.17 (a) representa as seções transversais finais pretendidas para a ferrovia nos casos de corte e aterro, enquanto a Figura 2.17 (b) representa a seção longitudinal entre duas estações genéricas para o cálculo das áreas de bota-fora (corte) e empréstimo (aterro) em função das altitudes do terreno e da ferrovia obtidas nos procedimentos descritos anteriormente.

Figura 2.17 – Seções transversais de corte e aterro (a) e exemplo de seção transversal com áreas de bota-fora e empréstimo (b) – Fonte: Jha et al. (2006)

Finalmente, o quarto item da função aptidão dos indivíduos do GA é a estimativa dos valores monetários de implantação de túneis, pontes e viadutos ao longo da via (*TBUC*). Essas estruturas são consideradas nas seções em que a execução de terraplenagem é proibitiva por motivos técnicos (*e.g.* alturas máximas de talude).

Uma ponte ou viaduto é definido quando a diferença entre a elevação do terreno e de uma estação do alinhamento é negativa e o valor absoluto desse cálculo é maior que um limite caracterizado no Apêndice A. Nesse caso, o custo de movimentação de terra é substituído pelo custo total de construção da estrutura, dado pela multiplicação da extensão do trecho, a largura da sua plataforma e um custo médio de construção por metro quadrado indicado naquele apêndice.

Por outro lado, um túnel é estabelecido quando a diferença entre as altitudes é positiva e maior do que um valor limite para taludes de corte em termos construtivos. Nesse caso, o custo de terraplenagem é substituído por um custo de implantação de túneis, dado pela multiplicação da área da seção transversal padrão pelo seu comprimento, e um custo unitário (em R\$/km) de construção dessa infraestrutura conforme definido no Apêndice A.

Ao finalizar a SUB-ROTINA de caracterização dos traçados, o algoritmo principal é retomado, os indivíduos são ordenados em ordem crescente dos custos totais calculados (aptidão) e prossegue-se às iterações de cruzamento e mutação para identificação de alternativas de configurações dos PIs e PVs (e seus respectivos atributos) que resultem em menores custos.

Para isso, primeiramente calcula-se a probabilidade acumulada de participação de um indivíduo em um dos operadores de cruzamento e/ou mutação em função do valor de sua aptidão segundo a Equação 2.6.

$$p_k = \frac{q \cdot (1 - q)^{k-1}}{1 - (1 - q)^{n_p}} \quad (2.6)$$

em que p_k = probabilidade de escolha do k -ésimo indivíduo da lista ordenada em função da aptidão; n_p = tamanho da população; e q = parâmetro de troca definido pelo usuário, $q \in (0, 1)$.

O coeficiente q pode ser interpretado como um indicador do nível de seleção dos indivíduos pois valores elevados desse parâmetro resultam em menor variabilidade da população (*i.e.* uma menor quantidade de indivíduos tem maior probabilidade de seleção) enquanto valores pequenos resultam em maior exploração da região factível de solução do problema sob penalidade de maior tempo de processamento computacional.

Considerando a Equação 2.6, a probabilidade de escolha de indivíduos para aplicação dos operadores é maior para aqueles que encontram-se no topo da lista ordenada em relação à aptidão, ou seja, os traçados de menor valor de custo.

Definido o vetor de probabilidades de seleção dos indivíduos em função do tamanho da população e do parâmetro q (Apêndice A), procede-se à definição do número de operadores de cruzamento ou mutação ($N_{operadores}$) a serem executados na geração corrente do GA. A recomendação de Jha et al. (2006) é que sejam executadas alterações entre 30% e 50% dos indivíduos da população (*i.e.* $0,3 \cdot n_p \leq N_{operadores} \leq 0,5 \cdot n_p$).

Assim, os operadores de cruzamento ou mutação são escolhidos aleatoriamente com distribuição de probabilidade uniforme, os quais são definidos em oito tipos distintos (quatro para os de cruzamento e quatro para os de mutação) conforme descritos na sequência. Se a escolha aleatória resultar em um número inteiro entre um e quatro, então o operador executado é de cruzamento. Se não, se o valor sorteado for entre cinco e oito, uma mutação é executada.

1. **UNIFORM MUTATION:** substituição do PI de um traçado selecionado por outro cujas coordenadas são escolhidas aleatoriamente na região de estudo (Figura 2.18, *a*);
2. **STRAIGHT MUTATION:** escolha aleatória de dois PIs de um indivíduo existente e definição de uma seção em tangente entre eles (Figura 2.18, *b*);

Figura 2.18 – Exemplos de operadores de mutação – Fonte: Jha et al. (2006)

3. **NON-UNIFORM MUTATION:** escolha aleatória de um PI e definição de uma nova coordenada segundo uma função parametrizada pela geração corrente do GA (página 103 de JHA et al., 2006);
4. **WHOLE NON-UNIFORM MUTATION:** análogo ao **NON-UNIFORM MUTATION** porém com alteração das coordenadas de todos os PIs de um indivíduo selecionado aleatoriamente.
5. **SIMPLE Crossover:** dois indivíduos (traçados) são escolhidos aleatoriamente na população e o gene (ponto de interseção) de um deles é trocado com o gene do outro, resultando em dois novos traçados conforme representado na Figura 2.19 (*a*);

6. **TWO-POINT Crossover:** análogo ao *SIMPLE Crossover*, diferindo apenas pela troca de pares de genes entre indivíduos (Figura 2.19, b);
7. **ARITHMETIC Crossover:** um terceiro traçado resulta da interpolação entre dois indivíduos escolhidos aleatoriamente, através de uma ponderação conforme ilustrado na Figura 2.19 (c);
8. **HEURISTIC Crossover:** um terceiro indivíduo resulta da extrapolação aleatória de dois traçados (Figura 2.19, d);

Figura 2.19 – Exemplos de operadores de cruzamento – Fonte: Jha et al. (2006)

Para cada operador de cruzamento ou mutação executado, os novos indivíduos produzidos são submetidos à SUB-ROTINA idêntica à caracterização da população inicial. Ao final desse processo em cada geração do GA, a Equação 2.6 é utilizada para cálculo da probabilidade de exclusão de um indivíduo considerando-se a ordenação da lista de traçados em ordem decrescente do valor das respectivas funções aptidão.

Os indivíduos escolhidos são substituídos pelos novos traçados resultantes dos operadores, mesmo que os valores da aptidão daqueles sejam menores que dos indivíduos antigos. Essa regra pode eventualmente incorrer na exclusão de traçados de boa qualidade, porém foi estabelecida para promover a variabilidade da população em detrimento da manutenção de indivíduos de melhor qualidade por um número excessivo de gerações, sob o risco de estagnação do GA em soluções ótimas locais.

Após ordenação da nova população, o indivíduo de menor valor de custo total é identificado e selecionado como aquele que reproduz o melhor traçado entre a origem e o destino definidos. Em seguida, um critério de parada preestabelecido é verificado e, caso não seja satisfeito, uma nova iteração de operadores é executada.

Por outro lado, caso o critério de parada seja satisfeito, o GA é encerrado e os resultados de custo total, características do traçado escolhido e os tempos de processamento são impressos em arquivo de texto, seguido da criação de um arquivo vetorial georreferenciado do tipo *shapefile* (extensão ".shp").

Apesar de os modelos descritos neste capítulo serem ferramentas úteis para resolução do problema de otimização de traçados, na literatura encontrada a aplicação do GA restringe-se à exploração de áreas com pequena extensão quando consideradas as características topográficas e ocupação do solo. Isso decorre do fato de que a resolução desses problemas envolve o processamento de grande quantidade de dados e acesso recorrente aos arquivos que contém informações sobre as características do terreno durante a execução do algoritmo.

Uma alternativa para contornar a questão é a aplicação da abordagem de programação paralela, que consiste na atribuição de tarefas a múltiplas máquinas simultaneamente e viabiliza a redução dos tempos de processamento computacional. A literatura mostra que o tema tem sido

abordado em pesquisas para resolução de problemas de otimização combinatória, implementados sob diferentes heurísticas e meta-heurísticas como *Variable Neighborhood Search* e *Bee Colony Algorithm* (GUPTA; DEEP, 2009 e CRAINIC; DAVIDOVIĆ; RAMLJAK, 2012).

No âmbito da estimativa de custos de traçados rodoviários, algumas publicações fazem referência à aplicação de computação paralela demonstrando a sua eficiência na resolução do problema (CHEN; GUO; LV, 2011 e KAZEMI; SHAFARI, 2013), não tendo sido identificada nenhuma pesquisa anterior sobre a implementação de GA à modelos de alinhamentos ferroviários como descrito nas seções subsequentes deste capítulo.

2.2 Algoritmo Genético e Programação Paralela

Existem três fatores que justificam a implementação do GA utilizando a abordagem de programação paralela. Primeiramente, há uma grande quantidade de dados a serem processados a cada geração (iteração) do algoritmo durante a execução dos operadores de cruzamento e mutação. Em segundo lugar, os arquivos *rasters* que caracterizam a topografia do terreno e o uso do solo são consultados recorrentemente nesses iterações, requerendo vasta capacidade de acesso à memória de um computador. Finalmente, o armazenamento de dados sobre os atributos dos traçados exigem uma ampla disponibilidade de memória computacional.

A utilização de computação paralela é definida por duas interfaces: uma infraestrutura computacional física constituída de equipamentos conectados entre si, ou máquinas virtuais (*Virtual Machines – VMs*) hospedadas em processadores acessados remotamente; e uma plataforma (*framework*) ou *software* que permite a comunicação entre essas máquinas em uma rede.

O armazenamento e processamento de dados pode ser através de um conglomerado de computadores de alto desempenho (*data warehouse*) interligados em uma rede acessada pela Internet. A oferta recente de serviços com base nessa infraestrutura configura o termo "Computação em Nuvem" (*Cloud Computing*), cuja troca de informações entre servidores e clientes é permitida a qualquer usuário, em geral, mediante pagamento de tarifas. Uma revisão de literatura extensa sobre o tema, com referências relevantes, pode ser encontrada em Hashem et al. (2015).

Atualmente, existem três modelos de serviços mais comuns: Plataforma como um Serviço

(*PaaS - Platform as a Service*) , que disponibiliza uma plataforma com recursos para usuários, como um banco de dados ou *web service* (por exemplo, *Jelastic*, *Google's Apps Engine*, *Salesforce.com*, *Force Platform* e *Microsoft Azure*); Software como Serviço (*SaaS - Software as a Service*) , que oferece acesso através da Internet a aplicativos hospedados na nuvem (e.g. *Google Docs*, *Microsoft Share Point Online*, *Gmail*, *Salesforce.com* e *Online Payroll*); e Infraestrutura como um Serviço (*IaaS - Infrastructure as a Service*) , que disponibiliza processamento remoto de dados sob demanda dos usuários como *Yahoo.com*, *Flexiscale* e *Amazon's EC2*.

Nesta tese utilizou-se serviços do tipo *IaaS* para execução do *GA*. Como exemplificado, existem diferentes provedores que permitem o acesso a máquinas virtuais para processamento de dados e, nessa tendência, a Universidade de São Paulo implantou recentemente uma infraestrutura que disponibiliza vastos recursos computacionais para seus membros ou para usuários externos mediante pagamento pelo uso horário (NUVEMUSP, 2013).

O ambiente em nuvem da Universidade de São Paulo é acessado através de um *website* pelas credenciais fornecidas aos usuários (Figura 2.20, *a*). As máquinas virtuais criadas são apresentadas em uma lista (Figura 2.20, *b*), identificadas por seus respectivos *IPs* (*Internet Protocols*) internos à rede. Essas máquinas são acessadas através de um *IP* estático público que viabiliza a transferência de dados entre usuário e máquinas virtuais.

(a) Página de acesso à Nuvem USP

(b) Exemplo de lista de máquinas virtuais

Figura 2.20 – Página de acesso ao ambiente Nuvem USP e exemplo de lista de máquinas virtuais

Além da infraestrutura computacional, a aplicação da programação paralela requer a utilização de interface específica para tratamento das informações e execução de comandos. O *JPPF* (*Java Parallel Programming Framework*; JPPF, 2014) é um *framework* gratuito (*freeware*) que permite o desenvolvimento de interfaces computacionais para processamento de dados em paralelo utilizando a linguagem de programação *Java* (ORACLE, 2012).

Uma vantagem do *JPPF* é a facilidade de construção da rede de máquinas virtuais interconectadas e por permitir a interação de computadores com sistemas operacionais distintos (*Windows*, *Linux* ou *Mac*), de modo que a sua instalação e execução não requer uma rede de sistemas operacionais homogênea e dedicada exclusivamente ao processamento de dados.

Sob a terminologia do *JPPF*, um ou mais computadores (*clients*) que contêm um algoritmo principal são conectados a uma ou mais máquinas virtuais denominadas *servers*, que gerenciam a execução desse código em paralelo. Esses *servers*, por sua vez, são conectados a múltiplas máquinas virtuais denominadas *nodes*, que executam partes do algoritmo principal. A menor sequência desse algoritmo principal executada em cada *node* é denominada *task*, e um agrupamento de vários *tasks* é denominado *job*.

A Figura 2.21 a seguir exemplifica duas topologias de rede para interligação entre *clients*, *servers* e *nodes* no *JPPF*. A criação de diferentes alternativas de configuração da rede dá-se por motivos de confiabilidade das conexões e a quantidade de informações transmitidas na rede.

Figura 2.21 – Topologias possíveis de redes estabelecidas no *JPPF* – Fonte: JPPF (2014)

A Figura 2.21 (a) representa a topologia mais simples, onde cada *client* é conectado a um único *server*, ao qual estão conectados vários *nodes*. Em uma arquitetura desse tipo há o risco de

falha nas conexões, cuja mitigação se dá pela conexão de múltiplos servidores simultaneamente de modo a prover alternativas de conectividade, conforme ilustrado na Figura 2.21 (b).

Crainic, Davidović e Ramljak (2012) referem-se à primeira topologia como "arquitetura estrela" (*star architecture*) e à segunda como "rede interconectada" (*interconnected network*). No *JPPF* os *nodes* são providos de um mecanismo que permite conectarem-se automaticamente a um *server* alternativo no caso de falha daquele a que está conectado.

O fluxograma de execução de um algoritmo no *JPPF* pode ser verificado na Figura 2.22. Após a criação dos *tasks* em uma iteração do algoritmo principal no *client* e agrupamento em um *job*, esse é enviado ao *server* que gerencia a atribuição de cada *task* aos *nodes* disponíveis, utilizando algoritmos específicos em um processo denominado *load balancing*. Ao término da execução de todos os *tasks*, os resultados obtidos são retornados ao *server* que, por sua vez, gerencia a apresentação desses ao *client*.

Figura 2.22 – Fluxograma de processamento de dados utilizando o *JPPF* – Fonte: *JPPF* (2014)

O *JPPF* possibilita o controle da rede e verificação do desempenho durante a execução de um *job* através da interface *Administration and Monitoring Tool*. A Figura 2.23 representa a janela da interface que permite parar ou reiniciar uma máquina virtual e a Figura 2.24 ilustra a visualização da topologia da rede de máquinas virtuais interconectadas ao *server*.

Figura 2.23 – Interface do usuário representando a conexão entre *nodes* e *server* no *Administration Tool* do *JPPF*

Figura 2.24 – Topologia da rede de máquinas virtuais no *Administration Tool* do *JPPF*

Ainda no ambiente do *Administration and Monitoring Tool*, a Figura 2.25 exemplifica os tempos de execução e transmissão dos *jobs*, e a Figura 2.26 ilustra as medidas de desempenho reportadas durante a execução de um algoritmo.

Figura 2.25 – Gráfico do tempo de processamento durante execução do GA em paralelo no *Administration Tool* do JPPF

Figura 2.26 – Exemplo de representação das medidas de desempenho durante a execução do GA em paralelo no *Administration Tool* do JPPF

Uma questão imperativa para o melhor aproveitamento das propriedades do processamento em paralelo é a capacidade de transferência de dados na rede de máquinas virtuais. Em geral, essa transferência está condicionada à qualidade e estabilidade das conexões, as quais invariavelmente sofrem oscilações no tempo.

Mediante testes do GA adaptado à topologia do JPPF verificou-se que a quantidade de dados transferidos entre *client*, *server* e *nodes* em cada geração era uma restrição para a redução dos

tempos de processamento. Desse modo, optou-se pela implementação de um sistema de banco de dados (*Database - DB*) utilizando-se o *MySQL* (MYSQL, 2014).

Durante a execução do *GA*, cada *node* transfere as características dos indivíduos para um banco de dados instalado no *server*, que podem ser acessadas tanto das máquinas virtuais onde o *tasks* foram executados quanto dos *clients* que os enviaram. Esse processo reduz drasticamente o tempo de transferência de dados na rede pois as informações são armazenadas no *DB* do *server* e rapidamente acessadas pelos *nodes* e *clients*.

No contexto do *GA* para definição de novos traçados ferroviários, propõe-se uma topologia de rede do tipo "estrela" como representado na Figura 2.21 (a) tal que os elementos do *JPPF* associam-se ao *GA* da seguinte maneira: o algoritmo indicado na página 46 é executado no *client*; um *task* é uma SUB-ROTINA que define cada indivíduo quanto à escolha das coordenadas dos PIs, caracterização dos traçados e estimativa da função aptidão.

Conforme ilustrado no fluxograma da Figura 2.27, em cada geração do *GA* os operadores de cruzamento e mutação são executados no algoritmo principal e os *tasks* gerados pelo código da SUB-ROTINA são submetidos aos *servers* sob a forma de um *job*. Em seguida, esse *job* é desmembrado novamente nos *tasks*, os quais são submetidos aos *nodes* e cujos resultados são enviados ao *DB* do *server* e disponibilizados ao *client* na respectiva iteração.

2.3 Análise de Desempenho

Nesta seção são apresentadas análises dos resultados do *GA* considerando a abordagem de programação paralela através do *framework JPPF* aplicado a diferentes conexões ferroviárias.

As condições estabelecidas para essa avaliação foram: definição de três diferentes cenários de novos alinhamentos ferroviários entre cidades da Região Sudeste; variação do número de PIs dos traçados entre essas localidades; e número de máquinas virtuais (*nodes*) disponibilizadas para execução dos operadores de cruzamento e mutação. As medidas de desempenho analisadas para cada cenário são o custo total, o tempo de processamento, a extensão dos traçados obtidos e o custo médio por quilômetro de ferrovia.

Os pares de cidades dos cenários foram definidos em função de uma análise prévia das carate-

Figura 2.27 – Fluxograma do GA adaptado ao JPPF

rísticas topográficas e de uso do solo entre elas. Assim, foram estabelecidas três conexões entre cidades da Região Sudeste cujas características topográficas e de uso do solo fossem distintas entre si de modo a viabilizar a comparação quantitativa e qualitativa dos resultados do GA: Rio de Janeiro e Juiz de Fora; Campinas e Poços de Caldas; e Araraquara e Ribeirão Preto.

Para esses cenários optou-se pela definição de uma densidade de pontos de interseção por quilômetro em detrimento de um valor absoluto de PIs, de modo a viabilizar a comparação do desempenho do GA entre cenários, dada a possível discrepância de desempenho do algoritmo em função da distância entre as cidades.

A variação da quantidade de máquinas virtuais (VMs) mostrou-se pertinente para avaliação da eficácia da aplicação do GA executado em paralelo em relação aos tempos de processamento do algoritmo, bem como uma contribuição a possíveis aplicações futuras dessa estratégia de solução a outros problemas de otimização combinatória.

Para a distância média entre PIs foram estabelecidos seis valores, iguais a 5 km, 10 km, 15 km, 20 km e 25 km. Quanto ao número de máquinas virtuais disponíveis foram estabele-

cidos cinco valores: 1 (equivalente à execução do GA em um único computador incluindo a transmissão de dados na rede de *nodes* interconectados), 5, 10, 25 e 50.

Assim, uma replicação do GA entre duas localidades equivale a 25 execuções do algoritmo da página 46. Porém, para obtenção de um valor médio das medidas de desempenho propostas optou-se pela execução de cinco replicações de cada cenário, resultando em 125 execuções daquele algoritmo para cada par de cidades. Todas as máquinas virtuais utilizadas nessas replicações possuem configuração idêntica e são denominadas no ambiente em nuvem da USP como "VM Alta Performance com Memória Extra Linux" e possui oito processadores com memória RAM total de 32768 MB e capacidade de armazenamento no disco rígido de 500 GB (i.e. 8 vCPU 32768 MB vRAM e 500 GB de memória).

Dado que as cidades escolhidas para análise do desempenho do GA possuem atualmente uma infraestrutura ferroviária nas regiões urbanas (como consequência do processo histórico de sua criação e desenvolvimento), optou-se pela proposta de definição de novos alinhamentos somente nas áreas rurais que as separam. Na etapa de aplicação da análise socioeconômica desta tese considera-se um custo médio por quilômetro de revitalização e uso da faixa de domínio existente na eventualidade de implantação de uma rede ferroviária futura.

Antes da apresentação dos resultados das replicações dos cenários descritos nesta seção, são esclarecidas a seguir as premissas de caracterização geométrica, de definição dos custos unitários dos traçados, e de parametrização do GA.

2.3.1 Definição de Parâmetros

A via permanente considerada para definição dos traçados é composta por uma faixa de domínio delimitada por barreiras de proteção e plataforma ferroviária com via dupla para movimentação de trens em dois sentidos opostos. Os parâmetros para caracterização dos traçados em projeção horizontal, longitudinal e transversal são definidos no Apêndice A, que contém uma representação esquemática da seção transversal dessa via permanente padrão.

Para estabelecer os raios mínimos das curvas circulares horizontais considera-se um modelo teórico simplificado de equilíbrio dos veículos ferroviários na seção transversal de uma curva

circular horizontal conforme ilustrado na Figura 2.28. Nesse caso, P é o peso do veículo, F_c é a força centrífuga atuante sobre o veículo, h é diferença de cota entre o trilho interno e o externo, e é a superelevação (ângulo entre o plano horizontal e a superfície da ferrovia) e B é bitola.

Figura 2.28 – Modelo teórico de representação das forças atuantes no trem em uma curva circular horizontal

De modo a evitar o tombamento do veículo na direção oposta à curva, o equilíbrio entre o peso e a força centrífuga pode ser representado pela Equação 2.7.

$$\frac{m \cdot V^2}{R} \cdot \cos(\alpha) = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (2.7)$$

onde V = velocidade do trem; R = raio da curva circular; g = aceleração da gravidade.

Sob a premissa de $\sin(e) = \tan(e) = h/B$ e $\cos(e) = 1,0$, o raio da curva circular horizontal pode ser calculado conforme explicitado na Equação 2.8 para $g \cong 9,81 m/s^2$. Nesse caso, o raio mínimo que permite a operação de trens com segurança é calculado quando os veículos trafegam à velocidade máxima de projeto em uma curva com superelevação específica.

$$R_{min} = \frac{B \cdot V_{max}^2}{127 \cdot h} \quad (2.8)$$

onde R_{min} = raio mínimo da curva circular (metros); B = bitola (metros); V_{max} = velocidade máxima do trem (km/h); h = diferença de cota entre bordas dos trilhos (metros).

AREMA (2003) sugere uma diferença média de altura entre trilhos (h) para compensar os efeitos da aceleração centrífuga em trens de passageiros igual a 6 polegadas ou aproximadamente 0,1524 metros. Logo, para uma bitola (B) de 1,435 metros, o raio mínimo de curvas

circulares horizontais para operação de *HPTs* (150 km/h) e de *HSTs* (300 km/h) segundo a Equação 2.8 é de aproximadamente 1.668,0 metros e 6.673,0 metros.

Assim, com vistas à manutenção da operação segura dos trens, os raios mínimos das curvas circulares horizontais de projeto considerados nesta tese foram de 2.000 metros e 7.000 metros para *HPTs* e *HSTs*, respectivamente.

Em relação aos parâmetros do *GA*, Jha et al. (2006) recomendam o número de indivíduos equivalente a 15 vezes o número de Pontos de Interseção possíveis no traçado ($n_p = 15 \cdot \text{PIs}$). Ainda, com base em análise de resultados em instâncias de teste, os autores indicam como critério de parada um número máximo de 300 iterações sucessivas para que seja atingida uma convergência satisfatória da solução de custo total. Entretanto, pela realização de testes preliminares propõe-se a alteração dessa regra, com parada do *GA* após 100 gerações sucessivas.

O Apêndice A contém valores numéricos para os parâmetros de caracterização da via permanente de ambas as tecnologias, os parâmetros de execução do *GA* e os custos unitários dos itens contemplados na composição do custo total dos traçados.

2.3.2 Resultados da Análise de Desempenho

Na aplicação do método entre o Rio de Janeiro e Juiz de Fora, os resultados das replicações quanto aos valores de custos totais, tempos de processamento para obtenção das soluções, comprimentos dos alinhamentos e custos médios (R\$/km) para traçados compatível com a operação de *HPTs* são apresentados entre a Tabela 2.1 e a Tabela 2.4.

Analogamente, são apresentados os resultados para traçados apropriados à operação de *HSTs* entre a Tabela 2.5 e a Tabela 2.8. A Figura 2.29 e Figura 2.30 resumem os valores apresentados nessas tabelas em relação às respectivas tecnologias ferroviárias.

Tabela 2.1 – Custos totais de alinhamentos para operação de *HPT* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão)·10⁹ R\$]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	8,84 / 1,67	9,01 / 0,93	8,66 / 1,03	8,51 / 1,09	8,20 / 1,12
10	9	8,54 / 0,39	9,60 / 1,18	8,51 / 0,79	9,60 / 1,42	9,75 / 1,89
15	6	9,51 / 0,85	9,42 / 0,54	9,16 / 1,01	10,08 / 1,66	9,78 / 1,01
20	5	9,35 / 0,67	10,36 / 0,73	10,28 / 1,23	10,83 / 1,71	10,32 / 1,15
25	4	11,33 / 0,46	11,57 / 0,98	12,07 / 1,89	9,91 / 0,48	10,18 / 0,62

Tabela 2.2 – Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de *HPT* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão) minutos]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	184 / 70	36 / 24	48 / 28	69 / 22	53 / 21
10	9	168 / 53	37 / 16	35 / 32	28 / 8	33 / 21
15	6	168 / 48	37 / 13	27 / 9	29 / 13	21 / 9
20	5	146 / 65	35 / 22	25 / 16	18 / 11	26 / 21
25	4	114 / 48	32 / 11	13 / 3	17 / 5	14 / 3

Tabela 2.3 – Comprimentos dos alinhamentos para operação de *HPT* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão) km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	112,4 / 9,0	112,0 / 6,9	114,1 / 7,1	117,7 / 5,7	115,7 / 7,4
10	9	112,5 / 5,2	123,8 / 8,4	112,3 / 7,9	117,8 / 14,4	114,1 / 7,3
15	6	111,3 / 3,7	113,1 / 5	110,0 / 7	111,8 / 7,1	114,5 / 7,7
20	5	113,9 / 3,9	112,7 / 4,7	113,5 / 4,2	113,5 / 3,8	114,2 / 8,1
25	4	116,0 / 4,9	113,8 / 4,3	119,0 / 10,2	113,5 / 4,7	114,3 / 9,2

Tabela 2.4 – Custos médios de alinhamentos para operação de *HPT* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão)·10⁷ R\$/km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	7,82 / 0,93	8,06 / 0,87	7,58 / 0,57	7,23 / 0,80	7,07 / 0,57
10	9	7,60 / 0,37	7,74 / 0,54	7,58 / 0,53	8,14 / 0,40	8,51 / 1,34
15	6	8,56 / 0,87	8,33 / 0,26	8,31 / 0,45	9,00 / 1,26	8,53 / 0,35
20	5	8,22 / 0,63	9,19 / 0,50	9,04 / 0,82	9,53 / 1,39	9,03 / 0,66
25	4	9,78 / 0,52	10,18 / 0,87	10,10 / 0,95	8,73 / 0,30	8,93 / 0,54

Figura 2.29 – Gráficos de desempenho do GA em paralelo de alinhamentos para operação de HPT entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora

Tabela 2.5 – Custos totais de alinhamentos para operação de *HST* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão)·10⁹ R\$]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	8,51 / 0,85	8,88 / 0,76	8,63 / 0,55	8,50 / 1,12	8,69 / 0,73
10	9	9,01 / 1,04	9,75 / 1,30	8,80 / 0,18	9,92 / 0,74	9,75 / 1,25
15	6	10,20 / 1,54	10,61 / 1,01	10,06 / 1,53	10,46 / 0,75	9,84 / 0,94
20	5	10,70 / 1,64	10,49 / 1,94	10,51 / 1,81	11,30 / 1,59	9,42 / 0,52
25	4	10,02 / 1,27	10,51 / 0,94	11,33 / 0,96	11,41 / 1,17	12,05 / 1,18

Tabela 2.6 – Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de *HST* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão) minutos]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	180 / 101	85 / 42	71 / 46	44 / 30	52 / 22
10	9	144 / 88	39 / 18	30 / 13	21 / 10	34 / 16
15	6	75 / 20	39 / 39	28 / 16	20 / 15	29 / 25
20	5	107 / 56	40 / 17	17 / 5	17 / 9	23 / 7
25	4	132 / 39	32 / 5	18 / 9	16 / 2	15 / 4

Tabela 2.7 – Comprimentos dos alinhamentos para operação de *HST* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão) km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	113,0 / 3,6	116,9 / 4,3	111,7 / 8,4	107,9 / 2,3	111,3 / 6,9
10	9	113,9 / 6,3	115,7 / 6,0	110,4 / 3,0	113,5 / 2,3	114,7 / 6,9
15	6	114,0 / 6,2	110,5 / 5,1	113,6 / 6,7	110,4 / 8,3	112,8 / 7,5
20	5	117,4 / 10,4	114,6 / 6,5	112,6 / 7,6	117,9 / 8,9	111,4 / 2,7
25	4	111,4 / 3,2	112,1 / 3,3	122,2 / 16,9	117,9 / 2,2	132,0 / 17,4

Tabela 2.8 – Custos médios de alinhamentos para operação de *HST* entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora [(Média / Desvio Padrão)·10⁷ R\$/km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	19	7,53 / 0,69	7,60 / 0,58	7,76 / 0,86	7,87 / 1,02	7,80 / 0,41
10	9	7,89 / 0,51	8,40 / 0,75	7,97 / 0,33	8,74 / 0,62	8,51 / 1,10
15	6	8,93 / 1,14	9,62 / 0,97	8,84 / 1,08	9,51 / 0,87	8,71 / 0,37
20	5	9,08 / 0,78	9,11 / 1,33	9,28 / 1,01	9,56 / 0,76	8,46 / 0,48
25	4	8,99 / 1,05	9,38 / 0,89	9,37 / 1,08	9,67 / 0,91	9,18 / 0,46

Figura 2.30 – Gráficos de desempenho do GA em paralelo de alinhamentos para operação de HST entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora

Como pode se observado desses resultados, os custos totais não mudam significativamente com a variação do número de *VMs*, mas aumentam proporcionalmente com a distância média entre PIs, tanto nos traçados para *HPTs* quanto para *HSTs*. Entretanto, é importante salientar que os custos variam praticamente no mesmo intervalo para ambas as tecnologias, com custo médio mínimo de R\$ $8,20 \cdot 10^9$ (desvio padrão de R\$ $1,12 \cdot 10^9$) para *HPTs* nas replicações com distância média entre PIs de 5 km (ou 19 PIs) e 50 *VMs* disponíveis para processamento, e de R\$ $8,50 \cdot 10^9$ (desvio padrão de R\$ $1,12 \cdot 10^9$) para os *HSTs* nas replicações com distância média entre PIs de 5 km (ou 19 PIs) e 25 *VMs* disponíveis para processamento.

No caso dos tempos de processamento, não há uma tendência definida em relação à distância média entre PIs. Entretanto, um importante resultado é a variação acentuada da medida de desempenho quando o número de máquinas virtuais disponibilizadas varia, pois os tempos de processamento reduzem-se drasticamente quando cinco máquinas são utilizadas no lugar de apenas uma *VM*.

No caso de replicações com distância entre PIs igual a 5 km, o tempo médio de processamento é de 184 minutos (desvio de 70 minutos) para traçados de *HPTs* e 180 minutos (desvio de 101 minutos) para os de *HSTs*. Ainda com essa densidade de pontos de interseção, quando cinco máquinas virtuais são disponibilizadas, os tempos reduzem-se para valores médios de 36 minutos (desvio padrão de 24 minutos) e 85 minutos (desvio de 42 minutos), respectivamente em relação às tecnologias ferroviárias.

Entretanto, ao se aumentar o número de *VMs* disponíveis entre 5 e 50, observa-se que esses tempos não reduzem-se na mesma proporção, indicando que a quantidade de processadores disponíveis contribui marginalmente para a redução dos tempos até um limite mínimo.

No âmbito do comprimento médio dos alinhamentos, a distância entre PIs e o número de máquinas virtuais disponibilizadas para processamento nota-se uma variabilidade relativamente pequena entre os resultados obtidos para traçados compatíveis para operação de *HPTs* e de *HSTs*. Observa-se uma exceção para a distância de 25 km entre PIs para *HSTs*, com valor médio de 132,0 km (desvio de 17,4 km) para as replicações com 50 *VMs*, em comparação com um comprimento médio mínimo de 107,9 km (desvio padrão de 2,3 km) para as replicações com 25 *VMs* e distância de 5 km entre PIs.

Uma vez que o comprimento médio dos alinhamentos não varia expressivamente e os custos totais aumentam quando a distância média entre PIs aumenta, é de se esperar que o custo médio por quilômetro varie nessa mesma tendência como observado no gráfico inferior direito da Figura 2.29 e da Figura 2.30. Para *HPTs*, o valor médio mínimo do custo é de R\$ $7,07 \cdot 10^7/\text{km}$ (desvio padrão de R\$ $0,57 \cdot 10^7/\text{km}$) para as replicações de distância média entre PIs de 5 km com 50 *VMs* disponíveis, e para *HSTs* esse valor mínimo é de R\$ $7,53 \cdot 10^7/\text{km}$ (desvio padrão de R\$ $0,69 \cdot 10^7/\text{km}$) para as replicações de distância média entre PIs de 5 km com apenas uma máquina virtual para processamento.

Portanto, para o caso específico do custo médio por quilômetro na construção de novos alinhamentos na área rural entre a cidade de Rio de Janeiro e Juiz de Fora, os valores monetários podem ser considerados praticamente equivalentes em relação à tecnologia ferroviária. Isso pode ser justificado pela particular topografia da região como representado nas ilustrações da Figura 2.36 e Figura 2.37. Naquelas figuras, os traçados de menor custo total obtidos nas replicações são muito semelhantes do ponto de vista da projeção horizontal e da implantação de túneis e viadutos.

Nas análises subsequentes de desempenho do *GA*, foram executadas replicações para obtenção de novos traçados ferroviários em um segundo cenário entre as cidades de Campinas e Poços de Caldas, cujo perfil topográfico e de ocupação do solo distingue-se do cenário anterior. Os valores de custos totais, tempo de processamento, comprimento e custo médio de traçados na área rural entre essas cidades são indicados entre a Tabela 2.9 e a Tabela 2.16 e resumidos na Figura 2.31 e Figura 2.32, respectivamente para os traçados para operação de *HPTs* e *HSTs*.

Tabela 2.9 – Custos totais de alinhamentos para operação de *HPT* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão)·10⁹ R\$]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	7,59 / 0,78	7,91 / 2,4	7,22 / 0,67	7,72 / 1,23	8,33 / 2,43
10	12	10,37 / 2,41	10,44 / 3,8	9,33 / 2	9,39 / 1,11	10,41 / 1,36
15	8	11,09 / 1,4	10,27 / 0,64	11,66 / 1,94	11,23 / 2	11,58 / 1,67
20	6	12,65 / 1,91	11,55 / 1,39	12,75 / 2,13	11,1 / 2,41	11,01 / 1,01
25	5	13,4 / 1,31	13,95 / 2,68	14,25 / 2,75	13,37 / 1,93	12,87 / 1,98

Tabela 2.10 – Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de *HPT* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão) minutos]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	110 / 90	55 / 40	67 / 21	81 / 16	72 / 48
10	12	113 / 49	43 / 25	29 / 13	36 / 26	24 / 8
15	8	93 / 51	32 / 17	24 / 8	26 / 14	31 / 18
20	6	74 / 16	48 / 27	22 / 8	22 / 8	21 / 14
25	5	157 / 50	28 / 14	35 / 15	21 / 7	17 / 6

Tabela 2.11 – Comprimentos dos alinhamentos para operação de *HPT* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão) km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	140,2 / 4,7	158,0 / 28,4	141,3 / 8,4	150,7 / 12,3	151,3 / 13,0
10	12	160,3 / 13,1	164,8 / 27,0	147,7 / 11,9	155,5 / 22,8	151 / 10,7
15	8	151,9 / 7,6	150,7 / 10,6	162,0 / 22,6	153,7 / 12,1	167,4 / 17
20	6	156,4 / 16,7	150,0 / 13,7	164,6 / 22,2	159,1 / 22,1	150,7 / 8,8
25	5	157,1 / 14,1	176,1 / 19,0	171,8 / 18,8	160,3 / 22,5	162,9 / 14,6

Tabela 2.12 – Custos médios de alinhamentos para operação de *HPT* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão)·10⁷ R\$/km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	5,41 / 0,51	4,94 / 0,71	5,12 / 0,50	5,10 / 0,44	5,45 / 1,19
10	12	6,42 / 0,98	6,20 / 1,26	6,35 / 1,51	6,11 / 0,84	6,89 / 0,71
15	8	7,29 / 0,82	6,84 / 0,65	7,27 / 1,22	7,27 / 0,86	6,94 / 1,00
20	6	8,07 / 0,56	7,69 / 0,40	7,75 / 0,76	7,01 / 1,36	7,33 / 0,84
25	5	8,59 / 1,13	7,88 / 0,81	8,22 / 0,86	8,35 / 0,58	7,89 / 0,93

Figura 2.31 – Gráficos de desempenho do GA em paralelo de alinhamentos para operação de HPT entre Campinas e Poços de Caldas

Tabela 2.13 – Custos totais de alinhamentos para operação de *HST* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão)·10⁹ R\$]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	8,16 / 1,61	7,78 / 0,75	8,21 / 1,60	8,54 / 1,14	7,98 / 1,60
10	12	10,53 / 2,07	9,54 / 1,03	10,52 / 0,97	9,83 / 1,54	10,31 / 2,10
15	8	10,51 / 0,88	10,92 / 1,36	11,30 / 1,62	11,13 / 2,51	11,62 / 1,95
20	6	12,09 / 1,20	12,64 / 1,94	11,37 / 1,16	11,38 / 2,08	11,97 / 1,41
25	5	12,13 / 2,35	12,05 / 1,36	12,54 / 2,37	13,00 / 2,60	14,99 / 1,24

Tabela 2.14 – Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de *HST* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão) minutos]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	193 / 83	57 / 35	44 / 11	54 / 11	63 / 46
10	12	109 / 54	41 / 25	35 / 16	41 / 20	36 / 12
15	8	111 / 40	46 / 21	33 / 17	30 / 12	27 / 17
20	6	112 / 27	41 / 33	21 / 14	19 / 11	22 / 12
25	5	107 / 44	50 / 31	17 / 9	17 / 12	21 / 4

Tabela 2.15 – Comprimentos dos alinhamentos para operação de *HST* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão) km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	147,8 / 8,5	149,0 / 11,1	150,3 / 10,0	153,3 / 8,9	148,2 / 7,3
10	12	158,2 / 23,1	151,0 / 6,6	150,0 / 4,6	147,7 / 7,7	151,9 / 5,7
15	8	143,9 / 8,7	155,9 / 17,8	160,3 / 13,8	151,7 / 13,7	162,6 / 22,3
20	6	161,9 / 12,1	156,4 / 21,8	152,8 / 17,8	167,6 / 21,3	149,1 / 10,6
25	5	154,9 / 17,6	152,5 / 3,4	163,6 / 22,6	175,2 / 22,8	158,9 / 17,1

Tabela 2.16 – Custos médios de alinhamentos para operação de *HST* entre Campinas e Poços de Caldas [(Média / Desvio Padrão)·10⁷ R\$/km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	24	5,50 / 0,92	5,24 / 0,63	5,43 / 0,76	5,58 / 0,80	5,37 / 0,90
10	12	6,62 / 0,53	6,32 / 0,68	7,02 / 0,66	6,65 / 0,89	6,79 / 1,37
15	8	7,35 / 1,03	7,01 / 0,25	7,06 / 0,91	7,31 / 1,30	7,14 / 0,52
20	6	7,49 / 0,89	8,08 / 0,60	7,47 / 0,66	6,77 / 0,67	8,03 / 0,77
25	5	7,82 / 1,09	7,92 / 1,03	7,66 / 0,78	7,40 / 1,06	9,51 / 0,99

Figura 2.32 – Gráficos de desempenho do GA em paralelo de alinhamentos para operação de HST entre Campinas e Poços de Caldas

As tendências observadas para obtenção dos traçados entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora são semelhantes às identificadas para os alinhamentos que viabilizam a operação de *HPTs* e *HSTs* entre Campinas e Poços de Caldas, apesar da diferença em termos da magnitude dos valores obtidos. Para os traçados entre Campinas e Poços de Caldas observa-se uma menor dispersão dos valores médios de custos totais, o que pode ser justificado pela maior uniformidade da topografia dessa região como indicado na Figura 2.31 e Figura 2.32.

Os tempos de processamento também reduzem-se consideravelmente quando o número de *VMs* varia de uma para cinco, sem redução acentuada até 50 máquinas virtuais. Nesse cenário, os comprimentos médios aumentam gradualmente quando a distância média entre PIs aumenta, com valor médio mínimo de 140,2 km (desvio padrão de 4,7 km) para as replicações com distância de 5 km entre PIs e uma máquina virtual, e máximo médio de 176,1 km (desvio padrão 19,0 km) nas replicações com distância de 25 km entre PIs e 5 *VMs* disponíveis para obtenção de traçados de *HPT*.

Para *HSTs* o valor médio mínimo dos comprimentos é de 143,9 km (desvio padrão de 8,7 km) para as replicações com distância média de 15 km entre PIs e uma *VMs* disponível, e o valor máximo médio é de 175,2 km (desvio padrão de 22,8 km) nas replicações com distância média de 25 km entre PIs e 25 máquinas virtuais disponíveis para processamento.

Em relação ao custo por quilômetro, no caso de novos alinhamentos para operação de *HPTs* entre Campinas e Poços de Caldas, o valor médio mínimo é de R\$ $4,96 \cdot 10^7$ /km (desvio padrão de R\$ $0,71 \cdot 10^7$ /km) para replicações com 24 PIs e 5 *VMs*, com aumento proporcional à distância média entre PIs.

No caso dos *HSTs* o valor médio mínimo é de R\$ $5,24 \cdot 10^7$ /km (desvio padrão de R\$ $0,63 \cdot 10^7$ /km) também para as replicações com 24 PIs e 5 *VMs*. Novamente, esses valores médios não variam significativamente em relação à tecnologia ferroviária, porém observa-se uma redução dos custos médios entre Campinas e Poços de Caldas em relação ao cenário anterior.

O último cenário analisado foi entre as cidades de Ribeirão Preto e Araraquara (interior de São Paulo), cujos valores das replicações são apresentados entre a Tabela 2.17 e a Tabela 2.24 e nos gráficos da Figura 2.33 e Figura 2.34 para operação de *HPTs* e *HSTs* respectivamente.

Tabela 2.17 – Custos totais de alinhamentos para operação de *HPT* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão)·10⁹ R\$]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	2,49 / 0,48	2,43 / 0,36	2,75 / 1,36	2,42 / 0,58	2,28 / 0,91
10	7	3,76 / 0,94	3,60 / 0,86	3,16 / 0,49	3,6 / 1,08	3,19 / 1,21
15	5	3,54 / 0,38	3,61 / 0,36	3,35 / 0,61	3,91 / 1,68	3,65 / 0,68
20	4	5,36 / 1,87	4,52 / 1,19	4,72 / 1,04	4,25 / 1,03	4,31 / 0,73
25	3	5,42 / 0,59	5,09 / 0,81	4,90 / 0,76	4,39 / 0,37	4,28 / 0,65

Tabela 2.18 – Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de *HPT* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão) minutos]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	142 / 108	44 / 18	30 / 14	24 / 13	42 / 9
10	7	110 / 69	20 / 8	28 / 4	17 / 5	19 / 9
15	5	137 / 48	33 / 12	20 / 13	15 / 4	18 / 5
20	4	149 / 68	25 / 12	18 / 5	17 / 5	14 / 8
25	3	95 / 52	27 / 2	10 / 2	11 / 2	14 / 3

Tabela 2.19 – Comprimentos dos alinhamentos para operação de *HPT* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão) km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	95,6 / 11,6	100,0 / 10,2	101,7 / 13,3	98,0 / 14,9	106,8 / 21,9
10	7	104,4 / 16,8	99,9 / 11,1	104,4 / 10,7	113,9 / 30,4	95,9 / 6,9
15	5	99,9 / 5,5	102,4 / 15,5	96,8 / 7,1	100,4 / 16,5	101,8 / 8,1
20	4	107,6 / 25,5	113,4 / 24,7	105,7 / 11,5	98,8 / 8,6	100,5 / 8,2
25	3	100,7 / 5,6	120,1 / 19,4	103,0 / 8,8	104,2 / 12,9	101,5 / 14,6

Tabela 2.20 – Custos médios de alinhamentos para operação de *HPT* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão)·10⁷ R\$/km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	2,60 / 0,38	2,43 / 0,33	2,61 / 1,01	2,51 / 0,73	2,11 / 0,67
10	7	3,68 / 1,13	3,57 / 0,45	3,01 / 0,17	3,22 / 0,94	3,30 / 1,05
15	5	3,54 / 0,28	3,56 / 0,40	3,46 / 0,53	3,79 / 1,02	3,62 / 0,82
20	4	4,95 / 1,13	3,99 / 0,76	4,44 / 0,61	4,27 / 0,78	4,33 / 0,95
25	3	5,39 / 0,60	4,29 / 0,73	4,73 / 0,37	4,23 / 0,17	4,30 / 0,91

Figura 2.33 – Gráficos de desempenho do GA em paralelo de alinhamentos para operação de HPT entre Ribeirão Preto e Araraquara

Tabela 2.21 – Custos totais de alinhamentos para operação de *HST* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão)·10⁹ R\$]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	2,38 / 0,31	2,39 / 0,96	2,40 / 0,52	2,59 / 0,41	2,96 / 1,34
10	7	4,03 / 1,12	3,62 / 1,21	3,43 / 1,00	3,44 / 0,72	3,96 / 0,95
15	5	4,86 / 0,69	4,22 / 0,81	4,09 / 0,60	4,59 / 1,80	3,68 / 0,75
20	4	4,26 / 0,68	4,56 / 0,99	4,73 / 0,51	5,38 / 1,13	4,53 / 0,44
25	3	5,48 / 0,60	5,49 / 0,34	5,36 / 1,55	5,24 / 0,58	5,54 / 0,72

Tabela 2.22 – Tempo de processamento para obtenção das soluções de alinhamentos para operação de *HST* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão) minutos]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	162 / 57	50 / 19	29 / 17	29 / 7	26 / 7
10	7	101 / 38	28 / 8	23 / 5	23 / 5	30 / 21
15	5	85 / 37	20 / 12	18 / 10	14 / 7	18 / 10
20	4	68 / 41	19 / 5	17 / 11	10 / 4	13 / 4
25	3	66 / 13	14 / 6	24 / 3	21 / 8	15 / 4

Tabela 2.23 – Comprimentos dos alinhamentos para operação de *HST* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão) km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	93,4 / 8,2	94,0 / 7,6	90,3 / 4,8	96,1 / 3,6	96,3 / 9,7
10	7	101,9 / 11,2	100,0 / 15,6	93,1 / 9,6	100,9 / 9,9	103,4 / 14,4
15	5	104,3 / 10,1	97,1 / 4,9	109,5 / 22,2	97,2 / 11,9	92,4 / 2,9
20	4	101,9 / 13,5	97,3 / 8,5	103,2 / 11,6	105,2 / 22,1	100,5 / 9,2
25	3	107,6 / 7,8	113,4 / 11,7	107,4 / 18,4	109,6 / 11,2	107,4 / 18,6

Tabela 2.24 – Custos médios de alinhamentos para operação de *HST* entre Ribeirão Preto e Araraquara [(Média / Desvio Padrão)·10⁷ R\$/km]

Distância média entre PIs (km)	Número de PIs	Número de Máquinas Virtuais Disponíveis				
		1	5	10	25	50
5	14	2,57 / 0,47	2,52 / 0,87	2,66 / 0,54	2,69 / 0,34	3,00 / 1,04
10	7	3,98 / 1,11	3,55 / 0,65	3,64 / 0,79	3,43 / 0,79	3,82 / 0,62
15	5	4,68 / 0,72	4,34 / 0,77	3,77 / 0,34	4,62 / 1,17	3,97 / 0,79
20	4	4,24 / 0,92	4,69 / 0,99	4,63 / 0,74	5,19 / 1,09	4,53 / 0,50
25	3	5,10 / 0,49	4,87 / 0,37	5,05 / 1,53	4,82 / 0,62	5,21 / 0,48

Figura 2.34 – Gráficos de desempenho do GA em paralelo de alinhamentos para operação de *HST* entre Ribeirão Preto e Araraquara

Os resultados referentes às possíveis conexões entre Araraquara e Ribeirão Preto indicam as mesmas tendências em relação aos cenários analisados anteriormente. Apesar dos custos médios aumentarem proporcionalmente com a distância média entre PIs, observa-se uma menor variabilidade desses resultados para ambas as tecnologias entre Campinas e Poços de Caldas em relação às análises do cenário anterior.

Os tempos de processamento são reduzidos consideravelmente quando o número de máquinas virtuais disponíveis para o processamento do *GA* aumenta de 1 para 5, e esses valores reduzem-se menos acentuadamente quando o número de *VMs* aumenta até 50. Para os traçados de *HPTs*, esse valor médio mínimo é de 95 minutos (desvio padrão de 52 minutos) para as replicações com 1 *VM* e 14 PIs, em detrimento de média mínima de 20 minutos (desvio padrão de 8 minutos) com 5 *VMs* e distância média entre PIs de 10 km.

Para os traçados de *HSTs*, o tempo médio mínimo de processamento com uma máquina virtual é de 66 minutos (desvio padrão de 13 minutos) nas replicações com distância média entre PIs de 25 km. Nesse mesmo cenário com 5 *VMs* disponíveis, o tempo médio médio de processamento é de 14 minutos com desvio padrão de 6 minutos.

Em relação ao comprimento dos alinhamentos observa-se pouca variabilidade para os traçados de *HPT*, com comprimento médio mínimo de 95,6 km (desvio padrão de 11,6 km) para as replicações com uma máquina virtual e distância média entre PIs de 5 km, e comprimento máximo médio de 120,1 km (desvio padrão de 19,4 km) para as replicações com cinco *VMs* e distância média de 25 km entre PIs.

Para os traçados compatíveis com os *HSTs* há uma tendência de aumento do comprimento do alinhamento com o maior distanciamento entre PIs. Quando esse valor é de 5 km e o número de máquinas virtuais é igual a dez, o comprimento médio mínimo é de 90,3 km com desvio padrão de 4,8 km e, por outro lado, o comprimento máximo médio é de 113,4 km (desvio padrão de 11,7 km) nas replicações com distância média entre PIs de 25 km e cinco máquinas virtuais.

Em relação aos custos por quilômetro de ferrovia construída, observa-se um valor médio mínimo de R\$ $2,11 \cdot 10^7$ /km (desvio padrão de R\$ $0,67 \cdot 10^7$ /km) para traçados que viabilizam a operação de *HPTs* nas replicações com 50 *VMs* disponíveis e distância média de 5 km entre

PIs, valor expressivamente menor que os identificados nos cenários anteriores.

Na mesma tendência quanto aos custos por quilômetro, os traçados para operação de *HSTs* apresentam custos médios mínimos de R\$ $2,52 \cdot 10^7$ /km (desvio padrão de R\$ $0,87 \cdot 10^7$ /km) nas replicações com distância média de 5 km. Novamente, os valores médios mínimos por quilômetro mantém-se nos mesmos patamares seja qual for a tecnologia ferroviária escolhida para operação nos traçados, seguindo a tendência dos cenários anteriores.

Os resultados tabelados anteriormente referem-se aos valores médios obtidos pelas replicações dos diferentes cenários propostos para avaliação do desempenho do *GA*. A Tabela 2.25 a seguir apresenta o resumo das medidas de desempenho das replicações que resultaram nos custos mínimos para cada tecnologia contemplada nesta tese e cenários analisados.

Tabela 2.25 – Resultados relativos aos traçados de menor custo

Cenário	Rio de Janeiro-Juiz de Fora		Campinas-Poços de Caldas		Araraquara-Ribeirão Preto	
Tecnologia	<i>HPT</i>	<i>HST</i>	<i>HPT</i>	<i>HST</i>	<i>HPT</i>	<i>HST</i>
Distância Média entre PIs (km)	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Número de PIs	19	19	24	24	14	14
Gerações <i>GA</i>	340	877	645	1081	755	648
Tempo de Processamento (minutos)	23	58	67	93	47	35
Custo total (R\$. 10^9)	7,00	7,67	6,19	6,23	1,51	1,87
Comprimento (km)	111,1	106,7	146,3	149,1	94,5	87,9
Custo por quilômetro (R\$. 10^6 /km)	62,98	71,87	42,33	41,75	15,94	21,22
Superestrutura (R\$. 10^9)	0,17 (2,7%)	0,45 (6,5%)	0,23 (4,0%)	0,63 (11,1%)	0,15 (10,7%)	0,37 (21,9%)
Terraplenagem (R\$. 10^9)	0,63 (9,9%)	0,57 (8,2%)	0,71 (12,6%)	0,68 (12,1%)	0,25 (18,2%)	0,37 (21,9%)
Túneis (R\$. 10^9)	4,12 (64,7%)	4,48 (64,3%)	2,64 (46,9%)	3,22 (57,0%)	0,51 (37,2%)	0,47 (27,6%)
Pontes e Viadutos (R\$. 10^9)	1,42 (22,3%)	1,44 (20,7%)	2,02 (36,0%)	1,10 (19,4%)	0,45 (32,8%)	0,47 (27,8%)
Desapropriações (R\$. 10^9)	0,02 (0,4%)	0,02 (0,3%)	0,03 (0,5%)	0,03 (0,5%)	0,02 (1,1%)	0,01 (0,8%)

Os resultados apresentados nessa tabela mostram que os custos totais de traçados compatíveis para operação de *HSTs* em geral são maiores que os de *HPT*, porém relativamente próximos para todos os cenários analisados. Entretanto, no cenário entre Campinas e Poços de Caldas o custo médio para construção de traçados para operação daquela tecnologia (R\$ $41,75 \cdot 10^6$ /km) é menor do que para a operação de *HPTs* (R\$ $42,33 \cdot 10^6$ /km).

Além disso, os itens mais expressivos de custos totais para ambas as tecnologias são: túneis (com máximo de 64,7% na conexão por *HPT* entre o Rio de Janeiro e Juiz de Fora); pontes e viadutos (máximo de 36,0% para *HPT* entre Campinas e Poços de Caldas); e terraplenagem (máximo de 21,9% para *HST* entre Araraquara e Ribeirão Preto).

A comparação entre os custos de construção dos traçados para operação de *HPTs* e *HSTs* indica que os parâmetros geométricos que definem esses alinhamentos não afetam os valores dos custos totais na mesma proporção que as características da topografia onde pretende-se implantar os sistemas. Isso ocorre devido à maior influência dos itens de terraplenagem e custos de obras de arte (túneis, pontes e viadutos).

Sob a premissa de que é inviável a utilização da infraestrutura ferroviária existente – cujas características geométricas são inadequadas à operação das tecnologias consideradas nesta tese –, os valores apresentados nesse capítulo podem ser, portanto, considerados realistas e válidos para aplicação de uma análise custo-benefício como apresentado nesta tese.

Além das considerações anteriores, a Figura 2.35 apresenta os valores mínimos e máximos dos custos de construção de infraestrutura ferroviária para operação de *HSTs* em diferentes países. Considerando uma cotação média de R\$ 3,10 para 1,00 € no período entre 19/01/2015 e 19/05/2014 (BCB, 2015b), o intervalo dos custos totais é definido entre os valores aproximados mínimo de R\$14,6·10⁶/km (França) e máximo de R\$204,3·10⁶/km (Itália).

Esses resultados indicam que, apesar das particularidades da topografia do território brasileiro e das premissas consideradas na execução do GA, os valores de custo médio indicados nas tabelas anteriores são, em média, da mesma ordem de grandeza daqueles observados em projetos internacionais.

Esse argumento pode ser confirmado pela análise dos valores de custo médio por quilômetro aplicados mundialmente na construção de infraestrutura para operação de Trens de Alta Velocidade conforme ilustrado na Figura 2.35. Enquanto a média mundial do custo por quilômetro de ferrovia para *HST* é da ordem de R\$78,4·10⁶/km, o valor médio obtido pelo GA para essa tecnologia nas conexões estabelecidas anteriormente (Rio de Janeiro–Juiz de Fora, Campinas–Poços de Caldas e Araraquara–Ribeirão Preto) é estimado em R\$65,9·10⁶/km, enquanto para a operação de *HPT* o valor médio de R\$63,6·10⁶/km é menor em comparação àquela tecnologia.

Figura 2.35 – Custos médios por quilômetro para construção de novos alinhamentos ferroviários de HST – Fonte: adaptado de De Rus et al. (2009)

Na comparação dos custos totais para construção de 10 linhas ferroviárias de alta velocidade na Europa, Gleave (2004) indica que os valores variam aproximadamente entre R\$31·10⁶/km (10·10⁶ €/km) na Espanha e França e entre R\$124·10⁶/km e R\$155·10⁶/km (40·10⁶ €/km e 50·10⁶ €/km) na Itália. No caso específico da travessia do Canal da Mancha no projeto *HS1* entre Londres e Paris, o custo final foi de aproximadamente R\$217·10⁶/km (70·10⁶ €/km) devido aos elevados custos de construção dos túneis.

A seguir são apresentados os traçados obtidos pela execução do GA entre as cidades de Rio de Janeiro e Juiz de Fora, Campinas e Poços de Caldas, e Araraquara e Ribeirão Preto adequados à operação de HPTs e HSTs. Para cada par de cidade e tecnologia ferroviária são representados os alinhamentos sobrepostos à projeção das vias existentes e ao *raster* de elevações do terreno, com indicação das áreas urbanas, e as respectivas seções longitudinais.

Figura 2.36 – Representação do traçado de mínimo custo para operação de HPT entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora

Figura 2.37 – Representação do traçado de mínimo custo para operação de HST entre Rio de Janeiro e Juiz de Fora

Figura 2.38 – Representação do traçado de mínimo custo para operação de HPT entre Campinas e Poços de Caldas

Figura 2.39 – Representação do traçado de mínimo custo para operação de HST entre Campinas e Poços de Caldas

Figura 2.40 – Representação do traçado de mínimo custo para operação de HPT entre Araraquara e Ribeirão Preto

Figura 2.41 – Representação do traçado de mínimo custo para operação de HST entre Araraquara e Ribeirão Preto

Estimativa de Demanda

Um dos requisitos para aplicação da formulação de análise custo-benefício para o transporte ferroviário de passageiros proposta nesta tese é a estimativa do número de viagens entre cidades da Região Sudeste do Brasil, bem como a análise da propensão à escolha dos *HPTs* ou *HSTs* para realização dessas viagens.

No âmbito do planejamento e modelagem de sistemas de transportes, a abordagem tradicional de quatro etapas caracterizada na Figura 3.1 é a mais recorrente na literatura e aplicação prática. Essa estrutura considera as informações sobre os sistemas de transportes existentes e projeções sobre as regiões (ou zonas de tráfego) em que estão inseridas quanto às características populacionais e socioeconômicas.

Na primeira etapa da abordagem (Geração) são calibrados os modelos para estimativa do número de viagens produzidas e atraídas pelas zonas de tráfego para, na segunda etapa (Distribuição), serem estabelecidos os padrões de deslocamentos entre pares de origens e destinos.

A terceira etapa (Divisão Modal) refere-se à segregação da matriz de viagens obtida anteriormente em termos dos modos de transporte utilizados para realização dos deslocamentos interzonais. Finalmente, na quarta etapa (Alocação) os fluxos identificados nas matrizes quanto a cada modo de transporte são atribuídos aos arcos que conectam as zonas de tráfego.

Figura 3.1 – Fluxograma do método de modelagem quatro etapas – Fonte: adaptado de Ortúzar e Willumsen (2011)

Conforme ilustrado na Figura 3.1, a abordagem quatro etapas é um processo iterativo em que os resultados de uma etapa afetam as subsequentes, de modo que a modelagem adequada de um item é fator preponderante para obtenção de resultados consistentes para as etapas posteriores.

Nesta tese são abordadas a distribuição e divisão modal para aplicação da análise custo-benefício. Os modelos de geração são suprimidos pois o número de viagens é estimado para cada par de cidades da Região Sudeste mediante a calibração de modelos baseados nos fluxos observados atualmente.

Ainda, a etapa de alocação também não é contemplada pois requer a existência de uma rede de transporte existente (com múltiplos modos disponíveis e as interações entre eles) e os custos vinculados aos seus arcos.

3.1 Distribuição de viagens

Segundo Ortúzar e Willumsen (2011) os modelos de distribuição tem como objetivo atribuir as viagens estimadas na etapa de geração, com vistas a identificar os padrões de deslocamentos entre origens e destinos.

Esses padrões são representados como matrizes Origem Destino (OD) quanto ao modo de

transporte, motivo da viagem ou outras características, e, em geral, são preenchidas a partir da extrapolação dos dados observados através de diferentes métodos.

Uma matriz OD possui os índices que definem as zonas de origem (i) e de destino (j) tal que as viagens (T_{ij}) entre os pares de zonas preenchem o seu interior. A somas das linhas resultam no total de viagens originadas na zona i (O_i na Equação 3.1) e a soma das colunas resultam nas viagens destinadas à zona j (D_j na Equação 3.2).

$$\sum_j T_{ij} = O_i \quad (3.1)$$

$$\sum_i T_{ij} = D_j \quad (3.2)$$

Existem diferentes métodos para preenchimento e extrapolação das matrizes OD: Fator de Crescimento, Modelo Gravitacional, Maximização da Entropia e os Modelos Econométricos. A descrição dos três primeiros métodos é realizada com base nas premissas de Ortúzar e Willumsen (2011) e a última apresenta considerações de diferentes autores.

3.1.1 Método do Fator de Crescimento

O *Growth Factor Method* permite extrapolar os valores observados em uma matriz OD para um período futuro em horizonte de planejamento sob a premissa de que os padrões de viagem observados mantêm-se constantes ao longo do tempo (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Ao considerar um fator de crescimento uniforme (*Uniform Growth Factor* - τ) para toda uma região de estudo, a expansão das viagens entre origens e destinos na matriz pode ser efetuada pela aplicação da Equação 3.3.

$$T_{ij} = \tau \cdot t_{ij} \quad (3.3)$$

onde t_{ij} é o número de viagens entre i e j no ano base de planejamento.

Por outro lado, a partir de um fator de crescimento em relação às origens ou destinos é possível expandir a matriz em relação a essas zonas de tráfego, conforme definido na Equação 3.4 e Equação 3.5 respectivamente.

$$T_{ij} = \tau_i \cdot t_{ij} \quad (3.4)$$

$$T_{ij} = \tau_j \cdot t_{ij} \quad (3.5)$$

onde τ_i e τ_j são os fatores de crescimento em relação às origens e destinos respectivamente.

Analogamente, é possível aplicar uma estratégia de expansão quando se tem conhecimento das taxas de crescimento das viagens nas origens e nos destinos simultaneamente. Nesse caso, uma das possibilidades é considerar um fator de crescimento ajustado pela média dos fatores das origens e destinos ou a Equação 3.6 proposta por Furness (1965).

$$T_{ij} = t_{ij} \cdot \tau_i \cdot \tau_j \cdot A_i \cdot B_j \quad (3.6)$$

em que A_i e B_j são denominados fatores de balanceamento quanto às características socioeconômicas da origem e destino.

O método do fator de crescimento é de fácil implementação e aplicação direta às matrizes observadas, preservando as características das informações iniciais. Entretanto, a acurácia na estimativa da matriz inicial influencia fortemente a qualidade das projeções.

A partir disso, a matriz OD é expandida para períodos futuros mediante um procedimento iterativo para equilibrar as projeções das linhas e colunas resultantes da expansão das viagens totais, em um procedimento comumente denominado como "Método de Fratar".

3.1.2 Modelo Gravitacional

Esta estratégia de modelagem é uma analogia à lei gravitacional de Newton e também conhecida como modelo sintético de distribuição de viagens. Essa abordagem considera que as viagens entre uma origem e um destino são proporcionais às respectivas populações e inversamente proporcionais à distância entre elas, tal como a Equação 3.7.

$$T_{ij} = \alpha_1 \cdot \frac{P_i^{\alpha_2} \cdot P_j^{\alpha_3}}{d^{\alpha_4}} \quad (3.7)$$

em que P_i é a população da cidade de origem, P_j é a cidade de destino, d é a distância entre elas e α_k ($k = 1, 2, 3$) são coeficientes estimados segundo as viagens observadas.

O desenvolvimento das técnicas de modelagem substituiu as parcelas de população pelo número total de viagens na origem e destino e uma função de impedância, geralmente definida como um custo generalizado $f(c_{ij})$ em função do valor monetário e de tempo da viagem, conforme caracterizado na Equação 3.8.

$$T_{ij} = \psi \cdot O_i \cdot D_j \cdot f(c_{ij}) \quad (3.8)$$

As versões recorrentes da função de impedância são a exponencial $f(c_{ij}) = e^{-\beta \cdot c_{ij}}$, a potência $f(c_{ij}) = c_{ij}^{-n}$ e a combinada $f(c_{ij}) = c_{ij}^n \cdot e^{-\beta \cdot c_{ij}}$. Uma alternativa a essa função considera valores empíricos baseados no custo generalizado das viagens agrupado em classes como definido na Equação 3.9.

$$f(c_{ij}) = \sum_m F^m \cdot \delta_{ij}^m \quad (3.9)$$

em que F^m é o valor médio da classe m e δ_{ij}^m é igual a 1 se o custo generalizado de uma viagem está no intervalo da classe m , e 0 caso contrário.

3.1.3 Maximização da Entropia

Este método consiste na definição de diferentes estados que caracterizam os padrões de viagens modelados na etapa de distribuição (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Um micro estado caracteriza esses padrões detalhadamente, pela especificação de cada viagem em termos da origem, destino, motivo e modo de transporte.

Por outro lado, um meso estado é um nível mais agregado de especificação formado por vários diferentes micro estados, por exemplo, pelo grupo de indivíduos que realizam viagens pelo mesmo modo de transporte. Finalmente, um macro estado apresenta maior agregação, por exemplo, pela estimativa do número total de viagens em um arco de uma rede de transporte. Em geral, as estimativas no planejamento de transportes restringem-se a níveis mais agregados de informação dadas as incertezas em relação àqueles mais desagregados.

No método de maximização da entropia busca-se identificar os micro estados que apresentam maior probabilidade de ocorrência dadas as restrições dos meso estados (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Segundo Wilson (1970), no contexto da distribuição de viagens, o número de possibilidades de ocorrências do micro estado $W(T_{ij})$ associado ao meso estado T_{ij} é dado por:

$$W(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_{ij} T_{ij}!} \quad (3.10)$$

Assumindo a mesma probabilidade de ocorrência para todos os micro estados, o meso estado mais provável é aquele que maximiza o número de ocorrências daqueles mais desagregados. Assim, a maximização da Equação 3.10 pela sua diferenciação em relação à T_{ij} na forma linear (aplicando-se o operador *logaritmo*) resulta na função de entropia da Equação 3.11.

$$\log W'(T_{ij}) = - \sum_{ij} (T_{ij} \cdot \log T_{ij} - T_{ij}) \quad (3.11)$$

A maximização dessa função (sob as restrições da Equação 3.1 e Equação 3.2, além da condição $T_{ij} \geq 0$) permite a obtenção dos valores de T_{ij} que representam a matriz OD de viagens mais provável. O desenvolvimento algébrico dessa função entropia e sua maximização pode ser verificado em Ortúzar e Willumsen (2011) (página 185) e outras abordagens para estimação de matrizes OD na etapa de distribuição de viagens (Abordagem *Tri-proportional*, Técnicas de Matrizes Parciais, Modelo de Oportunidades Intervenientes e Abordagens Desagregadas) também podem ser consultadas naquela referência.

Apesar do desenvolvimento desses modelos, existem algumas considerações práticas acerca da sua aplicação no contexto do planejamento de transportes. Por exemplo, a ocorrência de matrizes esparsas (*i.e.* muitas células com valor igual a zero) podem resultar em erros de estimativa pelos métodos tradicionais como no "Método de Fratar".

3.1.4 Modelos Econométricos de Regressão Linear

Dado que o objetivo desta tese não é explorar os métodos de estimativa de distribuição de viagens e contribuir para avanços relativos ao tema, optou-se pela generalização do modelo gravitacional caracterizado pela Equação 3.7 para estimativa do número de viagens por modo de transporte. Para isso, utiliza-se uma abordagem econométrica para estimativa dos prováveis números de viagens entre cidades da Região Sudeste.

Os modelos econométricos consideram a aplicação de métodos estatísticos de estimação envolvendo variáveis socioeconômicas. Esses modelos estão associados à definição de relações entre variáveis econômicas e sociais e permitem identificar a capacidade explanatória da va-

riável dependente em relação às independentes e verificação dos resíduos que representam as parcelas do fenômeno não explicadas pelo modelo (TINTNER, 1965; THEIL, 1971).

Nesse contexto, a regressão linear simples e múltipla colaboram para a definição de padrões de comportamento de uma variável dependente mediante, respectivamente, uma ou várias variáveis independentes cujos valores são observáveis.

O padrão de viagens entre cidades pode ser expresso por equações de diferente natureza como exponencial ou multiplicativa. No caso do modelo gravitacional, a Equação 3.7 de distribuição de viagens da matriz OD pode ser expressa na forma linear pela aplicação de um operador de *logaritmo neperiano* para estimativa dos coeficientes α'_k ($k = 1,2,3$) conforme a Equação 3.12.

$$\ln(T_{ij}) = \alpha'_1 + \alpha'_2 \cdot \ln(P_i) + \alpha'_3 \cdot \ln(P_j) + \alpha'_4 \cdot \ln(d) \quad (3.12)$$

No contexto da modelagem econométrica, a Equação 3.12 pode ser reescrita com variáveis independentes relacionadas aos aspectos econômicos e sociais da origem i e destino j , para redução dos erros das estimativas em relação aos valores observados da variável T_{ij} .

3.1.5 Estimativa de Viagens no Ano Base

Nas próximas seções são descritos os procedimentos de análise dos dados observados e de estimação dos parâmetros dos modelos econométricos para cálculo do número de viagens pelo modos Ônibus, Automóvel e Avião. Em seguida, descreve-se a expansão das viagens estimadas para os períodos futuros do horizonte de planejamento no qual se pretende avaliar a operação de serviços ferroviários de passageiros na Região Sudeste do Brasil.

Para estimativa do número de viagens no ano base do horizonte de planejamento pelos modos de transporte cujas infraestruturas estão disponíveis atualmente (Ônibus, Automóvel e Avião) foram selecionadas as cidades de médio e grande porte, incluindo as regiões metropolitanas do Brasil, que correspondem àquelas com população entre 50 mil e 500 mil habitantes e com mais de 500 mil habitantes, respectivamente, segundo classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) .

Para cada modo de transporte foram obtidas informações do número de passageiros transportados a partir de bancos de dados das agências reguladoras do setor de transporte no país

e de projetos de planejamento nos casos em que essas informações não estavam disponíveis diretamente para consulta.

Apesar das variações temporais do número de viagens observadas entre pares de origens e destinos, os parâmetros estimados para os modelos de distribuição de viagem mantêm-se constantes ao longo do horizonte de planejamento da análise socioeconômica. Entretanto, esses coeficientes podem ser atualizados à medida que as viagens são computadas nos anos desse horizonte a fim de identificar eventuais tendências não identificadas nesta pesquisa.

3.1.5.1 Modo Ônibus

Como um dos meios de transporte de maior uso no Brasil para realização de viagens intermunicipais de longa distância, o modo Ônibus têm atraído a atenção para a definição de modelos de estimativa do números de passageiros transportados em diferentes contextos.

Uma das primeiras propostas de modelagem do número de viagens interestaduais é apresentada por Gomes (1973) *apud* Aguiar Júnior (2004) pela estimativa dos parâmetros de um modelo gravitacional baseado na Equação 3.12. Com base em dados históricos sobre o número de passageiros transportados em viagens interestaduais, o modelo tem sido submetido a correções periódicas em relação aos parâmetros estimados naquela equação.

O Consórcio STE-ENEFER (STE-ENEFER, 2001 *apud* AGUIAR JÚNIOR, 2004) propôs valores atualizados para os coeficientes de um modelo gravitacional que contempla variáveis complementares à abordagem tradicional. Além da população e distância entre as origens e destinos, são consideradas variáveis de atratividade entre cidades (a) e um fator de regionalidade (r), de modo que a Equação 3.12 é reescrita pela Equação 3.13.

$$\ln(T_{ij}) = \alpha'_2 \cdot \ln(P_i) + \alpha'_3 \cdot \ln(P_j) + \alpha'_4 \cdot \ln(d) + \alpha'_5 \cdot \ln(a) + \alpha'_6 \cdot \ln(r) \quad (3.13)$$

A atratividade a é definida por um valor binário (0 ou 1) tal que o valor unitário é assumido quando um dos municípios é sede de região metropolitana e a menos de 2.000 km de outro município, quando um deles é cidade turística a menos de 1.000 km do outro, quando são centros metropolitanos ou capitais estaduais, ou quando as ligações são especificamente Rio de Janeiro-Juiz de Fora ou Ribeirão Preto-Uberlândia.

O estudo considera coeficientes binários apresentados na Tabela 3.1 para caracterizar um fator de regionalidade (r) segundo as regiões em que estão localizados os municípios de origem e destino das conexões rodoviárias interestaduais.

Tabela 3.1 – Fatores de regionalidade para o modelo gravitacional do modo Ônibus (STE-ENEFER, 2001 *apud* AGUIAR JÚNIOR, 2004)

Origem/Destino	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
Norte	1	1	0	0	1
Nordeste	1	0	1	0	0
Sudeste	0	1	1	0	1
Sul	0	0	0	1	1
Centro-Oeste	1	0	1	1	1

Após análise desse modelo, Aguiar Júnior (2004) propõe o treinamento de uma rede neural artificial para aumento do número de acertos na estimativa das viagens interestaduais no Brasil em relação aos modelos tradicionais. Na pesquisa, o autor aumenta a acurácia da previsão do número de viagens em relação ao modelo gravitacional do Consórcio STE-ENEFER (STE-ENEFER, 2001 *apud* AGUIAR JÚNIOR, 2004), propondo uma topologia de rede neural com base na população urbana e rural dos municípios, frota de automóveis, Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), renda *per capita* e distâncias rodoviárias.

Mais recentemente, Gonçalves, Bez e Novaes (2007) propuseram uma atualização do modelo gravitacional similar ao do Consórcio STE-ENEFER (STE-ENEFER, 2001 *apud* AGUIAR JÚNIOR, 2004) para estimativa da demanda por transporte de passageiros interestaduais por Ônibus, considerando variáveis de número de habitantes dos municípios, renda, número de viagens *per capita* por ano, número de habitantes não naturais dos estados dos municípios de origem e destino, distância rodoviária e características de polo turístico dos municípios.

Os autores apresentam uma estratégia de tratamento do banco de dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e estimativa dos coeficientes de modelos econométricos com base em regressões lineares, bem como testes de robustez das estimativas.

Apesar dos estudos realizados no contexto da estimativa do número de viagens pelo modo Ônibus, nesta tese optou-se pela calibração de modelos gravitacionais específicos em relação ao referido modo de transporte. Foram utilizados dados obtidos pela ANTT em uma pesquisa

realizada no contexto federal (ANTT, 2011). Para estimar os dados de demanda, a agência realizou o levantamento do número de viagens (intermunicipais e interestaduais) entre municípios para elaboração do modelo de concessão de linhas de transporte coletivo no país.

A pesquisa para os serviços de longa distância (com extensão superior a 75 km) foi realizada em âmbito nacional entre Dezembro de 2009 e Abril de 2010 em rodoviárias de 179 cidades. Foram pesquisadas 2.289 linhas nos terminais rodoviários e 1.425 linhas com pesquisador embarcado, com amostragem de 170 mil viagens e mais de 688 mil passageiros entrevistados.

Após análise desse banco de dados foram excluídas as linhas cujo volume é inferior a 45 viagens por semana, conforme executado por Aguiar Júnior (2004) na etapa de análise de verificação do banco de dados do seu procedimento de modelagem de redes neurais.

Um problema da base de dados disponibilizada pela ANTT é a discriminação do número de viagens somente entre pares OD, sem a caracterização dessas observações quanto ao sentido do deslocamento. Assim, como alternativa ao modelo gravitacional, propõe-se a Equação 3.14 para estimativa do número de viagens pelo modo Ônibus contemplando parâmetros socioeconômicos e de características das viagens.

$$\begin{aligned} \ln(T_{ij}) = & \alpha + \alpha_{POP} \cdot \ln(POP_i \cdot POP_j) + \alpha_{OCUP} \cdot \ln(OCUP_i \cdot OCUP_j) \\ & + \alpha_d \cdot \ln(d) + \alpha_{RENDA} \cdot \ln(RENDA_i \cdot RENDA_j) \\ & + \alpha_{AUTO} \cdot \ln(AUTO_i \cdot AUTO_j) \end{aligned} \quad (3.14)$$

onde $OCUP_i$ = população ocupada do município i ; $OCUP_j$ = população ocupada do município j ; $RENDA_i$ = renda média *per capita* do município i ; $RENDA_j$ = renda média *per capita* do município j ; $AUTO_i$ = frota de automóveis do município i ; $AUTO_j$ = frota de automóveis do município j .

A multiplicação dos valores das variáveis nessa equação permite estimar o número de viagens com base no banco de dados da ANTT sem o efeito da ordem de origem e destino da linha. Para calibração do modelo gravitacional optou-se por considerar apenas as ligações entre cidades da Região Sudeste do Brasil e pela segregação dos dados em três grupos.

O Grupo A contempla linhas rodoviárias entre capitais dos Estados: São Paulo (SP), Rio de Janeiro (RJ), Belo Horizonte (BH) e Vitória (ES). O Grupo B é composto das linhas interestaduais (excluindo-se as conexões entre capitais) e o Grupo C contempla as linhas intermunicipais entre cidades do mesmo Estado.

Para os três grupos foram estimados modelos com e sem o intercepto α da Equação 3.14. No caso dos grupos B e C os dados também foram segregados nas linhas em que nenhuma das cidades é capital (SEM CAPITAL) e naquelas em que pelo menos uma das cidades é uma capital estadual (COM CAPITAL). Em outro cenário, as estimativas dos coeficientes foram efetuadas com os dados generalizados por grupo (GERAL). Após a aplicação de uma regressão linear pelo método *Stepwise* para o Grupo A foram obtidos os resultados resumidos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Ônibus em viagens entre capitais (Grupo A)

SEM INTERCEPTO				COM INTERCEPTO			
R^2	0,999			R^2	0,983		
R^2 Ajustado	0,999			R^2 Ajustado	0,971		
Subestimados	83,3%			Subestimados	50,0%		
Superestimados	16,7%			Superestimados	50,0%		
Coeficiente	Valor	t -test	p -value	Coeficiente	Valor	t -test	p -value
α	-	-	-	α	17,036	3,693	0,034
α_{POP}	0,430	80,436	0,000	α_{POP}	0,457	10,004	0,002
α_d	-	-	-	α_d	-1,351	-4,498	0,021

Nessa tabela, apesar de a estatística R^2 ser mais próxima de 1,000 para o modelo gravitacional linearizado sem intercepto, aquele com intercepto apresentou resultados satisfatórios em relação à estatística (0,983 e 0,971 para o R^2 e R^2 Ajustado respectivamente).

Assim, dado que a porcentagem de valores subestimados e superestimados pelo modelo com intercepto é mais equilibrada (50,0% e 50,0%, respectivamente) do que para aquele sem intercepto (83,3% e 16,7%, respectivamente), o modelo admitido como representativo das viagens entre capitais da Região Sudeste é aquele que contempla as variáveis independentes população (α_{POP}) e distância (α_d), acrescido de um termo constante (α).

Para o Grupo B, os valores dos coeficientes obtidos pela segregação dos dados e regressão linear pelo método *Stepwise* são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Ônibus em viagens interestaduais excluindo-se as capitais (Grupo B)

	SEM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,992			0,991			0,991		
R^2 Ajustado	0,992			0,932			0,991		
Subestimados	53,7%			48,0%			48,5%		
Superestimados	46,3%			52,0%			51,5%		

	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
α_{POP}	1,214	5,524	0,000	0,471	7,634	0,000	0,511	12,879	0,000
α_d	-0,939	-6,717	0,000	-0,819	-5,132	0,000	-0,808	-7,724	0,000
α_{RENDA}	-	-	-	0,367	4,229	0,000	0,306	5,603	0,000
α_{OCUP}	-0,433	-2,071	0,041	-	-	-	-	-	-

	COM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,409			0,321			0,432		
R^2 Ajustado	0,396			0,313			0,427		
Subestimados	49,1%			48,7%			48,1%		
Superestimados	50,9%			51,3%			51,9%		

	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
α	8,877	3,538	0,000	17,267	5,599	0,000	9,904	7,187	0,000
α_{POP}	0,549	5,984	0,000	0,395	6,283	0,000	0,520	13,746	0,000
α_d	-1,091	-7,510	0,000	-6,497	0,000	-	-1,106	-9,082	0,000

¹ Pelo menos uma das cidades é uma capital estadual² Entre todos os pares OD

As estatísticas R^2 e R^2 Ajustado dos modelos estimados com intercepto são todas abaixo de 0,432, indicando que o intercepto na Equação 3.14 não resulta em valores apropriados para as estimativas. Por outro lado, os modelos sem o termo constante proveram valores elevados para essa estatística, com mínimo de 0,932 para o R^2 Ajustado no caso da modelagem das viagens interestaduais em que uma das cidades é uma capital estadual.

O modelo calibrado a partir de todos os dados observados (GERAL) foi escolhido para estimativa do número de viagens para o Grupo B uma vez que as porcentagens de valores subestimados e superestimados são próximos daqueles resultantes da segregação dos dados (COM CAPITAL e SEM CAPITAL). Portanto, o modelo considerado é aquele com as variáveis independentes de população (α_{POP}), distância (α_d) e renda (α_{RENDA}) sem a constante α .

A Tabela 3.4 apresenta os resultados da calibração dos coeficientes da Equação 3.14 a partir dos dados do Grupo C, pela aplicação do método *Stepwise* à regressão linear múltipla.

Tabela 3.4 – Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Ônibus em viagens intermunicipais (Grupo C)

	SEM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,993			0,990			0,991		
R^2 Ajustado	0,992			0,990			0,991		
Subestimados	46,9%			53,3%			42,6%		
Superestimados	53,1%			46,7%			57,4%		

Coefficiente	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
α_{POP}	-	-	-	0,349	38,036	0,000	0,353	70,870	0,000
α_d	-0,580	-2,353	0,025	-	-	-	-	-	-
α_{RENDA}	0,789	5,287	0,000	-	-	-	-	-	-

	COM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,444			0,328			0,395		
R^2 Ajustado	0,384			0,276			0,368		
Subestimados	46,9%			53,3%			46,8%		
Superestimados	53,1%			46,7%			53,2%		

Coefficiente	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
α	22,143	4,707	0,000	-0,844	-0,205	0,841	10,448	3,976	0,000
α_{POP}	-0,894	-2,270	0,0311	0,380	2,519	0,026	-	-	-
α_d	-0,900	-4,088	0,000	-	-	-	-0,715	-3,403	0,000
α_{AUTO}	0,875	2,897	0,007	-	-	-	0,314	4,897	0,000

¹ Pelo menos uma das cidades é uma capital estadual

² Entre todos os pares OD

Os comentários a respeito da calibração dos modelos de distribuição do Grupo B podem ser estendidos às viagens intermunicipais, dados os resultados das estatísticas de R^2 e R^2 Ajustado. Assim, o modelo representativo das viagens intermunicipais pelo modo Ônibus para o Grupo C contempla a variável independente população (α_{POP}) sem o intercepto α .

3.1.5.2 Modo Automóvel

Existe uma dificuldade na modelagem do número de viagens intermunicipais e interestaduais pelo modo Automóvel uma vez que, ao contrário do modo Ônibus, não há disponibilidade de

uma base de dados que informe o número de viagens realizadas por aquele modo. Em geral, esses valores são obtidos através de pesquisas de campo para estudos específicos de melhoria ou implantação de sistemas de transporte.

Dadas as restrições de execução de uma pesquisa dessa natureza no contexto desta tese de doutorado, propõe-se uma alternativa para estimativa desses valores. O Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT, 2014) proposto pelo Governo Federal para implantação e melhoria dos sistemas logísticos do Brasil disponibiliza o Volume Diário Médio Anual (VDMA) dos carregamentos nas principais rodovias do país em relação o número de veículos leves (automóveis) sob a forma de um arquivo vetorial georreferenciado (Figura 3.2).

Os carregamentos nos arcos correspondentes às rodovias estaduais e federais podem ser de utilidade em diferentes projetos de planejamento de infraestrutura de transporte. No contexto de aplicação da presente pesquisa, alguns procedimentos foram executados naquele banco de dados para que pudesse ser utilizado na calibração de modelos de distribuição de viagens pelo modo Automóvel.

Primeiramente, foram eliminados os centroides da rede que correspondem a municípios menores que a classificação de médio e grande porte do IBGE (aqueles com população menor que 100 mil habitantes), e os arcos (rodovias) cujos registros de VDMA não correspondessem a valores numéricos.

Figura 3.2 – Alocação dos carregamentos decorrentes das projeções do PNLT para 2015

Todas as cidades brasileiras que se enquadram na classificação do IBGE quanto ao porte foram consideradas na estimativa de uma matriz OD pela rede fornecida pelo PNLT. Essa condição foi estabelecida para evitar inconsistências nas demandas estimadas e considerar as viagens entre todas as cidades inclusive fora da Região Sudeste – por exemplo, aquelas efetuadas entre as cidades de São Paulo e Brasília – mesmo que não contabilizadas na análise custo-benefício proposta nesta tese.

Existem métodos de reconstrução de matrizes OD com base nos fluxos observados nos arcos de uma rede (PITOMBEIRA NETO; BERTONCINI; LOUREIRO, 2011; CASCETTA; NGUYEN, 1988). Ainda, Bertoncini e Kawamoto (2012) propõem um método alternativo que permite estimar os valores de uma matriz de viagens com base nos fluxos observados nos nós de uma rede.

O *software* de planejamento TRANSCAD (CALIPER, 2007) possui uma rotina computacional de estimativa de matrizes sob o comando *O-D Estimation* do pacote *Planning*, sob uma rede de transporte vetorial georeferenciada com informações sobre o volume de tráfego nos arcos e uma matriz inicial (matriz semente). Essa matriz semente define as proporções das viagens entre pares de cidades e permite a convergência do método para estimativa da matriz final.

Ocorre que mesmo as proporções das viagens entre municípios são desconhecidas no âmbito da estimativa de uma matriz OD para automóveis, ou seja, a matriz semente nessas condições também é um parâmetro desconhecido do problema. Wei et al. (2007) afirmam que a qualidade dessa matriz interfere significativamente na acurácia das estimativas finais do número de viagens entre zonas de tráfego. Nesse sentido, Yuanqing et al. (2010) utilizam um modelo gravitacional de parâmetros conhecidos para inferência de uma matriz semente, a qual é aplicada na obtenção do número de viagens atraídas e geradas pelas zonas de tráfego através dos métodos de alocação "Tudo-ou-Nada" (*All-or-Nothing*) e "Equilíbrio do Usuário" (*User Equilibrium*).

Nesta tese, admite-se a premissa de que os padrões de viagens por Automóvel repetem-se nas mesmas proporções que os do modo Ônibus entre pares de origens e destinos de uma rede. Assim, uma matriz construída a partir do modelo gravitacional de viagens pelo modo Ônibus foi utilizada como semente para o procedimento de alocação das viagens do modo Automóvel e a determinação da matriz OD foi baseada nos carregamentos fornecidos pelo PNLT.

Essa premissa é justificada pelo fato de que a criação das linhas de Ônibus intermunicipais e interestaduais pode ser considerada uma consequência do tráfego de automóveis e surgimento de demanda para aqueles serviços.

A aplicação dos coeficientes dos modelos econométricos da seção 3.1.5.1 (página 102) resultaram em uma matriz semente para aplicação da rotina computacional do TRANSCAD de estimativa de matrizes Origem-Destino.

Nesse software, a função *O-D Estimation* requer a definição de um tipo de alocação de tráfego (CALIPER, 2007), sendo escolhido o "Método Tudo-ou-Nada" no qual a rota de menor custo entre duas cidades é identificada e todo o volume de tráfego estimado entre a origem e o destino é alocado nessa rota. O "Método Tudo-ou-Nada" requer, além da definição da rede vetorial de tráfego georreferenciada, um parâmetro de impedância da viagem definido como tempo estimado de deslocamento nos arcos da rede (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Exemplo de alocação de tráfego para estimativa de matriz OD pelo método "Tudo-ou-Nada" no TRANSCAD (CALIPER, 2007)

Após a execução da rotina computacional no referido *software* obtém-se uma matriz de distribuição de viagens para o modo Automóvel. Analogamente ao executado no modo Ônibus, foram removidos os dados com VDMA menores que 2350 viagens por ano (ou seja, 45 viagens por dia) em uma etapa de pré-processamento dos dados.

Em seguida, os parâmetros da Equação 3.14 foram calibrados por uma regressão linear múltipla pelo método *Stepwise*. Analogamente ao modo Ônibus, os pares de cidades foram segregados em três grupos para obtenção de estimativas mais acuradas dos parâmetros conforme preconizado por Gonçalves, Bez e Novaes (2007): Grupo A para viagens somente entre capitais dos Estados; Grupo B para viagens interestaduais excluindo-se as conexões entre capitais; e Grupo C com viagens intermunicipais (entre cidades do mesmo Estado).

Novamente, para os três grupos foram estimados modelos com e sem o intercepto (α) da Equação 3.14. No caso dos grupos B e C, além dessas estimativas a respeito da constante, os dados foram segregados pelas viagens em que nenhuma das cidades é capital (SEM CAPITAL) e naquelas em que pelo menos uma das cidades é uma capital estadual (COM CAPITAL). Por fim, os coeficientes também foram estimados com todos os dados agrupados (GERAL).

Assim, os valores da Tabela 3.5 representam os resultados da calibração dos coeficientes para o Grupo A (entre capitais estaduais da Região Sudeste do Brasil).

Tabela 3.5 – Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Automóvel em viagens entre capitais (Grupo A)

SEM INTERCEPTO				COM INTERCEPTO			
R^2		0,992		R^2		0,991	
R^2 Ajustado		0,642		R^2 Ajustado		0,606	
Subestimados		45,5%		Subestimados		54,5%	
Superestimados		54,5%		Superestimados		45,5%	
Coeficiente	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Coeficiente	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
α	-	-	-	α	52,739	5,377	0,000
α_{AUTO}	0,407	36,088	0,000	α_{AUTO}	-	-	-
α_{RENDA}	-	-	-	α_{RENDA}	-1,954	-4,231	0,002

Nesse Grupo A observa-se que os valores de R^2 da equação proposta sem o intercepto são maiores (e mais próximos da unidade) do que aquele com a constante na equação. Assim, o modelo admitido para representação das viagens entre capitais pelo modo Automóvel contempla somente a variável independente relativa ao número de automóveis nas capitais (α_{AUTO}). Na sequência, para o Grupo B, são apresentados os valores estimados para os coeficientes da Equação 3.14 na Tabela 3.6 .

Tabela 3.6 – Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Automóvel em viagens interestaduais excluindo-se as capitais (Grupo B)

	SEM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,990			0,992			0,990		
R^2 Ajustado	0,990			0,992			0,990		
Subestimados	42,4%			44,6%			43,1%		
Superestimados	57,6%			55,4%			56,9%		

Coeficientes	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
α_{POP}	0,453	13,208	0,000	0,583	7,617	0,000	0,498	16,440	0,000
α_d	-0,335	-9,170	0,000	-0,991	-11,641	0,000	-0,451	-13,630	0,000
α_{RENDA}	0,396	18,051	0,000	0,564	10,928	0,000	0,383	21,532	0,000
α_{OCUP}	-0,280	-7,959	0,000	-0,220	-2,457	0,014	-0,252	-9,125	0,000

	COM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,140			0,340			0,197		
R^2 Ajustado	0,139			0,337			0,196		
Subestimados	50,5%			45,5%			42,5%		
Superestimados	49,5%			54,5%			57,5%		

Coeficientes	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Valor	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
α	17,516	31,225	0,000	9,926	4,689	0,000	16,162	30,377	0,000
α_{POP}	-	-	-	0,310	9,546	0,000	0,114	2,873	0,004
α_d	-0,799	-20,309	0,000	-1,333	-11,539	0,000	-0,899	-23,772	0,000
α_{AUTO}	-0,148	-3,788	0,000	-	-	-	-0,201	-4,234	0,000
α_{OCUP}	0,215	5,801	-	-	-	-	0,260	7,647	0,000

¹ Pelo menos uma das cidades é uma capital estadual² Entre todos os pares OD

No caso das viagens interestaduais pelo modo Automóvel excluindo-se aquelas entre capitais estaduais, o modelo mais adequado é o que considera todos os dados observados (GERAL), sem o termo constante (α), e as variáveis independentes relacionadas à população (α_{POP}), renda (α_{RENDA}) e pessoal ocupado assalariado (α_{OCUP}) e distância rodoviária (α_d).

Isso decorre do fato de que as estatísticas R^2 são melhores do que para a equação com intercepto (para todos os casos) e de que as porcentagens de valores subestimados e superestimados são de 43,1% e 56,9%, respectivamente.

Finalmente, para o GRUPO C de viagens intermunicipais, os resultados da calibração dos parâmetros da Equação 3.14 são apresentados na Tabela 3.7 a seguir. Em relação à modela-

gem do número de viagens desse último grupo, a equação mais adequada é a "GERAL", sem intercepto e com as variáveis independentes relativas à população (α_{POP}), renda (α_{RENDA}) e pessoal ocupado assalariado (α_{OCUP}) e distância rodoviária (α_d) entre cidades, à semelhança das viagens interestaduais excluindo-se entre capitais. Nesse caso, as estatísticas R^2 são novamente melhores no modelo sem intercepto, cujas proporções entre valores subestimados e superestimados mantêm-se próximas (de 45,0% e 55,0%, respectivamente).

É importante salientar que os parâmetros da Equação 3.14 referem-se a estimativas do número de automóveis anuais entre cidades da Região Sudeste, uma vez que foram estabelecidos com base no VDMA dos carregamentos da rede provida pelos estudos do PNLT (PNLT, 2014). Ainda, para definição do número de pessoas que viajam pelo referido modo para aplicação na análise custo-benefício proposta nesta tese considera-se em média dois usuários por veículo conforme indicado pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitana (EMPLASA, 2006).

3.1.5.3 Modo Avião

Como nas viagens pelo modo Ônibus, existem estudos propostos a modelar o número de viagens realizadas pelo modo Avião. No contexto internacional, Grosche, Rothlauf e Heinzl (2007) apresentam uma revisão sobre a estimativa de modelos gravitacionais, indicando as variáveis escolhidas para caracterizar as observações e os respectivos coeficientes explicativos R^2 . Naquele estudo os autores apresentam valores de parâmetros para dois modelos gravitacionais calibrados a partir de dados de fluxos de passageiros entre a Alemanha e 28 países europeus.

Sob a perspectiva nacional, a ANAC (ANAC, 1998) utiliza um modelo gravitacional para estimativa da demanda por viagens pelo modo aéreo considerando três variáveis: o PIB brasileiro, o *yeld* aéreo (preço médio de passagens por quilômetro - ANAC, 2014a), e uma variável binária para estimativas anteriores e posteriores ao lançamento do Plano Real.

Apesar de útil na estimativa do número de viagens pelo referido modo, o modelo apresenta restrições importantes como a reduzida quantidade de dados para calibração e a defasagem em relação aos atuais volumes de tráfego aéreo, que cresceram a uma taxa de 10% ao ano entre 2003 e 2008 (MCKINSEY, 2010).

Tabela 3.7 – Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Automóvel em viagens intermunicipais (Grupo C)

	SEM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,980			0,973			0,980		
R^2 Ajustado	0,980			0,972			0,980		
Subestimados	45,9%			51,3%			45,0%		
Superestimados	54,1%			48,7%			55,0%		
Coeficientes	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value
α_{POP}	0,660	18,496	0,000	-	-	-	0,650	18,140	0,000
α_d	-0,525	-21,476	0,000	-0,489	-3,696	0,000	-0,528	-22,000	0,000
α_{RENDA}	0,285	9,319	0,000	0,820	11,463	0,000	0,289	11,188	0,000
α_{OCUP}	-0,275	-6,670	0,000	-	-	-	-0,267	-7,102	0,000
	COM INTERCEPTO								
	SEM CAPITAL			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,206			0,090			0,227		
R^2 Ajustado	0,205			0,085			0,227		
Subestimados	50,1%			53,9%			48,6%		
Superestimados	49,9%			46,1%			51,4%		
Coeficientes	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value
α	25,242	19,585	0,000	18,310	11,606	0,000	23,813	18,628	0,000
α_{POP}	-0,309	-5,143	0,000	-	-	-	-0,267	-4,443	0,000
α_d	-0,810	-29,467	0,000	-0,615	-4,346	0,000	-0,799	-29,327	0,000
α_{RENDA}	-0,520	-10,339	0,000	-	-	-	-0,490	-10,073	0,000
α_{OCUP}	0,554	9,587	0,000	-	-	-	0,538	9,562	0,000

¹ Pelo menos uma das cidades é uma capital estadual² Entre todos os pares OD

Com abordagem de treinamento de redes neurais artificiais, Sun, Brauner e Hormby (1998) propõem um procedimento alternativo à calibração de modelos econométricos tradicionais para representação dos padrões de viagens do setor aéreo. No contexto brasileiro, Alekseev e Seixas (2002) apresentam uma proposta de treinamento de rede neural que resultou no aumento da acurácia dos acertos em relação aos valores observados, reduzindo o erro médio de 4,6% do modelo gravitacional da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) (ANAC, 1998) para aproximadamente 1,0%, comparando-se diferentes variáveis de entrada e funções de ativação.

Nesta tese, a estimativa do número de viagens pelo modo aéreo deu-se de maneira análoga ao modo Ônibus, pela calibração de um modelo gravitacional considerando variáveis socioe-

conômicas, com algumas simplificações em relação à segregação dos dados e às conexões entre cidades. Inicialmente foram obtidos os números de viagens observados entre aeroportos nas cidades e regiões metropolitanas da Região Sudeste disponibilizados no Relatório Gerencial da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2013).

A base de dados contém os aeroportos de origem e destino e os respectivos números de passageiros transportados no ano de 2012. A partir desses valores procedeu-se à remoção de observações não representativas para adequada modelagem do problema. Foram consideradas apenas as conexões entre aeroportos localizados em cidades da Região Sudeste do Brasil com número de passageiros maior que 2350 por ano (ou seja, mais que 45 passageiros transportados diariamente, analogamente ao realizado por AGUIAR JÚNIOR, 2004).

A Figura 3.4 representa as linhas de desejo (fluxos de passageiros entre aeroportos) obtidas pelo *software* TRANSCAD (CALIPER, 2007) após a remoção dos valores não representativos para a definição do modelo gravitacional de distribuição de viagens.

No caso da base de dados desse modo de transporte optou-se pela calibração dos coeficientes do modelo considerando-se a multiplicação das variáveis independentes como na Equação 3.14, apesar de os fluxos de passageiros entre aeroportos serem discriminados em cada direção.

Ainda, dado o número restrito de aeroportos considerados nas análises, as observações foram segregadas em dois grupos – em que ambas as cidades conectadas são capitais estaduais (ENTRE CAPITAIS) e aquelas em que pelo menos uma das cidades é capital de Estado – e posteriormente um modelo único foi calibrado contemplando todos os fluxos de passageiros (GERAL). Por outro lado, mantiveram-se as estimativas dos coeficientes para modelos com e sem intercepto da Equação 3.14.

Figura 3.4 – Linhas de Desejo dos dados observados para calibração do modelo gravitacional para o Modo Avião

Assim, através do método *Stepwise* foram identificadas as variáveis independentes que afetam significativamente, do ponto de vista estatístico, a estimativa do número de viagens entre pares de aeroportos na Região Sudeste. A Tabela 3.8 apresenta os coeficientes selecionados e suas respectivas significâncias.

Tabela 3.8 – Estimativa dos parâmetros do modelo gravitacional para o modo Avião

	SEM INTERCEPTO								
	ENTRE CAPITAIS			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	1,000			0,997			0,998		
R^2 Ajustado	1,000			0,994			0,997		
Superestimados	50,0%			51,3%			51,0%		
Subestimados	50,0%			48,7%			49,0%		
Coeficientes	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value
α_{POP}	0,450	160,497	0,000	-	-	-	-1,621	-5,792	0,000
α_d	-	-	-	-	-	-	-0,497	-3,116	0,003
α_{OCUP}	-	-	-	0,413	80,761	0,000	2,391	8,416	0,000
	COM INTERCEPTO								
	ENTRE CAPITAIS			COM CAPITAL ¹			GERAL ²		
R^2	0,996			0,628			0,864		
R^2 Ajustado	0,992			0,395			0,746		
Superestimados	41,7%			59,0%			54,9%		
Subestimados	58,3%			41,0%			45,1%		
Coeficientes	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value	Valor	t -test	p -value
α	-10,562	-5,911	0,000	-2,433	-0,616	0,542	-6,518	-2,680	0,010
α_{POP}	-	-	-	-1,618	-2,907	0,006	-1,525	-5,011	0,000
α_d	-1,339	-9,114	0,000	-	-	-	-	-	-
α_{RENDA}	1,012	10,924	0,000	-	-	-	-	-	-
α_{AUTO}	0,713	28,147	0,000	-	-	-	-	-	-
α_{OCUP}	-	-	-	2,237	3,779	0,001	2,292	7,768	0,000

¹ Pelo menos uma das cidades é uma capital estadual

² Entre todos os pares OD

Dados os resultados da Tabela 3.8 optou-se pela segregação dos dados (ENTRE CAPITAIS e COM CAPITAL) em detrimento da calibração de um único modelo (GERAL). Para as viagens entre capitais, o modelo escolhido é aquele sem intercepto (com única variável independente referente à população, (α_{POP}) uma vez que o R^2 é igual a 1,000 e a proporção de valores subestimados e superestimados é de 50%.

Para as demais viagens - em que uma cidade é uma capital estadual - o modelo escolhido também é sem intercepto (com única variável independente α_{OCUP} referente à população ocupada) dado o alto valor da estatística $R^2 = 0,997$ em relação ao modelo com intercepto.

3.1.6 Projeção das Viagens Estimadas

Para aplicação da estimativa do número de viagens entre municípios da Região Sudeste à análise custo-benefício de uma rede ferroviária é necessário considerar a expansão dos valores obtidos pelos modelos gravitacionais descritos anteriormente em um horizonte de planejamento.

A expansão do número de viagens entre pares de origem e destino foi realizada pela projeção dos valores das variáveis independentes dos modelos gravitacionais e aplicação aos respectivos coeficientes estimados nas seções anteriores para cálculo de T_{ij} da Equação 3.14.

Essas projeções foram efetuadas da seguinte maneira: para cada variável independente dos modelos escolhidos para representação do número de viagens por modo de transporte, foram obtidos os valores observados no Censo de 2010 reportados pelo IBGE (IBGE, 2014c). A partir desses valores, foram realizadas projeções até o horizonte de 2050 conforme procedimento utilizado pelo instituto e descrito a seguir.

Seja uma variável $X(t)$ representativa de um parâmetro que caracteriza uma determinada região em um período t , e $x_i(t)$ com $i = 1, 2, \dots, n$, os valores da variável subdividida em n partições relativas às regiões menores que a compõe (Equação 3.15).

$$X(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) \quad (3.15)$$

A variável $x_i(t)$ é admitida como uma parcela de $X(t)$ representada na forma linear pela Equação 3.16, em que a_i é denominado "coeficiente de proporcionalidade" do incremento da área menor i em relação à área maior e b_i é um coeficiente linear de correção.

$$x_i(t) = a_i \cdot X(t) + b_i \quad (3.16)$$

Para definição dos coeficientes dessa equação utilizam-se valores das variáveis referentes a dois períodos diferentes de observação (e.g. dois Censos Demográficos sucessivos). Assim, seja t_0 e t_1 os períodos do primeiro e segundo censos respectivamente, então:

$$\begin{cases} x_i(t_0) = a_i \cdot X(t_0) + b_i \\ x_i(t_1) = a_i \cdot X(t_1) + b_i \end{cases} \quad (3.17)$$

Resolvendo-se o sistema de equações é possível calcular os valores dos coeficientes da Equação 3.17 mediante as observações nos períodos de referência. Assim, tem-se que:

$$a_i = \frac{x_i(t_1) - x_i(t_0)}{X(t_1) - X(t_0)} \quad (3.18)$$

$$b_i = x_i(t_0) - a_i \cdot X(t_0) \quad (3.19)$$

Portanto, projetando-se os valores de $X(t)$ em um horizonte de planejamento é possível calcular os valores dessa variável para as áreas menores conhecendo os respectivos valores de períodos anteriores, considerando-se válida a hipótese de que as tendências de projeção das áreas menores seguem as mesmas observadas para a área maior.

Assim, para a projeção das variáveis independentes relacionadas à população (*POP*) e pessoal ocupado assalariado (*OCUP*) das cidades com mais de 100 mil habitantes na Região Sudeste foram obtidas informações a respeito das estimativas de projeção da população brasileira (IBGE, 2014b), cujos valores são representados na Figura 3.5.

A partir desses valores, os parâmetros da Equação 3.17 para essas variáveis foram calculados e as populações do municípios foram projetadas para o ano de 2050. No caso da variável *OCUP* preferiu-se a projeção em relação à população uma vez que admite-se válida a hipótese de que os níveis de emprego manter-se-ão estáveis e iguais ao período 2000-2010 até 2050.

Para as variáveis relacionadas à renda *per capita* da população (*RENDA*) e frota de automóveis das cidades (*AUTO*), optou-se pela expansão no horizonte de planejamento com base em dados de projeção da renda *per capita* brasileira nas projeções da Previdência Social (MPS, 2013), representados na Figura 3.6. No caso da frota de automóveis optou-se também pela projeção com base nessa variável pela hipótese de que, no caso brasileiro, o aumento da renda reflete na maior aquisição de veículos particulares e aumento de viagens intermunicipais.

Figura 3.5 – Estimativa de crescimento da população brasileira – Fonte: IBGE (2014b)

Figura 3.6 – Estimativa de crescimento da renda média *per capita* brasileira – Fonte: MPS (2013)

3.1.6.1 Modo Ônibus

A aplicação dos valores de projeção das variáveis independentes até o horizonte de planejamento de 2050 à Equação 3.17 resulta nas estimativas de viagens representadas pela Tabela B.2 e Tabela B.3 do Apêndice B. Observa-se naquela matriz que as projeções não são estimadas entre todos os pares de municípios da Região Sudeste, uma vez que não existem serviços de transporte rodoviário coletivo (diretos) entre todos eles.

Assim, para definição daquelas tabelas foram identificadas as linhas de Ônibus diretas intermunicipais em cada Estado da referida Região e as interestaduais. As primeiras foram obtidas junto aos órgãos competentes pela regulação dos serviços nos respectivos Estados (o Departamento de Estradas de Rodagem, DER, no caso do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, e a Agência Reguladora de Transporte do Estado de São Paulo, ARTESP) e o segundo com base no plano nacional de rede de transporte rodoviário proposto pela ANTT (PNLT, 2014).

Dadas essas projeções, foram estimadas as quantidades de viagens entre os pares de cidades com linhas regulares de Ônibus na Região Sudeste pela aplicação desses valores na Equação 3.14. Na Figura 3.7 apresenta-se ilustrativamente o padrão de distribuição dessas viagens estimadas, na rede rodoviária da Região Sudeste pelo modo Ônibus em 2015.

Cabe ressaltar que a Figura 3.7 é meramente ilustrativa das estimativas dos fluxos passageiros pelo modo Ônibus na rede rodoviária da Região Sudeste. Em algumas conexões os carregamentos não representam necessariamente a realidade observada nas rodovias, por exemplo, entre São Paulo e Santos, o que ocorre pelo fato de que a alocação dos fluxos pelo *software* TRANSCAD (CALIPER, 2007) considera os caminhos mínimos entre pares de origem e destino.

Ainda, é necessário considerar que a calibração dos modelos para estimativa do número de viagens entre cidades representa apenas a base de dados da Agência Nacional de Transporte Terrestre para viagens intermunicipais, que não contempla aquelas realizadas pelo modo Ônibus sob condições específicas (e.g. por fretamento). Isso justifica, por exemplo, a baixa densidade relativa entre a Região Metropolitana de Campinas e São Paulo, cujas viagens não são necessariamente realizadas com acesso pelos terminais rodoviários das cidades.

Figura 3.7 – Alocação dos fluxos anuais estimados para o número de viagens pelo modo Ônibus

3.1.6.2 Modo Automóvel

O procedimento executado para expansão das viagens pelo modo Automóvel é análogo ao modo Ônibus. Após projeções das variáveis independentes da Equação 3.17, o número de viagens entre municípios da Região Sudeste foi projetado para aquele modo de transporte.

Assim, a Tabela B.4 e Tabela B.5 do Apêndice B contêm a lista de origens e destinos e o número de viagens estimadas entre cada cidade da Região Sudeste para o horizonte de planejamento até o ano de 2050. Na Figura 3.8 é apresentado, para efeito de ilustração, a alocação dos fluxos de passageiros estimados, cujas viagens são realizadas pelo modo Automóvel no ano de 2015 (considerando média de dois passageiros por Automóvel - EMLASA, 2006).

Como na Figura 3.7 referente à alocação dos fluxos de passageiros pelo modo Ônibus, essa Figura 3.8 tem como motivação a representação da proporcionalidade dos fluxos de automóveis entre cidades na rede rodoviária da Região Sudeste, não representando necessariamente a realidade dos carregamentos nas rodovias. Novamente, verifica-se uma maior concentração de passageiros em Automóveis em viagens entre as capitais dos Estados e, ainda, no eixo rodoviário entre a Região Metropolitana de São Paulo e o interior do Estado.

Figura 3.8 – Alocação dos fluxos anuais estimados para o número de viagens pelo modo Automóvel

3.1.6.3 Modo Avião

Para definição dos pares de cidades que são contempladas com projeções de passageiros até o horizonte de planejamento de novas linhas ferroviárias foram obtidas os pares de origens e destinos que possuem operação comercial de voos diretos entre pares de cidades da Região Sudeste e infraestrutura aeroportuária para tal propósito, segundo banco de dados da ANAC.

Assim, dada a Equação 3.14 de estimativa do número de viagens entre cidades pelo modo aéreo, e as projeções de suas variáveis independentes, apresenta-se a Tabela B.6 e a Tabela B.7 do Apêndice B sobre o número de viagens entre pares de cidades da Região Sudeste com volume representativo de viagens no ano de 2010.

A partir dessas projeções apresenta-se o gráfico das linhas de desejo do número de passageiros entre as referidas cidades estimados para o ano de 2015. Nesse caso, tem-se maior concentração de viagens entre as capitais São Paulo, Belo Horizonte, Rio de Janeiro e Vitória. É importante ressaltar que na estimativa e projeção das viagens são computados os deslocamentos entre cada origem e destino incluindo aqueles voos com escalas ou conexões, uma vez que a base de dados para a calibração do modelo gravitacional inclui todas as viagens realizadas entre cada OD não importando o percurso realizado.

Figura 3.9 – Linhas de Desejo dos fluxos anuais estimados para o Modo Avião

3.2 Escolha Modal

Diferentemente de muitos países europeus em que a malha ferroviária de trens convencionais está consolidada e existe uma propensão à instalação e expansão de uma malha de alta velocidade, a inexistência de serviços competitivos dessa natureza no Brasil dificulta a estimativa da divisão modal no caso da implantação de novos serviços.

Assim, no contexto de incertezas a respeito da propensão à escolha modal nos cenários de reativação do transporte ferroviário de passageiros no Brasil, propõe-se uma pesquisa de preferência declarada conduzida na Região Sudeste considerando sistemas de *HPTs* e *HSTs*.

No contexto da abordagem quatro etapas, a escolha modal diz respeito à identificação das proporções da população que utilizam os modos de transporte disponíveis para a realização de viagens entre pares de cidades. No caso de novos projetos de sistemas de transporte, essa análise tenta refletir da melhor maneira possível os padrões das novas viagens, cujas tendências são observadas através de pesquisas específicas aplicadas a uma amostra da população.

No âmbito do planejamento de transportes, uma pesquisa de preferência revelada refere-se à aplicação de um questionário em que o participante reporta ao pesquisador as características de uma viagem que já realizou no passado. Por outro lado, uma pesquisa de preferência declarada apresenta diferentes cenários envolvendo modos de transporte e suas respectivas características – incluindo os existentes e potenciais novos sistemas – e o entrevistado é conduzido à escolha de uma das alternativas mediante suas preferências pessoais.

3.2.1 Pesquisa de Preferência Declarada

Ortúzar e Willumsen (2011) definem três classes de métodos de pesquisa de preferência declarada: *Contingent Valuation*, *Conjoint Analysis* e *Stated Choice*. Na *Contingent Valuation*, os respondentes são questionados sobre o quanto pagariam por um serviço ou produto diferente daquele que já é ofertado (MITCHELL; CARSON, 1989). A *Conjoint Analysis* pede que os participantes ordenem uma série de alternativas quanto à sua preferência e a *Stated Choice* propõe seja escolhida uma alternativa de serviço ou produto entre novos e existentes em múltiplas situações.

Vários autores corroboram a afirmação de que comportamento relativo a viagens, sobretudo a escolha modal, é fortemente relacionado às características dos indivíduos, da viagem e das instalações do sistema de transporte (CERVERO; RADISCH, 1996; KITAMURA; MOKHTARIAN; LAIDET, 1997; ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Nesta seção descreve-se uma pesquisa da classe *Stated Choice* em que os respondentes escolheram um modo de transporte para viagens na situação hipotética de oferta de serviços de *HPTs* ou *HSTs*. A pesquisa teve por objetivo coletar respostas sobre a escolha modal em viagens de longa distância (entre 100 km e 1000 km) na Região Sudeste com alternativas envolvendo os modos Automóvel, Ônibus, Trem (*HPT* ou *HST*) e Avião.

Para facilidade de representação algumas denominações são apresentadas no contexto da língua portuguesa e representadas por siglas que remetem à sua tradução em inglês. No caso dos modos de transporte envolvidos são atribuídas as denominações, respectivamente, de *CAR*, *BUS*, *HPT*, *HST* e *AIR*. É importante esclarecer que em algumas viagens de longa distância o modo aéreo não está disponível para escolha pela ausência de uma infraestrutura aeroportuária que opere voos comerciais regulares.

Dado que o motivo da viagem é um fator importante na escolha modal e que influencia os resultados de possíveis aplicações da pesquisa de preferência declarada, optou-se pela segmentação dos respondentes cujas viagens são por motivo trabalho (*Work*, representado por *W*) ou lazer, estudos e outros motivos (denominado como *Leisure* e representado por *L*).

Assim, considerando a disponibilidade dos modos e motivos de viagem, são definidos cenários de operação de *HPT* ou *HST* em que o modo aéreo pode ou não ser ofertado, resultando nas seguintes combinações: *HPT* sem *AIR*, *HPT* com *AIR*, *HST* sem *AIR* e *HST* com *AIR* pelo motivo *W* e *HPT* sem *AIR*, *HPT* com *AIR*, *HST* sem *AIR* e *HST* com *AIR* pelo motivo *L*.

3.2.1.1 Atributos dos Modos de Transporte

O número máximo de atributos característicos de cada modo foi limitado a três para viabilizar a formulação do questionário em termos de número de perguntas apresentadas aos respondentes e proporcionar um realismo adequado à pouca experiência da população brasileira no uso de transporte ferroviário intermunicipal.

Para evitar o foco em apenas alguns atributos de cada modo (CARSON et al., 1994) e respostas aleatórias pelo excesso de informações (SAELENMINDE, 1999), o modo Automóvel foi caracterizado pelo Tempo de Viagem (TT_{CAR}), Custo de Combustível (PE_{CAR}) e Custo de Pedágio (TO_{CAR}) e os modos Ônibus, Trem (HPT e HST) e Avião foram caracterizados pelo Tempo de Viagem (TT_{BUS} , TT_{HPT} , TT_{HST} , TT_{AIR}), Frequência em termos de intervalo entre serviços (FR_{BUS} , FR_{HPT} , FR_{HST} , FR_{AIR}) e Preço da Passagem (FA_{BUS} , FA_{HPT} , FA_{HST} , FA_{AIR}), conforme resumido na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Atributos considerados nas pesquisa de preferência declarada

Automóvel (CAR)	Tempo de Viagem (TT_{CAR})	Combustível (PE_{CAR})	Pedágio (TO_{CAR})
Ônibus (BUS)	Tempo de Viagem (TT_{BUS})	Frequência (FR_{BUS})	Preço da Passagem (FA_{BUS})
Trem (HPT/HST)	Tempo de Viagem ($TT_{HPT/HST}$)	Frequência ($FR_{HPT/HST}$)	Preço da Passagem ($FA_{HPT/HST}$)
Aéreo (AIR)	Tempo de Viagem (TT_{AIR})	Frequência (FR_{AIR})	Preço da Passagem (FA_{AIR})

Apesar de nem todas as rodovias brasileiras serem concessionadas à iniciativa privada e, por isso, não possuírem praças de pedágio em sua extensão, os custos operacionais dos automóveis foram divididos em combustível e pedágio de modo a tornar os cenários mais próximos da realidade atual das rodovias da Região Sudeste e por acreditar-se que o modelo de concessões tende a se expandir em um futuro próximo.

3.2.1.2 Níveis dos Atributos

A cada um dos atributos dos respectivos modos de transporte foram atribuídos três níveis de valores numéricos (Baixo, Médio e Alto) de modo a captar a variabilidade dos valores em função da decisão dos respondentes. O tempo de viagem foi definido com base na velocidade média dos veículos (Tabela 3.10) em função das características dos veículos, dos limites de velocidade e de eventuais atrasos, e a distância média entre cidades caracterizada posteriormente na definição das possíveis conexões entre cidades.

A frequência dos serviços de Ônibus, Trens e Avião também foi definida em três níveis em função do intervalo entre partidas sucessivas, com valores "BAIXO" para saídas a cada 12 horas, "MÉDIO" a cada 6 horas e "ALTO" a cada 3 horas.

Tabela 3.10 – Níveis de velocidade média para definição dos tempos de viagem

Nível	CAR	BUS	HPT	HST	AIR
BAIXO	70	60	100	200	400
MÉDIO	90	75	150	250	500
ALTO	110	90	200	300	600

Por fim, os custos da viagem foram estabelecidos em função da distância entre origens e destinos, e dos custos médios de cada modo conforme apresentados na Tabela 3.11. Para os automóveis, os níveis de Custo de Combustível (PE_{CAR}) foram estabelecidos com base em preços regulamentados pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) Agência Nacional de Petróleo (ANP) (ANP, 2013) e os níveis de Pedágio (TO_{CAR}) foram estabelecidos com base no preço médio das rodovias atualmente concessionadas à iniciativa privada segundo a Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias (ABCR) (ABCR, 2013).

Os níveis dos preços das passagens de Ônibus (FA_{BUS}) foram definidos pelas tarifas médias autorizadas pela ANTT (ANTT, 2013) e os das passagens de Avião (FA_{AIR}) com base nas regulações da ANAC (ANAC, 2014a).

Há uma dificuldade para estabelecer o preço da passagem dos trens no Brasil uma vez que esses serviços são praticamente inexistentes no país. Assim, os níveis desses atributos foram definidos com base em estudos de *benchmarking* das tarifas praticadas nos sistemas ferroviários dos países europeus (TAYLOR et al., 2013; PRODAN, 2011).

Tabela 3.11 – Formulação para cálculo dos níveis de custo dos modos de transporte em função da distância média de viagem

MODO	CAR	BUS	HPT	HST	AIR
NÍVEL	$\frac{DI^a}{DM^b} \cdot \text{Combustível (R$/km)}$ + $DI \cdot \text{Pedágio (R$/km)}$	$DI \cdot \text{Preço da Passagem (R$/km)}$			
BAIXO	$\frac{DI}{10} \cdot 2,5 + DI \cdot 0,125$	$DI \cdot 0,1814$	$DI \cdot 0,620$	$DI \cdot 0,676$	$DI \cdot 1,084$
MÉDIO	$\frac{DI}{10} \cdot 3,0 + DI \cdot 0,166$	$DI \cdot 0,2002$	$DI \cdot 0,804$	$DI \cdot 0,794$	$DI \cdot 1,285$
ALTO	$\frac{DI}{10} \cdot 3,5 + DI \cdot 0,220$	$DI \cdot 0,2918$	$DI \cdot 0,919$	$DI \cdot 0,984$	$DI \cdot 1,527$

^aDI = Distância Média entre cidades (km); ^bDM = Desempenho Médio de Automóvel (km/l)

3.2.1.3 Planejamento do Experimento

O planejamento do experimento visa definir a combinação de níveis dos atributos apresentados aos respondentes em cada cenário hipotético (ou linha do experimento) de uma pesquisa. Inicialmente foram definidas as cidades de origem e destino a partir das quais seriam identificados potenciais respondentes para a pesquisa. Como o intuito era identificar a divisão modal em cenários hipotéticos de existência de transporte ferroviário de passageiro com e sem a eventual disponibilidade do modo aéreo, decidiu-se pela definição das cidades em que existe infraestrutura aeroportuária instalada que permite a operação de voos comerciais domésticos regulares.

Assim, foram identificados os dez aeroportos da Região Sudeste com maior movimentação de passageiros no ano de 2011 (Tabela 3.12) segundo uma base de dados da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2013).

Tabela 3.12 – Aeroportos com maior movimentação de passageiros em voos domésticos na Região Sudeste no ano de 2011

CIDADE	PASSAGEIROS (2011)
RIO DE JANEIRO (Santos Dumont)	7.216.030
SÃO PAULO (Congonhas)	6.727.822
BELO HORIZONTE (Pampulha)	4.863.637
ARAÇATUBA	2.274.262
IPATINGA	2.209.371
GOVERNADOR VALADARES	1.894.309
CAMPINAS	1.183.575
VITÓRIA	1.128.600
RIBEIRÃO PRETO	968.216
CAMPOS DOS GOYTACAZES	695.691

Uma vez que os aeroportos de Belo Horizonte (Pampulha), Ipatinga e Governador Valadares são muito próximos, este último foi substituído pelo aeroporto de Campos dos Goytacazes. Entre cada um desses aeroportos foram identificadas as distâncias rodoviárias e estabelecidas aproximações para esses valores, a partir dos quais foram definidos os níveis dos atributos de cada modo de transporte conforme estabelecido na Tabela 3.11 a respeito dos custos de viagem.

Das 58 possíveis combinações entre cidades com aeroportos, foram escolhidas as 38 mais representativas (Tabela 3.13) quanto ao porte das cidades e número de passageiros transportados, de modo a garantir a diversificação das distâncias entre origens e destinos, ou a variabilidade dos níveis de tempo e custos de viagens apresentados aos respondentes.

Tabela 3.13 – Cidades de origem, destino, distâncias rodoviárias aproximadas e distâncias estabelecidas para definição dos níveis dos atributos

Origem	Destino	Distância Rodoviária	Distância Estabelecida	Origem	Destino	Distância Rodoviária	Distância Estabelecida
VCP	CGH	103	100	PLU	VIX	527	520
CGH	VCP	103	100	SDU	VIX	516	520
CAW	MEA	105	100	VIX	PLU	527	520
SDU	JDF	178	235	CAW	PLU	525	520
IPN	PLU	235	235	IPN	SDU	563	565
PLU	IPN	235	235	CGH	PLU	584	580
CAW	VIX	243	235	PLU	CGH	584	580
VCP	BAU	261	235	VCP	PLU	579	580
CAW	SDU	275	320	PLU	SJP	671	670
RAO	CGH	318	320	RAO	SDU	715	715
CGH	RAO	318	320	SDU	RAO	715	715
SDU	CGH	430	440	CAW	CGH	712	715
CGH	SDU	430	440	CGH	IPN	801	800
SDU	PLU	437	440	IPN	CGH	802	800
VCP	SDU	430	440	VIX	CGH	941	940
IPN	VIX	430	440	CGH	VIX	941	940
PLU	SDU	437	440	PLU	PPB	956	955
RAO	PLU	516	520	SDU	UDI	982	980
VIX	SDU	516	520	VCP	VIX	999	1000

BAU = Bauru; PLU = Belo Horizonte (Pampulha); VCP = Campinas; CAW = Campos dos Goytacazes; IPN = Ipatinga; JDF = Juiz de Fora; MEA = Macaé; PPB = Presidente Prudente; RAO = Ribeirão Preto; SDU = Rio de Janeiro (Santos Dumont); SJP = São José do Rio Preto; CGH = São Paulo (Congonhas); UDI = Uberlândia ;VIX = Vitória.

Basicamente, podem ser distinguidas cinco abordagens no âmbito do planejamento de experimentos para pesquisas de preferência declarada: Fatorial Completo (*Full Factorial*), Fatorial Fracionado (*Fractional Factorial*), Fatorial Fracionado Ortogonal (*Orthogonal Fractional Factorial*), Fatorial Fracionado *D*-Ótimo (*D-Optimal Fractional Factorial*) e Fatorial Fracionado *D*-Eficiente (*D-Efficient Fractional Factorial*).

A abordagem mais simples (Fatorial Completo) contempla todas as possibilidades de combinações de níveis dos atributos e apresenta crescimento exponencial do número de linhas (questões apresentadas aos respondentes) do experimento pela inserção de novos atributos e níveis. Por outro lado, o planejamento Fatorial Fracionado é definido como um subconjunto de todas as combinações do fatorial completo, podendo ser escolhidas aleatoriamente ou pela divisão dessas combinações em conjuntos apresentados aos participantes.

O planejamento Fatorial Fracionado Ortogonal diferencia-se do Fatorial Fracionado pelo balanceamento dos níveis dos atributos na escolha do subconjunto de linhas do experimento e garantia de ortogonalidade na escolha das linhas do subconjunto formado.

Mais recentemente, os planejamentos Fatorial Fracionado *D*-Ótimo e Fatorial Fracionado *D*-Eficiente têm sido sugeridos como alternativa aos fatoriais fracionados convencionais (ROSE; BLIEMER, 2008). Na definição desses experimentos, os pesquisadores consideram eficiência em termos da minimização da variância (raiz quadrada do erro padrão) dos parâmetros estimados nos modelos de escolha modal (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011), de modo que existe um valor mínimo global para essa variância que define um planejamento *D*-Ótimo.

Em termos práticos, esse método exige inferências a respeito dos valores iniciais sobre os parâmetros associados aos atributos podendo-se, inclusive, atribuir valores nulos quando as suas tendências são desconhecidas (STREET; BUNCH; MOORE, 2001; STREET; BURGESS, 2004; STREET; BURGESS; LOUVIERE, 2005).

Existem atualmente diferentes softwares para obtenção de experimentos com base nas diferentes abordagens descritas. O CHOICE METRICS (2014) é uma ferramenta computacional difundida por permitir o desenvolvimento de experimentos elaborados, inclusive pela abordagem de planejamento eficiente. Por outro lado, apesar de mais limitado em termos de métodos disponíveis, o SPSS (2008) também é amplamente utilizado no planejamento de experimentos.

Apesar do planejamento eficiente referir-se ao estado-da-arte no planejamento de experimentos, o objetivo é obter um conjunto de combinações dos níveis dos atributos caracterizados anteriormente para aplicação prática viável. Assim, optou-se pela utilização da abordagem fatorial fracionado ortogonal utilizando-se o *software* SPSS (2008) devido à disponibilidade de licença e da adequação dos seus resultados aos propósitos da pesquisa.

Portanto, para cada par OD com aeroportos em operação (Tabela 3.13), a execução do planejamento ortogonal pelo referido *software* resultou em 27 linhas (situações hipotéticas para escolha modal) para os cenários *HPT* sem *AIR*, *HPT* com *AIR*, *HST* sem *AIR* e *HST* com *AIR*.

Apesar de todas as cidades possuírem aeroportos (não necessariamente com conexões diretas entre as cidades da Tabela 3.13), o primeiro e o terceiro cenários foram estabelecidos sem a disponibilidade do modo aéreo para que fosse possível modelar a escolha modal entre cidades que não possuíssem este modo disponível na eventualidade da operação de serviços ferroviários.

Considerando que 27 questões apresentadas para um mesmo respondente são excessivas e que os resultados de escolha modal poderiam ser tendenciosos, o experimento resultante entre cada par OD foi dividido em três blocos de nove questões, como exemplificado na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 – Exemplo de bloco para um cenário de *HST* com *AIR* de 400 km

TT_{CAR}	TT_{BUS}	TT_{HST}	TT_{AIR}	FR_{BUS}	FR_{HST}	FR_{AIR}	FA_{BUS}	FA_{HST}	FA_{AIR}	PE_{CAR}	TO_{CAR}
6h50	8h15	2h55	1h10	12	6	6	170	570	750	150	70
6h50	7h15	2h20	1h	12	12	3	170	460	750	200	100
6h30	7h45	2h20	1h10	3	12	6	110	390	750	150	100
6h05	7h15	1h55	1h25	3	6	3	170	570	890	150	100
6h50	8h15	2h55	1h25	6	12	3	110	390	890	150	130
6h50	7h45	1h55	1h10	3	12	3	120	570	630	170	70
6h05	7h15	1h55	1h	12	12	12	110	390	630	150	70
6h30	8h15	1h55	1h10	12	6	12	120	390	890	200	100
6h50	7h15	2h20	1h25	3	6	6	120	390	630	200	130

Tal como explicitado, uma replicação do experimento entre um par OD implica na identificação de 24 respondentes (três blocos para os quatro cenários preestabelecidos, pelos dois motivos de viagem), o que resulta em 216 escolhas disponíveis para posterior modelagem.

Apesar de existirem diversas plataformas para execução de pesquisas *online* dessas natureza – como *Bristol Online Surveys* (BOS, 2013), *SurveyMonkey* (SURVEYMONKEY, 2013) –, a plataforma *Qualtrics* (QUALTRICS, 2013) foi utilizada para diagramação do experimento em uma configuração amigável aos participantes. A vasta disponibilidade de recursos visuais da ferramenta, as possibilidades de interação do usuário e o acesso a uma licença comercial foram os fatores que influenciaram nessa escolha.

Nessa configuração, os blocos são escolhidos aleatoriamente no início da pesquisa, a ordem de alternativas dos modos de transporte é mantida constante em cada linha do experimento e o respondente pode participar uma única vez da pesquisa.

Além disso, foi de interesse identificar participantes que tivessem realizado pelo menos uma viagem entre algum dos pares OD pela correlação da acurácia das respostas em relação ao conhecimento do usuário sobre as características das cidades, da infraestrutura de transporte existente e da viagem.

A definição do tamanho da amostra (número de participantes) da pesquisa de preferência declarada é um item importante para as etapas posteriores de modelagem das respostas obtidas. Lemeshow et al. (1990) propõem duas abordagens para definição da amostragem: a prospectiva,

em que se define o número de respostas necessárias para ajustar um modelo de regressão com significância estatística aceitável; e a retrospectiva, na qual é verificado se os dados obtidos em uma pesquisa são suficientes para calibrar um modelo adequadamente.

No contexto da primeira abordagem, Orme (1998) apresenta a Equação 3.20 como uma regra para a definição da amostra mínima para posterior modelagem de escolha modal.

$$n \geq 500 \cdot \frac{c}{a \cdot t} \quad (3.20)$$

onde n = número estimado de respondentes; a = maior número de níveis dos atributos; c = número de alternativas apresentadas ao participante; t = número de linhas resultantes do planejamento do experimento.

Lemeshow et al. (1990) também apresentam uma formulação para estimação desse parâmetro do ponto de vista de um teste estatístico de hipóteses para calibração de modelos Logit Binomiais e diversos outros autores tratam do tema sob a mesma perspectiva (*e.g.* WHITTEMORE, 1981; HSIEH, 1989; DESU, 2012; DATTALO, 2008; e MATHEWS, 2010). Hsieh (1989) apresenta uma correção para o modelo de Whittemore (1981) na estimativa de modelos *Logit Multinomial*.

De maneira mais pragmática, Peduzzi et al. (1996) demonstra que 10 eventos por parâmetro a ser estimado na etapa de modelagem são necessários para minimizar o viés na estimação das variâncias nos teste de significância das variáveis. Rose e Bliemer (2013) apresentam uma formulação para definição do tamanho de uma amostra baseado no valor desejado da estatística t que exige uma estimativa prévia dos valores dos parâmetros associados aos atributos.

A literatura mostra que o tema não está definitivamente esclarecido – *e.g.* nos argumentos apresentados por Agresti (1996) e nas duas formulações apresentadas por Adedayo e Agunbiade (2013) – e outras pesquisas são necessárias para consolidação de uma regra específica que abranja a maioria das pesquisas de preferência declarada.

No caso da pesquisa conduzida nesta tese, o fator determinante na definição do tamanho da amostra foi o orçamento disponível para identificação dos participantes, coleta das respostas e consolidação dos dados.

Com o intuito de avaliar a eficácia da pesquisa, uma versão piloto foi lançada entre os dias 2 de Setembro e 20 de Setembro de 2013 através de mídias eletrônicas (redes sociais, envio de e-mails) e apoio de uma agência de comunicação universitária. Nesse período, 184 pessoas acessaram a pesquisa (a maioria concentrada nos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro) e apenas 37 participantes (20,1%) a finalizaram.

A execução dessa versão preliminar permitiu o aprimoramento da formatação da pesquisa para o lançamento da versão final, apesar da baixa adesão e impossibilidade do uso das respostas na calibração de um modelo de escolha modal.

3.2.1.4 Aplicação do Questionário

O questionário resultante da diagramação das linhas do planejamento ortogonal do experimento é descrito a seguir. Ao acessar o link da pesquisa *online* o respondente depara-se com uma primeira página com explicação do propósito da pesquisa. Em seguida, o participante segue para uma tela (Figura 3.10) representativa da Região Sudeste na qual pode escolher a cidade de onde está respondendo a pesquisa (no caso, a origem de uma viagem) e, caso não esteja em nenhuma das localidades existe uma alternativa que encerra a pesquisa.

Caso uma, e somente uma, das localidades seja escolhida, o respondente é conduzido para uma segunda página (Figura 3.11) em que deve escolher uma cidade para onde já tenha realizado pelo menos uma viagem no passado dentre as alternativas de destino apresentadas na Tabela 3.13. Caso nunca tenha viajado para nenhum desses destinos uma opção também é disponibilizada para encerramento do questionário.

No caso de prosseguimento da pesquisa, uma tela surge para escolha do modo de transporte que foi utilizado em uma viagem anterior entre a origem e o destino definidos (Figura 3.12), sendo orientado que essa viagem seja tomada como referência para as demais respostas às perguntas subsequentes. Nas telas seguintes, o participante é questionado sobre as características dessa viagem quanto ao motivo (Figura 3.13) e tempos de acesso e egresso (se existentes como exemplificado na Figura 3.14) e uma estimativa desses tempos aos terminais dos modos alternativos àquele escolhido (inclusive para as estações ferroviárias uma vez que todas as cidades escolhidas possuem essa infraestrutura, mesmo que fora de operação).

Escolha a cidade de onde você está respondendo este questionário.

- Clique no nome de apenas uma cidade e este será destacado por um quadro verde. Se quiser alterar, clique novamente no nome e escolha outra cidade.
- Se a sua cidade não está apresentada na figura, clique em "NÃO ESTOU EM NENHUMA DESSAS CIDADES".

Clique em "CONTINUAR>>" após a escolha.

CONTINUAR>>

Figura 3.10 – Escolha da cidade de origem de onde o participante respondeu a pesquisa

Escolha um destino para onde você já tenha viajado a partir de Campinas.

- Clique no nome de apenas uma cidade e este será destacado por um quadro verde. Se quiser alterar, clique novamente no nome e escolha outra cidade.
- Considere esta viagem ao responder as perguntas do questionário.
- Se você nunca viajou para nenhum dos destinos, clique em "NUNCA VIAJEI PARA NENHUM DESSSES DESTINOS".

Clique em "CONTINUAR>>" após a escolha.

CONTINUAR>>

Figura 3.11 – Escolha de um destino para onde o participante já tenha viajado

Qual modo de transporte você utilizou na viagem entre Campinas e Belo Horizonte?

☒ Ônibus

☐ Automóvel

☐ Avião

CONTINUAR>>

Figura 3.12 – Escolha do modo da viagem realizada pelo participante

Qual foi o motivo de sua viagem? (Considere este motivo ao responder as perguntas do questionário)

☒ Negócios

☐ Lazer ou Outros (saúde, visita a familiares etc.)

CONTINUAR>>

Figura 3.13 – Escolha do motivo da viagem realizada pelo participante

Quanto tempo você levou para chegar à rodoviária de Campinas?

Entre 15 e 30 minutos ▼

Quanto tempo você levou para chegar ao seu destino final a partir da rodoviária de Belo Horizonte?

Entre 30 minutos e 1 hora ▼

CONTINUAR>>

Figura 3.14 – Obtenção de informações a respeito da viagem realizada

Ao final dessa etapa, uma tela é apresentada ao usuário com a caracterização dos modos de transporte disponíveis para escolha (Figura 3.15). Os modos apresentados para cada participante são escolhidos aleatoriamente e mantêm-se os mesmos durante toda a pesquisa, alterando-se apenas os níveis dos respectivos atributos.

Leia as seguintes características dos modos de transporte que devem ser consideradas ao responder as perguntas do questionário.

AUTOMÓVEL

- Disponível para viagens de longa distância.
- Baixa confiabilidade (suscetível a atrasos devido à condições de tráfego).

ÔNIBUS

- SEM serviço de bordo.
- Baixa confiabilidade (suscetível a atrasos devido à condições de tráfego).

TREM DE ALTA VELOCIDADE

- COM serviço de bordo em vagão exclusivo.
- Check-in obrigatório com 30 MINUTOS DE ANTECÊNDIA antes da partida.
- Serviços operam entre 6am e 10pm.
- Alta confiabilidade(sem atrasos nas partidas e chegadas).

AVIÃO

- COM serviço de bordo em camarotes.
- Check-in obrigatório com 1 HORA DE ANTECÊNDIA antes da partida.
- Serviços operam entre 6am e 10pm.
- Média confiabilidade (atrasos e/ou cancelamentos devido a condições operacionais e/ou climáticas adversas)

Clique em "CONTINUAR>>" após ler as instruções.

CONTINUAR>>

Figura 3.15 – Caracterização dos modos de transporte considerados na pesquisa

As nove telas subsequentes dizem respeito à escolha modal sujeita aos valores dos níveis dos atributos de cada modo disponibilizado conforme ilustrado na Figura 3.16.

Qual modo de transporte você escolheria para uma viagem entre Campinas e Belo Horizonte?
(atenção para as alterações dos tempos de viagem, custos e frequências entre essa questão e as anteriores/posteriores)

CENÁRIO 2

<p>AUTOMÓVEL Tempo de Viagem: 6h05 Combustível: R\$ 150,00 Pedágio: R\$ 130,00</p> ☐	<p>ÔNIBUS Tempo de Viagem: 7h15 Passagem: R\$ 120,00 Frequência: 6 horas</p> ☐	<p>TREM DE ALTA VELOCIDADE Tempo de Viagem: 1h55 Passagem: R\$ 460,00 Frequência: 3 horas</p> <p>check-in com 30 minutos de antecedência</p> ☐	<p>AVIÃO Tempo de Viagem: 1h10 Passagem: R\$ 750,00 Frequência: 6 horas</p> <p>check-in com 1 hora de antecedência</p> ☐
---	---	--	---

CONTINUAR>>

Figura 3.16 – Cenário de escolha modal mediante diferentes níveis de atributos (equivalente a uma linha do planejamento ortogonal)

Na sequência, uma tela é apresentada para obtenção a opinião do respondente a respeito do realismo dos valores dos atributos e disponibilização de um espaço para comentários abertos. Finalmente, a última tela apresenta questões de caráter socioeconômico como idade, se o respondente possui emprego formal, a sua renda média familiar, o número de pessoas que vivem na residência e sobre a posse de carteira nacional de habilitação (Figura 3.17)

INFORMAÇÕES PESSOAIS
As respostas são confidenciais e de uso restrito para a pesquisa de doutorado.

Qual é a sua idade?

▼

Você tem um emprego formal, com carteira assinada?

☐ Sim
☐ Não

Quantas pessoas moram na sua residência?

▼

Qual é a soma da renda média mensal das pessoas que moram na sua residência?

▼

Você possui Carteira Nacional de Habilitação (CNH)?

☐ Sim
☐ Não

CONTINUAR>>

Figura 3.17 – Obtenção de informações socioeconômicas

Uma empresa especializada na realização de pesquisas *online* foi contratada para execução da versão final da pesquisa de preferência declarada, realizada entre os dias 24 de Outubro e 5 de Novembro de 2013, com garantia de sigilo dos dados do participante mediante a política de privacidade da empresa, que pode ser acessada no *hyperlink* [Política de Privacidade - Livra](#).

A pesquisa com duração média de 10 minutos teve a participação de 580 respondentes virtuais, dos quais 279 (48%) declararam ter viajado pelo menos uma vez entre um dos pares de cidades propostos por motivo de trabalho, e 301 (52%) por motivo lazer ou outros. Como cada participante respondeu a nove cenários hipotéticos de escolha modal, a Tabela 3.15 apresenta o total de respostas obtidas segundo a tecnologia ferroviária disponibilizada para escolha e a eventual oferta do modo Aéreo entre as cidades.

Tabela 3.15 – Número de repostas obtidas na pesquisa de preferência declarada

Cenário	HPT sem AIR			HPT com AIR			HST sem AIR			HST com AIR		
Motivo	W	L	Total	W	L	Total	W	L	Total	W	L	Total
Número de repostas	729	549	1278	639	603	1242	612	648	1260	711	729	1440

A Figura 3.18 apresenta uma análise preliminar das respostas obtidas na pesquisa em relação à distribuição da escolha dos modos em cada cenário estabelecido, demonstrando que a combinação dos atributos e seus respectivos níveis permitiu captar o comportamento dos usuários em relação à escolha modal, sem a predominância de um modo de transporte.

Figura 3.18 – Distribuição da escolha dos modos de transporte na pesquisa *online*

Nos cenários com oferta de *HPT* observa-se uma proporcionalidade nas escolhas dos modos de transporte sem a predominância de uma alternativa específica ou padrão de escolha modal em função do motivo de viagem e disponibilidade do modo Aéreo. Por outro lado, nos cenários com oferta de serviços de *HST* há uma tendência de escolha desse modo em detrimento dos demais, sobretudo na ausência da oferta de transporte aéreo.

3.2.2 Análise dos Dados Coletados na Pesquisa

Nesta seção são apresentadas considerações sobre as informações coletadas na pesquisa. Inicialmente apresenta-se um histograma (Figura 3.19) do número de respondentes obtidos em cada par de origem e destino indicado na Tabela 3.13. Apesar de ser desejável uma uniformidade de respostas entre pares OD, observa-se uma concentração nas principais cidades e regiões metropolitanas (São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Campinas e Ribeirão Preto).

Figura 3.19 – Número de respostas entre pares Origem-Destino (siglas na Tabela 3.13)

Foram coletados dados quanto às características das viagens realizadas como referência para responder ao questionário. Nesse grupo enquadra-se primeiramente o meio de transporte utilizado nessas viagens (Figura 3.20), com uma distribuição homogênea entre os modos existentes.

Figura 3.20 – Modos de transporte utilizados nas viagens realizadas pelos participantes

A seguir, a Figura 3.21 e Figura 3.22 resumem os tempos para o acesso e o egresso, respectivamente, aos terminais de transporte para as viagens realizadas pelo modo Ônibus ou Avião.

Figura 3.21 – Histograma dos tempos de acesso nas viagens realizadas

Figura 3.22 – Histograma dos tempos de egresso dispendidos nas viagens realizadas

Ainda em relação aos tempos de acesso e egresso, a Figura 3.23 e Figura 3.24 indicam respectivamente os valores estimados pelos participantes para os modos de transporte que não foram utilizados nas viagens realizadas.

Nesse caso, observa-se que ambos os tempos de acesso e egresso apresentam concentração no intervalo entre 30 minutos e 1 hora (na mesma tendência que as respostas dos tempos efetivamente utilizados para acessar as rodoviárias e aeroportos na Figura 3.21 e Figura 3.22), com

elevada taxa de respostas "Não sei" às estações ferroviárias (modo Trem), as quais podem ser justificadas pela inexistência de serviços ferroviários na maioria das cidades consultadas.

Quanto às características socioeconômicas dos respondentes, a Figura 3.25 apresenta um histograma de idade, das características de empregabilidade formal, número de pessoas residentes no mesmo domicílio, renda total familiar e posse de carteira nacional de habilitação (CNH) .

Quanto à idade observa-se uma distribuição uniforme e ligeira concentração na faixa de 30 a 45 anos (interpretada como uma amostra da população economicamente ativa). Ainda, a maioria dos respondentes declarou que possui emprego formal (55,2%) e CNH (70,6%) no momento da pesquisa. Finalmente, observa-se o tamanho médio da família em domicílios com 3 pessoas, seguidas de 2 e 4 pessoas, e renda média familiar entre R\$2.500,00 e R\$3.500,00, seguida do intervalo entre R\$1.500,00 e R\$2.500,00.

O último conjunto de dados obtidos caracteriza as opiniões dos respondentes acerca do realismo dos atributos e respectivos níveis apresentados para escolha dos modos de transporte. Quanto a este item, os gráficos da Figura 3.26 à Figura 3.28 são apresentados em relação às escolhas sobre realismo dos níveis dos atributos com diferentes possibilidades de escolha: muito irrealista, irrealista, não sabe, realista e muito realista.

Figura 3.23 – Histograma dos tempos de acesso estimados para os modos de transporte não utilizados nas viagens realizadas

Figura 3.24 – Histograma dos tempos de egresso estimados para os modos de transporte não utilizados nas viagens realizadas

(a) Idade

(b) Vínculo Empregatício

(c) Residentes no Domicílio

(d) Renda Média Familiar

(e) Posse de CNH

Figura 3.25 – Distribuição dos valores observados dos atributos socioeconômicos

TT_{CAR} PE_{CAR} TO_{CAR}

Figura 3.26 – Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Automóvel (CAR)

Figura 3.27 – Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Ônibus (BUS)

Figura 3.28 – Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo Avião (AIR)

Figura 3.29 – Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo HPT

Figura 3.30 – Opinião dos respondentes a respeito do realismo dos níveis dos atributos de caracterização das viagens pelo modo HST

A análise dos gráficos da Figura 3.26, Figura 3.27 e Figura 3.28 indica que os respondentes consideraram, em sua maioria, os níveis dos atributos que caracterizam o tempo de viagem (TT), custo de combustível (PE), custo de pedágio (TO) dos automóveis como realistas, bem como o custo da passagem (FA) e frequência (FR) dos modos Ônibus e Avião, todos com maioria de resposta secundária igual a "Não sabe".

Em relação ao modo ferroviário, tanto para o *HPT* (Figura 3.29) quanto para o *HST* (Figura 3.30) observa-se uma predominância da resposta "Não sei" seguida de "Realista" para todos os atributos que os caracterizam, dado que a primeira pode refletir a inexperiência da população sobre a realidade operacional do transporte ferroviário de passageiros. Porém, as opiniões dos participantes indicam que a formulação da pesquisa atendeu satisfatoriamente os requisitos de investigação da propensão à escolha modal desta tese.

Finalmente, são apresentadas as transcrições diretas e algumas opiniões gerais dos participantes a respeito da pesquisa em espaço disponibilizado para digitação de um texto limitado a 160 caracteres. Essas opiniões permitem inferir que a aplicação do questionário corrobora a afirmação de que um padrão comportamental no âmbito de planejamento de novas infraestruturas de transporte é um processo iterativo e em constante amadurecimento.

"Muito Bom! Gostei de ver a comparação de todos os transportes juntos. Ainda prefiro o carro, pois teria que gastar com táxi ida e volta até chegar ao destino."

"Levo mais em consideração o ônibus pois em relação ao trem é mais barato e em relação ao carro é mais barato e confortável."

"No início não havia entendido, porém estão baseadas em informações concretas nas quais já tive experiências."

"Prefiro viajar de avião, mas procuro a opção mais em conta. A escolha pelo ônibus foi devido ao custo e por ser confortável."

"Dependendo da emergência da viagem, o valor da passagem de avião não influencia, mas, por gosto mesmo e pra aproveitar melhor a viagem, prefiro veículo próprio."

"O questionário é interessante embora eu não tenha conhecimento dos parâmetros para trens, o que trouxe uma certa dificuldade para opinar."

3.2.3 Modelagem de Escolha Modal

A modelagem da escolha modal pode ser definida como um problema de reconhecimento de padrões comportamentais explicados por múltiplas variáveis que caracterizam as escolhas de alternativas (XIE; LU; PARKANY, 2003). Esse reconhecimento pode ser através de técnicas de mineração de dados para investigar o comportamento individual em relação à escolha modal, ou pela aplicação da modelagem como a baseada nos princípios da teoria da utilidade.

Em geral, as respostas de uma pesquisa são avaliadas por métodos de segregação de dados como árvores de decisão (AD) (XIE; LU; PARKANY, 2003; SHMUELI; SALOMON; SHEFER, 1996; PITOMBO; KAWAMOTO; SOUSA, 2011) ou pela calibração de modelos baseados de maximização da utilidade (WILLIAMS, 1978; AHERN; TAPLEY, 2008; GRANGE et al., 2013).

A AD é uma técnica de simples classificação das relações entre atributos de um conjunto de dados e permite segregar as informações coletadas em um número finito de classes através de regras hierárquicas, organizando-as de maneira compacta e permitindo uma visão geral da natureza do fenômeno estudado (QUINLAN, 1983).

Isler e Pitombo (2014) apresentam os resultados da aplicação dessa técnica aos dados da pesquisa de preferência declarada descrita na seção anterior como método alternativo à modelagem proposta nesta tese, cujas comparações são apresentadas ao final deste capítulo.

Ortúzar e Willumsen (2011) descrevem um modelo agregado da propensão à escolha modal, cujo custo generalizado das viagens em cada modo de transporte viabiliza o cálculo da probabilidade de escolha conforme exemplificado na Equação 3.21. Os autores apresentam também alternativas de modelos sintéticos como o de distribuição e escolha modal simultânea (fundamentado pela teoria de maximização da entropia) e o baseado na teoria comportamental de escolha racional Williams e Senior (1977).

$$P_{ij}^k = \frac{(C_{ij}^k)^{-n}}{\sum_1^k (C_{ij}^k)^{-n}} \quad (3.21)$$

onde C_{ij}^k = custo generalizado da viagem entre a origem i e o destino j pelo modo k ; n = parâmetro de calibração.

Por outro lado, os modelos de demanda direta permitem estimar as viagens entre origens e destinos agregando as etapas de geração, distribuição e escolha modal simultaneamente. Esses modelos diretos relacionam-se às variáveis econométricas a exemplo de Kraft (1968), que estabelece uma equação multiplicativa de variáveis socioeconômicas e os atributos dos modos de transporte (Equação 3.22).

$$T_{ij}^k = \phi \cdot (P_i \cdot P_j)^{\theta_{k1}} \cdot (I_i \cdot I_j)^{\theta_{k2}} \cdot \prod_m \left[(t_{ij}^m)^{\alpha_{km}^1} \cdot (c_{ij}^m)^{\alpha_{km}^2} \right] \quad (3.22)$$

em que P_i e P_j são as populações das zonas i e j ; e I_i e I_j são as renda *per capita* das zonas i e j ; t = tempo de viagem pelo modo de transporte m ; c = custo monetário pelo modo de transporte m ; ϕ , θ e α são coeficientes de calibração.

Apesar de atraentes do ponto de vista de aplicação, por permitirem relacionar simultaneamente a geração, distribuição e divisão modal, esses modelos podem ser problemáticos na tentativa de representação da realidade devido ao elevado número de parâmetros a serem estimados (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Uma abordagem alternativa para o equacionamento também pode ser verificada em Domencich, Kraft e Valette (1968), que propõem termos lineares e exponenciais em complemento à equação sob forma multiplicativa exemplificada.

Porém, a partir da década de 1980 os modelos de escolha discreta passaram a ser uma alternativa prática (WILLIAMS, 1981), cuja definição é formalizada por Ortúzar e Willumsen (2011) como *"a probabilidade dos indivíduos escolherem uma opção entre um conjunto de alternativas preestabelecidos como função das suas características socioeconômicas e da atratividade relativa da opção escolhida"*.

Assim, em detrimento das abordagens apresentadas anteriormente, surgiram os modelos desagregados de escolha discreta que consideram informações sobre as escolhas individuais mediante um conjunto de alternativas apresentadas a potenciais usuários no caso de operação futura de um novo sistema de transporte. Essa abordagem permite retratar convenientemente as respostas de uma pesquisa de preferência declarada tal como aquela descrita neste capítulo.

3.2.3.1 Modelagem de Escolha Discreta

A abordagem teórica mais comum para definição de modelos de escolha discreta baseia-se na teoria de utilidade (DOMENCICH; MCFADDEN, 1975; WILLIAMS; SENIOR, 1977), mediante as seguintes premissas (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011):

- Os indivíduos pertencem a uma população homogênea Q , agem racionalmente em um ambiente com assimetria de informações e buscam maximizar sua utilidade pessoal segundo restrições legais, sociais, físicas e de orçamento;
- Existe um conjunto de alternativas a serem escolhidas $A = \{A_1, \dots, A_j, \dots, A_N\}$ e um conjunto X de vetores de atributos relacionados aos indivíduos e às respectivas alternativas por eles escolhidas. Um indivíduo q possui os atributos $x \in X$ e sua escolha é caracterizada por $A(q) \in A$.
- Cada alternativa $A_j \in A$ possui uma utilidade U_{ijq} correspondente ao indivíduo q . Dado que o planejador não possui todas as informações a respeito dos elementos que remetem à escolha do indivíduo, a sua utilidade é definida por duas componentes: uma parcela mensurável V_{ijq} descrita como uma função dos atributos x da escolha do indivíduo; e uma parcela aleatória que representa as particularidades do indivíduo e possíveis erros inerentes à modelagem. Assim, a utilidade de uma escolha pode ser especificada por:

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad (3.23)$$

A parcela determinística dessa equação mais recorrente na literatura é definida como uma função linear de atributos (x_{jkq}) e seus respectivos pesos (θ_{kj}), tal como exemplificado na Equação 3.24 a seguir.

$$V_{jq} = \sum_k \theta_{kj} \cdot x_{jkq} \quad (3.24)$$

Sob a premissa de homogeneidade da população, a parcela aleatória ε_{jq} da Equação 3.23 pode ser representada por uma variável aleatória com média 0 (zero) e distribuição de probabilidade específica.

- O indivíduo seleciona a alternativa que maximiza a sua utilidade, ou seja, a alternativa A_j é escolhida somente se

$$U_{jq} \geq U_{iq} \quad \forall A_i \in A(q) \quad (3.25)$$

ou seja

$$V_{jq} - V_{iq} \geq \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq} \quad (3.26)$$

Uma vez que o analista desconhece os valores de ε_{iq} e ε_{jq} , é impossível garantir essa desigualdade. Assim, a probabilidade de escolha da alternativa A_j é caracterizada como:

$$\begin{aligned} Prob_{jq} &= Prob(V_{jq} - V_{iq} \geq \varepsilon_{iq} - \varepsilon_{jq}) \\ &= Prob(\varepsilon_{iq} \leq \varepsilon_{jq} + V_{jq} - V_{iq}) \quad \forall A_i \in A(q) \end{aligned} \quad (3.27)$$

Dado que a parcela aleatória da escolha de um indivíduo é desconhecida, os resíduos ε_{iq} e ε_{jq} podem ser caracterizados por uma função de distribuição de probabilidade $f(\varepsilon)$, em geral definida como uma função com resíduos independentes e igualmente distribuídos (*Independent and Identically Distributed - IID*).

Em geral, os resíduos caracterizados por $f(\varepsilon)$ são representados por uma função *IID* de *Gumbell* (Equação 3.28) e a probabilidade de escolha do modo j pelo indivíduo q é definida como um modelo *Logit Multinomial - MNL* (DOMENCICH; MCFADDEN, 1975)

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[\frac{\varepsilon - \mu}{\sigma} - \exp \left(\frac{\varepsilon - \mu}{\sigma} \right) \right] \quad \varepsilon \in (-\infty, \infty) \quad (3.28)$$

Assim, dada a função $f(\varepsilon)$ de *Gumbell*, a probabilidade de escolha da alternativa j pelo indivíduo q é caracterizada pela Equação 3.29 considerando a desigualdade da Equação 3.27.

$$Prob_{jq} = \frac{e^{(V_{jq})}}{\sum_{A_i \in A(q)} e^{V_{iq}}} \quad (3.29)$$

Para estimativa dos coeficientes da função utilidade V_{iq} no âmbito da escolha modal, suponha que uma amostra Q de indivíduos provê valores da variáveis γ_{jkq} a respeito da escolha do modo de transporte k tal que: $\gamma_{jq} = 1$, se a alternativa A_j é escolhida por q ; e $\gamma_{jq} = 0$, caso contrário.

Uma vez que essas observações a respeito do comportamento dos usuários são independentes, uma função de verossimilhança pode ser definida pelo produto das probabilidades de escolha de cada indivíduo tal como caracterizado na Equação 3.30.

$$L(\theta) = \prod_{A_j \in A(q)} \prod_{q=1}^Q (Prob_{jq})^{\gamma_{jq}} \quad (3.30)$$

onde $Prob_{jq}$ = probabilidade de escolha da alternativa j pelo indivíduo q .

Assim, os parâmetros θ da parcela determinística da função utilidade representada sob a forma linear da Equação 3.24 podem ser estimados derivando-se a função logarítmica de $L(\theta)$ parcialmente em relação àqueles parâmetros e igualando-a a zero (ORTUZAR, 1982). Assim, a maximização da verossimilhança para estimativa de θ_{kj} é dada por :

$$l(\theta) = \log L(\theta) = \sum_{q=1}^Q \sum_{A_j \in A(q)} \gamma_{jq} \cdot \log P_{jq} = 0 \quad (3.31)$$

Nessas condições, a maximização da verossimilhança resulta em valores médios para os coeficientes das funções utilidade e as respectivas covariâncias são calculadas a partir das derivadas de segunda ordem de $\log L(\theta)$, tal como caracterizado na Equação 3.32, que resulta em uma matriz de covariância dos coeficientes.

$$S^2 = - \left(E \left(\frac{\partial^2 l(\theta)}{\partial \theta^2} \right) \right)^{-1} \quad (3.32)$$

Apesar dessas expressões explícitas para obtenção dos parâmetros θ_{kj} e cálculo de uma matriz de covariância S^2 , a resolução da igualdade $\log L(\theta) = 0$ envolve um processo iterativo quando se trata de uma função de verossimilhança com mais de um estimador.

Os modelos *Probit Multinomial* e *Mixed Logit* consideram diferentes equações de estimativa da probabilidade de escolha modal em detrimento daquela especificada na Equação 3.29. Por outro lado, os modelos *Nested Logit* integram as propriedades do *Multinomial Logit* considerando a utilidade conjunta de escolha de um modo. Maiores informações a respeito desses modelos podem ser obtidas em Ortúzar e Willumsen (2011).

3.2.3.2 Avaliação de Modelos *Logit Multinomial*

Existem testes estatísticos de hipótese para análise da significância dos coeficientes estimados na função utilidade de caracterização dos modos de transporte e para comparação de desempenho entre modelos especificados.

- **Teste t de Significância dos Atributos**

A Equação 3.33 considera que os estimadores θ_{kj} possuem variância s_{kk} tal que se a média $\theta_k = 0$ em $f(\theta, S^2)$ tem distribuição normal padrão $[N(0, 1)]$, então a estatística t é:

$$t = \frac{\theta_k^*}{s_{kk}} \quad (3.33)$$

Nesse caso, é possível verificar se θ_{kj} é estatisticamente diferente de zero a um nível de significância preestabelecido. Valores suficientemente grandes de t (em geral maiores que 1,96 para níveis de confiança de 95%) permitem não rejeitar hipótese nula de que $\theta_{kj} = 0$ e, portanto, o k -ésimo estimador da função utilidade afeta significativamente a probabilidade de escolha do modo de transporte j .

- **Teste de Razão de Verossimilhança**

É possível avaliar se um modelo definido por coeficientes genéricos (denominado modelo restrito) é mais adequado do que aquele com valores específicos para cada atributo do ponto de vista estatístico. Para isso, a verossimilhança do modelo restrito $l(\theta_r)$ e os seus respectivos parâmetros são estimados e, em seguida, o mesmo procedimento é executado considerando-se atributos específicos para obtenção de uma verossimilhança $l(\theta)$. Assim, a estatística (*Likelihood Ratio* - LR) é calculada segundo a Equação 3.34.

$$LR = -2 \cdot \{l(\theta_r) - l(\theta)\} \quad (3.34)$$

Nesse caso, a hipótese nula de que o modelo restrito (genérico) é adequado é rejeitada se o valor t calculado é menor que um valor crítico de uma distribuição χ^2 com $n_{\theta_r} - n_{\theta}$ graus de liberdade, em que r é o número de equações (ou funções utilidade).

• **Índice ρ^2**

O índice ρ^2 definido pela Equação 3.35 permite comparar a qualidade do modelo (aderência) em relação às respostas observadas na pesquisa de preferência declarada tal que $\rho^2 = 0$ caracteriza um modelo sem aderência e $\rho^2 = 1,0$ indica representação total das respostas pelo modelo. Ortúzar e Willumsen (2011) indicam que valores próximos de 0,4 para esse parâmetro correspondem a aderência satisfatória.

$$\rho^2 = 1 - \frac{l(\theta)}{l(0)} \quad (3.35)$$

Uma vez que ρ^2 pode ser computado em relação a qualquer hipótese nula, ou seja, um modelo pode ser comparado a qualquer outro que não necessariamente sob o valor de $l(0)$, Tardiff (1976) propôs um ajuste à equação anterior tal que o referido índice é calculado em relação ao modelo de divisão de mercado

$$\bar{\rho}^2 = 1 - \frac{l(\theta)}{l(C)} \quad (3.36)$$

onde $l(C) = \sum_j Q_j \cdot \log(Q_j/Q)$ e Q_j é o número de indivíduos que escolhem A_j .

3.2.3.3 Procedimento para Especificação dos Modelos *Logit Multinomial*

A decisão sobre a combinação dos coeficientes que devem fazer parte de um modelo de escolha discreta é feita por um procedimento iterativo. Em geral, as análises iniciam-se com um modelo simples e progridem para versões mais elaboradas pelo aumento do poder explanatório.

Primeiramente, define-se uma constante *ASC* (*Alternative Specific Constant*) que representa a utilidade inerente a uma alternativa A_j (j -ésimo modo de transporte), ou seja, o valor do atributo associado à *ASC* é constante e igual 1 na representação da função utilidade.

Entretanto, por questões associadas ao método de estimação dos coeficientes (maximização da verossimilhança), a definição de uma *ASC* para cada equação é inviável (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Desse modo, uma alternativa é definida como referência – fixando-se o valor de *ASC* igual a zero – e os coeficientes associados às respectivas funções utilidade são estimados e comparados com essa referência.

Após a caracterização dos modelos de função utilidade e calibração dos coeficientes, procede-se à análise dos seus respectivos sinais (positivo ou negativo), tal que valores negativos indicam que a utilidade de um modo de transporte decresce com o aumento do valor numérico do atributo associado. Por outro lado, valores de sinal positivo indicam que a utilidade do modo aumenta quando o valor do respectivo atributo também aumenta.

Assim, do ponto de vista de análise do sinal dos coeficientes, a verificação de uma calibração está relacionada à compatibilidade dos sinais do ponto de vista lógico e em relação à literatura precedente. Por exemplo, espera-se que o sinal de um coeficiente associado ao tempo de viagem seja negativo, dado que a utilidade desse modo decresce com o aumento do tempo de percurso sob a percepção do usuário.

Em seguida, a representatividade de um coeficiente é avaliado segundo o seu nível de significância dado pelo teste estatístico da Equação 3.33. Na prática, se um coeficiente é considerado relevante para caracterização da escolha modal, a sua inclusão no modelo é limitada a um nível de significância mínimo de 80%.

Eventualmente, a inclusão de uma variável relevante com o sinal correto pode ser admitida mesmo que esta falhe no teste de significância, justificado pelo fato de que o valor estimado pode representar de maneira mais adequada as condições reais, e por esses resultados poderem ser consequência de insuficiência de dados para calibração (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Quanto à admissão de variáveis socioeconômicas (como gênero, idade, renda e ocupação), a maneira convencional de considerá-las nas funções utilidade é através de coeficientes estimados em apenas uma das equações – como exemplificado a seguir – dado que os atributos associados aos usuários não variam em relação ao modo de transporte utilizado.

$$\begin{cases} V_{1q} = \beta_{TT} \cdot TT_{1q} + \beta_{FA} \cdot FA_{1q} + \beta_{FR} \cdot FR_{1q} + \cdots + \sum_i \beta_i \cdot s_{iq} \\ V_{2q} = \beta_{TT} \cdot TT_{2q} + \beta_{FA} \cdot FA_{2q} + \beta_{FR} \cdot FR_{2q} \end{cases} \quad (3.37)$$

onde TT é o tempo de viagem, FA é o custo, FR é frequência e as variáveis binárias s_{iq} representam as características socioeconômicas do indivíduo q .

A prática mostra que na maioria dos casos a inclusão dessas variáveis melhora muito pouco o poder explanatório do modelo a ponto de serem incluídas (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Entretanto, uma alternativa de modelagem proposta por Fowkes e Wardman (1988) indica um conjunto de funções (Equação 3.38) para estimativa de coeficientes considerando o perfil dos usuários, onde a variável binária s_{lq} refere-se à característica socioeconômica l do indivíduo q .

$$V_{iq} = \left(\alpha + \sum_l \alpha_{TT_l} \cdot s_{lq} \right) \cdot TT_{iq} + \left(\theta + \sum_l \theta_{FA_l} \cdot s_{lq} \right) \cdot c_{iq} + \left(\lambda + \sum_l \lambda_{FR_l} \cdot s_{lq} \right) \cdot f_{iq} \quad (i = 1, 2) \quad (3.38)$$

3.2.4 Estimativa dos modelos

Além da extensa literatura a respeito de modelagem de escolha discreta, existem atualmente *softwares* que permitem estimar os coeficientes das funções utilidade pela maximização da verossimilhança e valores de alguns dos testes estatísticos descritos anteriormente.

O *software* SPSS (2008) utilizado para o delineamento do experimento ortogonal também possui método para estimativa dos coeficientes de um modelo *Logit Multinomial*. Entretanto, a ferramenta limita-se à definição de funções utilidade lineares, impedindo investigações mais aprofundadas como a inclusão de variáveis socioeconômicas nos modelos.

Por outro lado, o *Biogeme* (BIERLAIRE; FETIARISON, 2009) é uma ferramenta computacional mais robusta na resolução do problema, uma vez que permite a caracterização de qualquer tipo de função e apresenta resultados mais elaborados a respeito dos testes de hipóteses. Esse *software* requer um arquivo do tipo texto para definição do modelo ilustrado pela Figura 3.31.

Naquela figura os termos entre colchetes são: [Choice], define o nome da coluna do arquivo de dados de entrada que contém informações sobre as respostas dos participantes da pesquisa de preferência declarada; [Beta], estabelece os nomes dos coeficientes associados aos atributos das funções utilidade; [Utilities] permite a caracterização das funções utilidade; [Expressions] permite a inserção de restrições na estimação dos modelos (como exclusão de conjuntos de dados, por exemplo); e [Model] define a abordagem utilizada para maximização da verossimilhança.

O arquivo de entrada de dados (também do tipo texto) contém as respostas da pesquisa, os respectivos níveis dos atributos apresentados aos respondentes e informações sobre as características socioeconômicas dos participantes.

```

[Choice]
choice

[Beta]
// Name      Default Value Lower Bound Upper Bound status
ASC_CAR      0.0          -100.0    100.0      0
ASC_RAIL     0.0          -100.0    100.0      1
BETA_COST    0.0          -100.0    100.0      0
BETA_TIME    0.0          -100.0    100.0      0

[Utilities]
//Id Name Avail linear-in-parameter expression
0   Car   one   ASC_CAR * one + BETA_COST * car_cost +
                BETA_TIME * car_time
1   Rail  one   ASC_RAIL * one + BETA_COST * rail_cost +
                BETA_TIME * rail_time

[Expressions]
// Define here arithmetic expressions for name that are not directly
// available from the data
one = 1

[Model]
// Currently, only $MNL (multinomial logit), $NL (nested logit), $CNL
// (cross-nested logit) and $NEV (Network GEV model) are valid keywords
//
$MNL

```

Figura 3.31 – Exemplo de arquivo de um *MNL* no *Biogeme* – Fonte: Bierlaire e Fietarison (2009)

Após as calibrações obtém-se um arquivo do tipo *HTML* contendo valores de verossimilhança, os coeficientes estimados e as respectivas significâncias. Ademais, o *Biogeme* provê arquivos auxiliares para posterior cálculo das probabilidades de escolha modal mediante os níveis dos atributos apresentados aos respondentes através de um outro *software* (*Biosim*).

Os itens subsequentes desta seção contêm os modelos calibrados no *Biogeme* para representação das respostas da pesquisa de preferência declarada. A base de dados foi segregada em amostras por motivo de viagem (*W* ou *L*), sendo a de calibração correspondente a 75% das observações da Tabela 3.15 e a de validação correspondente a 25% daquelas respostas, resultando nos valores representados na Tabela 3.16.

A primeira amostra foi utilizada para estimativa dos valores dos coeficientes associados aos atributos da função utilidade para cada modelo proposto e a segunda parcela foi utilizada para validação, comparando-se a porcentagem de acertos entre as escolhas dos modelos e as dos participantes da pesquisa.

Tabela 3.16 – Número de respostas das amostras para calibração e validação dos modelos de escolha discreta relativos à pesquisa de preferência declarada

Cenário	<i>HPT sem AIR</i>			<i>HPT com AIR</i>			<i>HST sem AIR</i>			<i>HST com AIR</i>		
Motivo	<i>W</i>	<i>L</i>	Total	<i>W</i>	<i>L</i>	Total	<i>W</i>	<i>L</i>	Total	<i>W</i>	<i>L</i>	Total
Amostra de Calibração	441	588	1029	509	474	984	502	550	1053	557	589	1146
Amostra de Validação	147	196	343	170	159	328	168	184	351	186	197	383

3.2.4.1 Modelo A

O *Biogeme* permite que todas as funções sejam declaradas no mesmo arquivo paramétrico de definição do modelo (Figura 3.31), dado que a presença ou ausência de um modo é declarado no arquivo de dados de entrada mediante a definição de uma variável binária ("AVAIL") que assume o valor "1" caso o modo tenha sido disponibilizado para escolha do respondente e "0" caso contrário. Para o modo Automóvel (*CAR*), essa variável é igual a "1" se o respondente da pesquisa declarou que possui Carteira Nacional de Habilitação e igual a "0" caso contrário.

No caso do modo Avião (*AIR*), a variável "AVAIL" assume valor "1" se o cenário apresentado ao participante contém essa alternativa para escolha, e para o modo ferroviário assume esse valor unitário se o cenário apresentado corresponde à oferta de *HPT* ou *HST* de maneira complementar (ou seja, se é igual a 1 para *HPT* então assume valor 0 para o *HST*). Finalmente, no modo Ônibus (*BUS*) essa variável sempre assume valor "1" uma vez que está sempre disponível para viagens intermunicipais e interestaduais na Região Sudeste.

O primeiro modelo proposto para representação das escolhas da pesquisa de preferência declarada considera funções utilidade para cada modo de transporte (*CAR*, *BUS*, *HPT*, *HST* e *AIR*) com coeficientes específicos (não genéricos) para cada atributo. A constante *ASC* relacionada à função utilidade do modo *CAR* é igual a zero e o mesmo conjunto de equações foi definido para os dois motivos de viagem (*W* e *L*) conforme representado a seguir.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = \beta_{TT_{CAR}} \cdot TT_{CAR} + \beta_{PE} \cdot PE_{CAR} + \beta_{TO} \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = ASC_{BUS} + \beta_{TT_{BUS}} \cdot TT_{BUS} + \beta_{FR_{BUS}} \cdot FR_{BUS} + \beta_{FA_{BUS}} \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = ASC_{HPT} + \beta_{TT_{HPT}} \cdot TT_{HPT} + \beta_{FR_{HPT}} \cdot FR_{HPT} + \beta_{FA_{HPT}} \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = ASC_{HST} + \beta_{TT_{HST}} \cdot TT_{HST} + \beta_{FR_{HST}} \cdot FR_{HST} + \beta_{FA_{HST}} \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = ASC_{AIR} + \beta_{TT_{AIR}} \cdot TT_{AIR} + \beta_{FR_{AIR}} \cdot FR_{AIR} + \beta_{FA_{AIR}} \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (3.39)$$

A Tabela C.1 e a Tabela C.2 do Apêndice C contêm os valores dos coeficientes das funções utilidade e respectivas significâncias para os motivos de viagem W e L desse modelo, respectivamente. A Tabela 3.17 resume as medidas de desempenho da calibração por motivo de viagem.

Tabela 3.17 – Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo A

Motivo	W	L
Coefficientes estimados	19	19
Observações	1714	1744
$l(0)$	-2043,927	-1965,484
$l(\theta)$	-1877,46	-1862,198
ρ^2	0,081	0,053
$\bar{\rho}^2$	0,072	0,043

3.2.4.2 Modelo B

Haja vista que os testes de significância estatística de alguns coeficientes do Modelo A indicam que alguns deles não afetam estatisticamente as decisões representadas pelas funções utilidade, propõe-se uma modelagem alternativa correspondente às equações de (3.39).

Nessa proposta, os coeficientes associados ao tempo de viagem (β_{TT}) dos modos Automóvel, Ônibus, Trens (HPT e HST) e Avião são generalizados para um mesmo valor, bem como os coeficientes relativos à frequência (β_{FR}) e preço da passagem (β_{FA}) dos três últimos modos de transporte. Novamente, as funções representam a utilidade dos modos de transporte para os motivos de viagem trabalho (W) e lazer (L).

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = \beta_{TT} \cdot TT_{CAR} + \beta_{PE} \cdot PE_{CAR} + \beta_{TO} \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = ASC_{BUS} + \beta_{TT} \cdot TT_{BUS} + \beta_{FR} \cdot FR_{BUS} + \beta_{FA} \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = ASC_{HPT} + \beta_{TT} \cdot TT_{HPT} + \beta_{FR} \cdot FR_{HPT} + \beta_{FA} \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = ASC_{HST} + \beta_{TT} \cdot TT_{HST} + \beta_{FR} \cdot FR_{HST} + \beta_{FA} \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = ASC_{AIR} + \beta_{TT} \cdot TT_{AIR} + \beta_{FR} \cdot FR_{AIR} + \beta_{FA} \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (3.40)$$

Nesse caso, a maximização da verossimilhança resulta nos valores de parâmetros indicados na Tabela C.3 e na Tabela C.4 do Apêndice C e, em resumo, o desempenho das estimativas pode ser verificado na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo B

Motivo	W	L
Coefficientes estimados	9	9
Observações	1714	1744
$l(0)$	-2043,927	-1965,484
$l(\theta)$	-1902,922	-1878,197
ρ^2	0,069	0,044
$\bar{\rho}^2$	0,065	0,040

A aplicação do teste de hipótese descrito pela Equação 3.34 para avaliação da hipótese de generalização dos parâmetros associados aos atributos dos modos de transporte, cujo resultado pode ser verificado na Tabela 3.19.

Tabela 3.19 – Testes de razão de verossimilhança entre o Modelo A e o Modelo B

Motivo	Modelo	$l(\theta)$	Parâmetros (n)	LR	Graus de Liberdade (gl)	$\chi^2_{(gl;95\%)}$	Teste de Hipótese
W	A	-1877,460	19	50,92	10	18,31	Não Rejeitar H_0
	B	-1902,922	9				
L	A	-1862,198	19	32,00	10	18,31	Não Rejeitar H_0
	B	-1878,197	9				

O valor obtido do Teste de Razão de Verossimilhança (LR) indica que, a um nível de confiança de 95%, o modelo de representação da utilidade dos modos de transporte pode ser generalizado por valores idênticos de parâmetros para os modelos de ambos os motivos de viagem. Isso pode ser justificado pelo fato de que $\chi^2_{(10;95\%)} = 18,31 < LR = 50,92$ para o motivo de viagem trabalho (W) e $\chi^2_{(10;95\%)} = 18,31 < LR = 32,00$ para o motivo lazer ou outros (L).

Portanto, na comparação entre o Modelo A (parâmetros não genéricos, ou seja, irrestritos) e o Modelo B (parâmetros genéricos, ou seja, restritos), a hipótese nula de que o segundo é estatisticamente correto para representação da escolha modal não é rejeitada para os dois motivos de viagem, indicando que a generalização dos coeficientes pode ser considerada viável.

3.2.4.3 Modelo C

Como consequência dos resultados do Modelo A e do Modelo B, propõe-se um terceiro modelo pela eliminação ou generalização dos coeficientes não significativos estimados anteriormente. Nesse caso, optou-se pela calibração de diferentes conjuntos de funções utilidade por motivo de viagem, conforme apresentado em (3.41) e (3.42).

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = \beta_{TT} \cdot TT_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot PE_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = ASC_{BUS} + \beta_{TT} \cdot TT_{BUS} + \beta_{FR} \cdot FR_{BUS} + \beta_{FA} \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = ASC_{HPT} + \beta_{TT} \cdot TT_{HPT} + \beta_{FR} \cdot FR_{HPT} + \beta_{FA} \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = \beta_{TT} \cdot TT_{HST} + \beta_{FR} \cdot FR_{HST} + \beta_{FA} \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = ASC_{HST} + \beta_{TT} \cdot TT_{AIR} + \beta_{FR} \cdot FR_{AIR} + \beta_{FA} \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (3.41)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = \beta_{TT} \cdot TT_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot PE_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = \beta_{TT} \cdot TT_{BUS} + \beta_{FA} \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = ASC_{HPT} + \beta_{TT} \cdot TT_{HPT} + \beta_{FA} \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = ASC_{HST} + \beta_{TT} \cdot TT_{HST} + \beta_{FA} \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = ASC_{AIR} + \beta_{TT} \cdot TT_{AIR} + \beta_{FA} \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (3.42)$$

A calibração dos coeficientes dessas equações resultou nas medidas de desempenho resumidas na Tabela 3.20, cujos valores numéricos e significâncias estatísticas são apresentados na Tabela C.5 e Tabela C.6 do Apêndice C.

Tabela 3.20 – Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo C

Motivo	<i>W</i>	<i>L</i>
Coefficientes estimados	7	6
Observações	1714	1744
$l(0)$	-2043,927	-1965,484
$l(\theta)$	-1905,033	-1881,372
ρ^2	0,068	0,043
$\bar{\rho}^2$	0,065	0,040

3.2.4.4 Modelo D

Após avaliação do sinal e da significância dos resultados do Modelo C, propõe-se a alteração do conjunto de funções utilidade dos modos de transporte pelo motivo de viagem trabalho (*W*), dado que apenas a constante ASC_{BUS} resultou em significância menor do que 95%. Ainda, a proposta de alteração do modelo anterior tem por objetivo verificar a possibilidade de aumento do valor da verossimilhança calculada na calibração dos modelos.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = \beta_{TT} \cdot TT_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot PE_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = ASC + \beta_{TT} \cdot TT_{BUS} + \beta_{FR} \cdot FR_{BUS} + \beta_{FA} \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = ASC + \beta_{TT} \cdot TT_{HPT} + \beta_{FR} \cdot FR_{HPT} + \beta_{FA} \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = ASC + \beta_{TT} \cdot TT_{HST} + \beta_{FR} \cdot FR_{HST} + \beta_{FA} \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = ASC + \beta_{TT} \cdot TT_{AIR} + \beta_{FR} \cdot FR_{AIR} + \beta_{FA} \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (3.43)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = \beta_{TT} \cdot TT_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot PE_{CAR} + \beta_{FACAR} \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = \beta_{TT} \cdot TT_{BUS} + \beta_{FA} \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = ASC_{RAIL} + \beta_{TT} \cdot TT_{HPT} + \beta_{FA} \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = ASC_{RAIL} + \beta_{TT} \cdot TT_{HST} + \beta_{FA} \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = ASC_{AIR} + \beta_{TT} \cdot TT_{AIR} + \beta_{FA} \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (3.44)$$

Os resultados da calibração desses modelos no *Biogeme* são indicados na Tabela C.7 e na Tabela C.8 do Apêndice C. Os valores indicados naquelas tabelas mostram que os coeficientes estimados são todos significativos do ponto de vista estatístico (tanto para o motivo de viagem trabalho quanto para lazer ou outros).

O resumo das medidas de desempenho da Tabela 3.21 indicam que as alterações de verossimilhança ($l(\theta)$) e dos índices ρ^2 e $\bar{\rho}^2$ em relação aos modelos anteriores não são expressivas em termos numéricos. Assim, esse Modelo D é um potencial candidato a representar as utilidades dos modos de transporte envolvidos na caracterização da divisão modal mediante novos serviços ferroviários na Região Sudeste do Brasil.

Tabela 3.21 – Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo D

Motivo	W	L
Coefficientes estimados	5	5
Observações	1714	1744
$l(0)$	-2043,927	-1965,484
$l(\theta)$	-1910,560	-1881,378
ρ^2	0,065	0,043
$\bar{\rho}^2$	0,063	0,040

3.2.4.5 Modelo E

Este Modelo E contempla a inserção dos atributos socioeconômicos da pesquisa de preferência declarada nas funções utilidade por motivo de viagem. Uma vez que a comparação do Mo-

delo A e do Modelo B indicou a possibilidade de generalização dos coeficientes dos atributos comuns às funções utilidade, propõe-se modelos baseados em (3.37) da página 158 com a inclusão de coeficientes genéricos associados às variáveis de Idade, Renda Média per Capita, Empregabilidade e posse de CNH.

Assim, as amostras foram segregadas na tentativa de representar as escolhas modais segundo grupos da população com características socioeconômicas semelhantes. Os atributos Idade (AGE) e Renda Média per Capita (INC) foram divididos nas três classes da Tabela 3.22 (com valor "1" quando o atributo pertencer à respectiva classe e "0" caso contrário), e os atributos Empregabilidade (EMP) e Posse de CNH ($DRIV_LIC$) foram definidos por variáveis binárias com valor "1" em caso afirmativo e "0" caso contrário.

Tabela 3.22 – Intervalos das classes de atributos socioeconômicos para inserção nos modelos de escolha modal

Classe	Idade (AGE)	Renda (INC)
1	$18 < AGE_1 \leq 33$	$215 < INC_1 \leq 830$
2	$33 < AGE_2 \leq 48$	$830 < INC_2 \leq 1900$
3	$AGE_3 > 48$	$INC_3 > 1900$

Assim, (3.45) representa as funções utilidade a serem calibradas considerando as variáveis socioeconômicas no formato aditivo, igualmente para ambos os motivos de viagem (W e L). Nota-se que os atributos socioeconômicos estão associados a apenas uma função utilidade (CAR) - escolhida arbitrariamente - conforme sugerido por (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = \beta_{TT} \cdot TT_{CAR} + \beta_{PE} \cdot PE_{CAR} + \beta_{TO} \cdot TO_{CAR} + \beta_{EMP} \cdot EMP \\ \quad + \beta_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \beta_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \beta_{AGE_2} \cdot AGE_2 \\ \quad + \beta_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \beta_{INC_1} \cdot INC_1 + \beta_{INC_2} \cdot INC_2 + \beta_{INC_3} \cdot INC_3 \\ V_{BUS} = ASC_{BUS} + \beta_{TT} \cdot TT_{BUS} + \beta_{FR} \cdot FR_{BUS} + \beta_{FA} \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = ASC_{HPT} + \beta_{TT} \cdot TT_{HPT} + \beta_{FR} \cdot FR_{HPT} + \beta_{FA} \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = ASC_{HST} + \beta_{TT} \cdot TT_{HST} + \beta_{FR} \cdot FR_{HST} + \beta_{FA} \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = ASC_{AIR} + \beta_{TT} \cdot TT_{AIR} + \beta_{FR} \cdot FR_{AIR} + \beta_{FA} \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (3.45)$$

Os resultados da calibração desses modelos são representados na Tabela C.9 e Tabela C.10 do Apêndice C, cujas medidas de desempenho são resumidos na Tabela 3.23. Os testes de significância estatística dos coeficientes indicam que a inserção dos atributos socioeconômicos não influencia no valor de caracterização da utilidade dos modos e, pelo contrário, torna outros atributos estimados nos modelos anteriores também não significativos estatisticamente.

Tabela 3.23 – Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo E

Motivo	<i>W</i>	<i>L</i>
Coeficientes estimados	27	27
Observações	1714	1744
$l(0)$	-2043,927	-1965,484
$l(\theta)$	-1866,843	-1845,596
ρ^2	0,087	0,061
$\bar{\rho}^2$	0,073	0,047

Apesar da obtenção de valores melhores das estatísticas de verossimilhança maximizada ($l(\theta)$) e de ρ^2 e $\bar{\rho}^2$ em relação aos modelos anteriores – para os motivos de viagem *W* e *L* – este Modelo E não necessariamente é melhor que o Modelo D (considerado até o momento o mais adequado para representação das escolhas modais).

Isso decorre do fato de que vários coeficientes estimados não são estatisticamente significativos e a melhora percentual das medidas de desempenho não necessariamente justifica o aumento do número de variáveis a serem consideradas nos modelos.

3.2.4.6 Modelo F

Conforme descrito em (3.38) na página 159, Fowkes e Wardman (1988) propõem uma alternativa para representação da utilidade pela inserção de variáveis socioeconômicas dos usuários. O conjunto de funções aplicados à pesquisa de preferência declarada são representados em (3.46) onde os coeficientes são generalizados, inclusive para os atributos socioeconômicos.

$$\begin{aligned}
V_{CAR} &= (\alpha_{TT} + \alpha_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \alpha_{EMP} \cdot EMP + \alpha_{AGE_1} \cdot AGE_1 \\
&\quad + \alpha_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \alpha_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \alpha_{INC_1} \cdot INC_1 + \alpha_{INC_2} \cdot INC_2 \\
&\quad + \alpha_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot TT_{CAR} \\
&\quad + (\beta_{PE} + \beta_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \beta_{EMP} \cdot EMP + \beta_{AGE_1} \cdot AGE_1 \\
&\quad + \beta_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \beta_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \beta_{INC_1} \cdot INC_1 + \beta_{INC_2} \cdot INC_2 \\
&\quad + \beta_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot PE_{CAR} \\
&\quad + (\gamma_{TO} + \gamma_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \gamma_{EMP} \cdot EMP + \gamma_{AGE_1} \cdot AGE_1 \\
&\quad + \gamma_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \gamma_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \gamma_{INC_1} \cdot INC_1 + \gamma_{INC_2} \cdot INC_2 \\
&\quad + \gamma_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot TO_{CAR} \\
V_{BUS} &= ACS_{BUS} + (\alpha_{TT} + \alpha_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \alpha_{EMP} \cdot EMP \\
&\quad + \alpha_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \alpha_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \alpha_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \alpha_{INC_1} \cdot INC_1 \\
&\quad + \alpha_{INC_2} \cdot INC_2 + \alpha_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot TT_{BUS} \\
&\quad + (\theta_{FA} + \theta_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \theta_{EMP} \cdot EMP \\
&\quad + \theta_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \theta_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \theta_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \theta_{INC_1} \cdot INC_1 \\
&\quad + \theta_{INC_2} \cdot INC_2 + \theta_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FA_{BUS} \\
&\quad + (\lambda_{FR} + \lambda_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \lambda_{EMP} \cdot EMP \\
&\quad + \lambda_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \lambda_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \lambda_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \lambda_{INC_1} \cdot INC_1 \\
&\quad + \lambda_{INC_2} \cdot INC_2 + \lambda_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FR_{BUS} \\
V_{HPT} &= ACS_{HPT} + (\alpha_{TT} + \alpha_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \alpha_{EMP} \cdot EMP \\
&\quad + \alpha_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \alpha_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \alpha_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \alpha_{INC_1} \cdot INC_1 \\
&\quad + \alpha_{INC_2} \cdot INC_2 + \alpha_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot TT_{HPT} \\
&\quad + (\theta_{FA} + \theta_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \theta_{EMP} \cdot EMP \\
&\quad + \theta_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \theta_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \theta_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \theta_{INC_1} \cdot INC_1 \\
&\quad + \theta_{INC_2} \cdot INC_2 + \theta_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FA_{HPT} \\
&\quad + (\lambda_{FR} + \lambda_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \lambda_{EMP} \cdot EMP \\
&\quad + \lambda_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \lambda_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \lambda_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \lambda_{INC_1} \cdot INC_1 \\
&\quad + \lambda_{INC_2} \cdot INC_2 + \lambda_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FR_{HPT}
\end{aligned}
\tag{3.46a}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 V_{HST} &= ACS_{HST} + (\alpha_{TT} + \alpha_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \alpha_{EMP} \cdot EMP \\
 &\quad + \alpha_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \alpha_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \alpha_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \alpha_{INC_1} \cdot INC_1 \\
 &\quad + \alpha_{INC_2} \cdot INC_2 + \alpha_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot TT_{HST} \\
 &\quad + (\theta_{FA} + \theta_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \theta_{EMP} \cdot EMP \\
 &\quad + \theta_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \theta_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \theta_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \theta_{INC_1} \cdot INC_1 \\
 &\quad + \theta_{INC_2} \cdot INC_2 + \theta_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FA_{HST} \\
 &\quad + (\lambda_{FR} + \lambda_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \lambda_{EMP} \cdot EMP \\
 &\quad + \lambda_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \lambda_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \lambda_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \lambda_{INC_1} \cdot INC_1 \\
 &\quad + \lambda_{INC_2} \cdot INC_2 + \lambda_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FR_{HST} \\
 V_{AIR} &= ACS_{AIR} + (\alpha_{TT} + \alpha_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \alpha_{EMP} \cdot EMP \\
 &\quad + \alpha_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \alpha_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \alpha_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \alpha_{INC_1} \cdot INC_1 \\
 &\quad + \alpha_{INC_2} \cdot INC_2 + \alpha_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot TT_{AIR} \\
 &\quad + (\theta_{FA} + \theta_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \theta_{EMP} \cdot EMP \\
 &\quad + \theta_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \theta_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \theta_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \theta_{INC_1} \cdot INC_1 \\
 &\quad + \theta_{INC_2} \cdot INC_2 + \theta_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FA_{AIR} \\
 &\quad + (\lambda_{FR} + \lambda_{DRIV_LIC} \cdot DRIV_LIC + \lambda_{EMP} \cdot EMP \\
 &\quad + \lambda_{AGE_1} \cdot AGE_1 + \lambda_{AGE_2} \cdot AGE_2 + \lambda_{AGE_3} \cdot AGE_3 + \lambda_{INC_1} \cdot INC_1 \\
 &\quad + \lambda_{INC_2} \cdot INC_2 + \lambda_{INC_3} \cdot INC_3) \cdot FR_{AIR}
 \end{aligned} \right. \quad (3.46b)$$

Os coeficientes estimados segundo esse padrão de definição das funções utilidade são descritos na Tabela C.11 e na Tabela C.12 do Apêndice C, com o resumo das medidas de desempenho apresentado na Tabela 3.24. Novamente, as significâncias estatísticas dos parâmetros socioeconômicos são menores do que 95% e, também, interferem nos resultados de significância de coeficientes que outrora eram representativos na estimativa numérica da utilidade dos modos.

Novamente, tem-se uma melhora dos valores das medidas de desempenho para ambos os motivos de viagem, em relação aos modelos sem inclusão de variáveis socioeconômicas (Modelo A ao Modelo D) e àquele que considera essas variáveis sob a forma aditiva (Modelo E). Entretanto, a modelagem alternativa das utilidades e melhora percentual das estatísticas de verossimilhança, ρ^2 e $\bar{\rho}^2$ eventualmente não justifica o aumento do número de variáveis do modelo, agravado pelo

fato de que muitos dos parâmetros estimados não são significativos estatisticamente conforme indicado nas tabelas do Apêndice C.

Tabela 3.24 – Medidas de desempenho para estimativa dos parâmetros do Modelo F

Motivo	W	L
Coefficientes estimados	49	49
Observações	1714	1744
$l(0)$	-2043,927	-1965,484
$l(\theta)$	-1841,428	-1834,984
ρ^2	0,099	0,066
$\bar{\rho}^2$	0,075	0,041

3.2.5 Considerações sobre a Modelagem de Escolha Modal

Primeiramente, os gráficos da Figura 3.32 representam os valores de verossimilhança calculados no procedimento de calibração dos coeficientes dos modelos descritos nas subseções anteriores. Observa-se que tanto para as viagens por motivo trabalho quanto para lazer, o Modelo E e o Modelo F que contêm as variáveis socioeconômicas da pesquisa de preferência declarada apresentam melhor desempenho quanto a essa medida de desempenho.

Ainda, é possível afirmar que a generalização dos parâmetros dos atributos das funções utilidade (do Modelo A para o Modelo B) incorrem em redução da verossimilhança calculada e que a eliminação de alguns atributos entre o Modelo B e o Modelo D também têm o mesmo efeito.

Figura 3.32 – Gráfico da verossimilhança dos modelos estimados para o motivo trabalho (a) e lazer (b)

Entretanto, as alterações percentuais de verossimilhança entre modelos apresentadas na Tabela 3.25 e a Tabela 3.26 indicam que a maior variação positiva desse valor ocorre entre o Modelo D e o Modelo E, igual a 3,62% para as viagens a trabalho e 2,47% para as de motivo

lazer. Apesar do aumento, as pequenas variações percentuais de verossimilhança não justificam a inclusão das variáveis socioeconômicas do ponto de vista de aplicação prática dos modelos, inclusive para as análises socioeconômicas desta tese.

Tabela 3.25 – Diferenças percentuais de verossimilhanças entre modelos pelo motivo *W*

Modelo Anterior/Modelo Posterior	B	C	D	E	F
A	-1,36%	-1,47%	-1,76%	1,92%	0,57%
B	-	-0,11%	-0,40%	3,23%	1,90%
C	-	-	-0,29%	3,34%	2,00%
D	-	-	-	3,62%	2,29%
E	-	-	-	-	-1,38%

Tabela 3.26 – Diferenças percentuais de verossimilhanças entre modelos pelo motivo *L*

Modelo Anterior/Modelo Posterior	B	C	D	E	F
A	-0,86%	-1,03%	-1,03%	1,46%	0,89%
B	-	-0,17%	-0,17%	2,30%	1,74%
C	-	-	0,00%	2,47%	1,90%
D	-	-	-	2,47%	1,90%
E	-	-	-	-	-0,58%

Portanto, nas análises posteriores propostas nesta pesquisa, considerar-se-á o Modelo D como representativo das escolhas modais na oferta de serviços ferroviários de transporte de passageiros na Região Sudeste do Brasil. Nesse modelo, para o motivo de viagem trabalho (*W*) observa-se que a estimação das funções utilidade resultaram em coeficientes iguais para os modos ferroviário (*HPT* e *HST*) e aéreo (*AIR*).

O mesmo valor dos coeficientes entre modos de transporte indica que os usuários têm a mesma percepção da viagem em relação aos Trens – seja qual for a tecnologia – e Avião. Entretanto, os valores numéricos finais da utilidade para cálculo das respectivas probabilidade de escolha não são idênticos, dado que os níveis dos atributos são distintos em relação a cada modo de transporte.

Por outro lado, para o motivo de viagem lazer (*L*) no Modelo D, os coeficientes das funções que caracterizam o modo ferroviário (*HPT* ou *HST*) são iguais, ao passo que os termos constantes das equações para aquele modo de transporte são maiores que o aéreo.

Quanto às estatísticas ρ^2 e $\bar{\rho}^2$, a Tabela 3.27 mostra que, apesar do aumento dos valores estimados para os modelos que contemplam os atributos socioeconômicos dos usuários, os

resultados não apresentam variações significativas que justifiquem a adoção de um daqueles modelos em detrimento do Modelo D.

Tabela 3.27 – Resumo das estatísticas ρ^2 e $\bar{\rho}^2$ da calibração dos modelos de escolha modal

Estatística	Motivo	Modelo					
		A	B	C	D	E	F
ρ^2	W	0,081	0,069	0,068	0,065	0,087	0,099
	L	0,053	0,044	0,043	0,043	0,061	0,066
$\bar{\rho}^2$	W	0,072	0,065	0,065	0,063	0,073	0,075
	L	0,043	0,040	0,040	0,040	0,047	0,041

Conforme explicado anteriormente, uma amostra de 75% das respostas da pesquisa de preferência declarada foi utilizada para calibração dos coeficientes das funções utilidade. A amostra complementar foi utilizada para avaliação do desempenho dos modelos segundo os acertos das escolhas previstas em relação às respostas dos participantes.

Assim, a partir da obtenção das probabilidades de escolhas modais e identificação daquelas que apresentam maiores valores – e que correspondem ao modo de transporte escolhido pelos respectivos modelos – os desvios percentuais dos acertos em relação às respostas efetivamente apresentadas pelos participantes da pesquisa são apresentados nos gráficos da Figura 3.33 para o motivo trabalho (W) e na Figura 3.34 para o motivo lazer ou outros (L).

Figura 3.33 – Gráfico de acertos dos modelos estimados em relação às respostas da pesquisa para o motivo trabalho W

Figura 3.34 – Gráfico de acertos dos modelos estimados em relação às respostas da pesquisa para o motivo lazer *L*

Os resultados representados na Figura 3.33 e Figura 3.34 indicam que nenhum dos modelos propostos consegue superar o número de acertos em relação aos erros (*i.e.* os modelos apresentam índice de acerto sempre inferior a 50%), apesar do esforço em identificar aquele mais adequado à representação dos dados coletados.

Ademais, apesar de o modelo F (que contempla as variáveis socioeconômicas mediante a formulação proposta por FOWKES; WARDMAN, 1988) apresentar a maior porcentagem de acertos para ambos os motivos de viagem, o Modelo D apresenta 0,4% acertos superior ao Modelo E e apenas 2,1% em relação ao Modelo E para o motivo de viagem trabalho. Em relação ao motivo de viagem lazer, essa tendência apresenta pequena alteração, porém sem diferenças representativas com aumento de 3,5% dos acertos entre o Modelo D e o Modelo E e de 4,3% entre aquele e o Modelo F.

As investigações propostas por Isler e Pitombo (2014) pela geração de árvores de decisão com os dados da pesquisa de preferência declarada indicam que, provavelmente, as variáveis socioeconômicas exercem pouca influência na escolha modal no formato da pesquisa proposta nesta tese. Naquele estudo, pode-se verificar pela Tabela 3.28 que os índices médios de acertos dos modelos de segregação em relação às respostas dos participantes foram de 46,0% para a modelagem incluindo as variáveis socioeconômicas e 43,2% sem considerá-las nas análises.

Tabela 3.28 – Porcentagem de acertos das Árvores de Decisão na modelagem da pesquisa de preferência declarada - Fonte: Isler e Pitombo (2014)

CENÁRIO/MÉTODO	CHAID ¹	CART ¹	QUEST ¹
<i>HPT com AIR (L)</i>	44,4 / 39,0 [-12,2%]	37,7 / 37,7 [0%]	41,6 / 29,4 [-29,3%]
<i>HPT com AIR (W)</i>	35,2 / 35,2 [0%]	43,5 / 41,1 [-5,5%]	38,4 / 38,4 [0%]
<i>HPT sem AIR (L)</i>	47,6 / 43,8 [-8%]	56,8 / 47,5 [-16,4%]	44,3 / 44,3 [0%]
<i>HPT sem AIR (W)</i>	43,7 / 40,8 [-6,6%]	42,5 / 41,6 [-2,1%]	37,1 / 37,1 [0%]
<i>HST com AIR (L)</i>	35,3 / 45,1 [27,8%]	43,5 / 43,5 [0%]	44,7 / 44,7 [0%]
<i>HST com AIR (W)</i>	33,8 / 36,7 [8,6%]	42,0 / 38,1 [-9,3%]	36,3 / 32,6 [-10,2%]
<i>HST sem AIR (L)</i>	53,2 / 55,5 [4,3%]	59,4 / 53,6 [-9,8%]	51,1 / 51,1 [0%]
<i>HST sem AIR (W)</i>	42,6 / 43,6 [2,3%]	42,6 / 42,6 [0%]	47,1 / 47,1 [0%]
MÉDIA	42,0 / 42,5 [1,2%]	46,0 / 43,2 [-6,1%]	42,6 / 40,6 [-4,7%]

¹ Com variáveis socioeconômicas (%) / Sem variáveis socioeconômicas (%) [Diferença percentual = (% acertos sem variáveis socioeconômicas - % acertos com variáveis socioeconômicas)/(% acertos com variáveis socioeconômicas)].

Portanto, existem indícios significativos de que as variáveis socioeconômicas não exercem influência na caracterização da escolha modal, pois a maioria das árvores geradas não incluem tais variáveis, como demonstrado naquele artigo.

Os resultados a respeito das estatísticas ρ^2 e $\bar{\rho}^2$ – aquém do valor $\rho^2 = 0,4$ recomendado por Ortúzar e Willumsen (2011) – e o índice de acertos dos modelos corroboram a afirmação daqueles autores que a inclusão de variáveis socioeconômicas nos modelos de utilidade não necessariamente melhoram o seu desempenho de maneira expressiva no formato em que pesquisa de preferência foi executado, o que não implica que esses atributos nunca influenciam a escolha modal de uma viagem.

Diante das análises e argumentos apresentados, e para efeito de aplicação nesta tese, optou-se pelo Modelo D para representação da escolha modal dos usuários mediante novos serviços de transporte ferroviário para ambos os motivos de viagem investigados, dado o seu desempenho tão satisfatório quanto os demais modelos.

Análise Socioeconômica de Projetos Ferroviários

Os objetivos da análise socioeconômica de uma nova infraestrutura de transporte são quantificar os seus efeitos sociais e econômicos atuais e futuros, estimar o bem estar social proporcionado pela sua implementação e definir a alocação de recursos para esse fim da melhor maneira possível (DREYER, 2010). Atualmente, a Análise Multi-Critério (*Multi-criteria Analysis – MCA*) e a Análise Custo-Benefício (*CBA*) são os métodos mais utilizados para atingir esses objetivos (THOMOPOULOS; GRANT-MULLER; TIGHT, 2009; HAYASHI; MORISUGI, 2000).

De acordo com Florio et al. (2004), a *MCA* consiste em uma sequência de escolhas para selecionar a alternativa mais adequada entre um conjunto de soluções disponíveis com base em um lista de critérios e seus respectivos pesos (ou importâncias). Esse método é uma ferramenta que permite a análise de diferentes propriedades qualitativas e quantitativas simultaneamente, as quais não precisam ser mensuradas em uma mesma unidade representativa.

A *MCA* também permite que os planejadores identifiquem as interferências e o equilíbrio entre diferentes objetivos a serem atingidos pelo projeto (*e.g.* a mitigação de externalidades, o aumento da eficiência de uma medida de desempenho) de modo a racionalizar o processo decisório e permitir a sistematização da escolha entre alternativas (BERECHMAN, 2010).

Apesar de existirem diferentes definições das etapas de uma *MCA* (TSAMBOULAS, 2007; BERECMAN, 2010; THOMOPOULOS; GRANT-MULLER; TIGHT, 2009; MUNASINGHE, 2007; STEVENS, 2004; GAMPER; TURCANU, 2007), os itens comuns ao método são a identificação dos critérios e preferências, avaliação desses critérios e definição dos respectivos pesos, atribuição de valores às alternativas de projetos, priorização das alternativas com base nesses valores e

pesos, e, finalmente, análise de sensibilidade considerando os objetivos do investimento.

Em contrapartida a esse método, a *CBA* é uma abordagem quantitativa para o problema de escolha de investimentos e tem sido extensivamente explorada na literatura (*e.g.* YEH et al., 1999; BOARDMAN, 2010; TUDELA; AKIKI; CISTERNAS, 2006; BERECHMAN, 2010), sendo definida por Dreyer (2010) como um método que visa quantificar os custos e benefícios econômicos e sociais de investimentos em termos monetários, e compará-los com o objetivo de identificação daquele que provê maiores benefícios totais à sociedade e ao investidor.

Nesta tese a *CBA* é priorizada em detrimento da *MCA* por ser considerada uma abordagem mais simples e suficiente no contexto desta pesquisa para uma primeira quantificação da atratividade de serviços ferroviários para o transporte de passageiros na Região Sudeste sob a perspectiva social e econômica.

4.1 Análise Custo-Benefício de Projetos de Transporte Ferroviário

Dreyer (2010) apresenta uma extensa revisão da literatura a respeito das práticas relativas à análise de novos projetos de trens de alta velocidade para o transporte de passageiros na Europa, além de uma comparação detalhada dos métodos de *CBA* e *MCA* no qual argumenta que o primeiro método é utilizado mais amplamente no âmbito do continente europeu.

As condições favoráveis à implantação de linhas ferroviárias de alta velocidade são os mercados com elevado índice de crescimento econômico e em corredores de transporte congestionados, tal que o crescimento expressivo de novas linhas de *HST* no mundo (Figura 4.1) deve-se aos benefícios desse modo de transporte como confiabilidade, conforto, segurança e redução de impactos ambientais (AMOS; BULLOCK; SONDH, 2010).

A China é um exemplo característico desse cenário, cujos investimentos na criação de uma rede ferroviária permitirão o aumento da acessibilidade em regiões remotas do país e, portanto, de sua competitividade econômica. Entretanto, no caso específico chinês, existem indícios de que a política de construção acelerada desse sistema vem aumentando o déficit financeiro do

país (RONG; WU, 2013).

Figura 4.1 – Extensão dos sistemas ferroviários que operam trens com velocidade maior que 200 km/h no mundo – Fonte: Amos, Bullock e Sondhi (2010)

Gleave (2004) provê uma descrição das linhas de Trens de Alta Velocidade existentes e métodos de avaliação socioeconômica no Reino Unido, França, Alemanha, Itália, Japão e Austrália. O relatório contém um panorama dos potenciais mercados a serem atendidos nesses países, as estimativas de investimentos requeridos para implantação dos projetos e um conjunto de recomendações para a prática de análises dessa natureza.

De Rus e Nombela (2007) e De Rus (2008) apresentam comparações dos benefícios sociais de novas linhas de trens de alta velocidade em relação ao excedente dos usuários e operadores, e quanto aos investimentos na sua construção e operação. As investigações concluem que, apesar de mostrarem-se eficientes do ponto de vista de redução dos tempos de viagem e dos impactos ambientais em relação aos demais modos, o sucesso de projetos de *HSTs* depende da capacidade de geração de benefícios econômicos para pagamento dos investimentos.

Esses autores indicam que uma demanda entre oito e 10 milhões de viagens no primeiro ano de operação do sistema é necessária para viabilizar a operação de um *HST* com extensão de 500 km na Europa a uma taxa mínima de atratividade de 5% ao ano. Ainda, o envolvimento da iniciativa privada na execução e operação é apontada como fator de minimização dos riscos de

perdas dos benefícios econômicos ao longo do tempo, uma vez que essa conjuntura proporciona maior competitividade dos serviços.

De Rus et al. (2009) apresentam uma análise detalhada dos investimentos em linhas de trens de alta velocidade do ponto de vista social e econômico sob a forma de um compêndio de diversos estudos com diferentes enfoques. Um dos artigos descreve um exercício numérico de estimativa preliminar dos custos e benefícios da implantação de uma nova linha de *HST*.

Ao apresentar uma revisão da literatura sobre os métodos de *CBA* e *MCA*, Dreyer (2010) compara estudos sobre o tema realizados na Europa, incluindo a Noruega, Suécia, Alemanha, Reino Unido e Espanha. Uma das dificuldades dessas comparações, segundo os autores, decorre das diferentes estratégias de atribuição de valor aos itens da avaliação socioeconômica. As principais discrepâncias que caracterizam os métodos de análise são: a estrutura das instituições do sistema ferroviário nos países; o objetivo principal dos serviços (por exemplo, minimizar as restrições de capacidade ou reduzir as emissões de poluentes); a qualidade das linhas ferroviárias existentes; a densidade populacional; e as características topográficas dos países.

4.2 Formulação para Análise Custo-Benefício de Projetos Ferroviários

Existem diversos manuais que formalizam os itens mais relevantes necessários à análise de viabilidade de projetos do ponto de vista socioeconômico. O *Transport Infrastructure Needs Assessment - TINA* (MACKIE et al., 1999) é um conjunto de instruções publicados pela Comissão Europeia para avaliação econômica e social de projetos de infraestrutura de transporte no continente. O documento concentra-se na descrição dos principais aspectos de uma análise econômica no âmbito social e suas implicações financeiras, bem como dos itens mais relevantes como os investimentos, despesas operacionais, estimativa de receitas, benefícios aos usuários e as medidas de desempenho consideradas na avaliação do projeto.

O *Guide to Cost Benefit Analysis of Investment Projects* (FLORIO et al., 2004) é um compêndio de exemplos numéricos baseados nas recomendações do *TINA* (MACKIE et al., 1999) para a *CBA* de projetos de infraestrutura de transporte com ênfase na estimativa das externalidades.

No caso específico de investimentos em infraestrutura de transporte ferroviário, o *Railway Project Appraisal Guidelines - RAILPAG* (TURRÓ; INVERSIONES, 2005) também provê exemplos numéricos sob as recomendações de Mackie et al. (1999), considerando diferentes cenários de construção e operação de novas linhas e recuperação das existentes.

No Brasil não existem evidências de um método oficial para análise socioeconômica de novos projetos de infraestrutura de transportes, de modo que a maioria é avaliada sob premissas específicas e não padronizadas. Moreira (2000) compara os resultados de uma *CBA* em relação à aplicação de um método de análise hierárquica ao cenário de avaliação das alternativas de rede para o transporte coletivo da cidade de Porto Alegre.

Neste capítulo é apresentada uma formulação explícita para Análise Custo-Benefício de projetos para o transporte ferroviário de passageiros no Brasil sob influência de dois principais manuais internacionais, o *Toolkit for the Economic Evaluation of World Bank Transport Projects* (MACKIE et al., 2003) e o *Transport Analysis Guidance – WebTAG* (DFT, 2014).

4.2.1 Recomendações do Banco Mundial

Nas economias emergentes (por exemplo China, Índia, Brasil, Rússia e África do Sul) existem diretrizes específicas para análise de projetos candidatos a financiamento pelo Banco Mundial (MACKIE et al., 2003), com abordagem para estimativa dos itens de uma *CBA* com base nas premissas de Mackie et al. (1999) à semelhança de Florio et al. (2004) para os projetos europeus.

Segundo o Banco Mundial (MACKIE et al., 2003), uma *CBA* deve representar os impactos econômicos para os usuários, investidores e operadores, e os benefícios de um projeto devem contemplar o seus efeitos sobre os níveis de emprego e preços dos bens de consumo. Entretanto, na prática, os requisitos para cômputo de todos os itens que influenciam as análises podem representar um impedimento para sua execução, de modo que hipóteses simplificadoras devem ser admitidas no processo.

De acordo com as recomendações desse órgão, os seguintes elementos devem ser estabelecidos em uma *CBA*: definição do escopo da avaliação socioeconômica (modo de transporte, área de estudo etc.) e de parâmetros como vida útil do projeto, taxa de desconto e unidade de

contabilização; cálculo dos benefícios aos usuários; valoração monetária do tempo; tratamento dos impactos ambientais e acidentes; e caracterização de medidas de desempenho. Esses itens estão relacionados na Figura 4.2 e são detalhados nas seções subsequentes deste capítulo.

Figura 4.2 – Relação entre os elementos de uma Análise Custo-Benefício – Fonte: adaptado de Mackie et al. (2003)

Os principais parâmetros de entrada da Análise Custo-Benefício para um projeto de transporte segundo o Banco Mundial são as matrizes de custos e tempos de percurso entre pares de origens e destinos, além das estimativas dos valores monetários requeridos à implantação do projeto e da potencial demanda de utilização do sistema.

Do ponto de vista de análise temporal da avaliação socioeconômica, é necessário estabelecer o ano de início da execução projeto, o ano de início da operação e o período de apreciação econômica (ciclo de vida útil). Ademais, é importante definir o ano base para o qual os custos e benefícios do projeto são descontados para cálculo das medidas de desempenho. Nesse contexto considera-se a substituição dos ativos adquiridos ao longo do horizonte de planejamento e os respectivos valores residuais ao final da vida útil.

Para cálculo do desconto dos custos e benefícios do projeto no ano base utiliza-se uma "Taxa de Desconto" que reflete o custo de oportunidade do capital investido no projeto em detrimento da sua aplicação para outros propósitos.

4.2.2 Recomendações do *WebTAG*

O Reino Unido, sob representação do *Department for Transport - DfT*, possui uma documentação específica para avaliação socioeconômica de projetos de infraestrutura de transporte através de um conjunto de documentos sob a denominação de *WebTAG* (DfT, 2014).

O *WebTAG* é dividido em três partes principais: *Overview*, *Guidance for the Project Manager* e *Guidance for the Expert*. A última parte contém uma extensa documentação sobre os objetivos de uma análise socioeconômica e alternativas de modelagem – por exemplo, quanto à estimativa de demanda – para projetos rodoviários, ferroviários, ciclovitários etc.

Especificamente em relação a projetos ferroviários, a seção *TAG Unit 3.13: Guidance on Rail Appraisal* contém dois módulos. O primeiro (*Module 3.13.1: Guidance on Rail Appraisal*) apresenta os princípios para avaliação econômica de projetos dessa natureza (unidade de contabilização, impactos à sociedade, premissas de financiamento etc.) e o segundo contém as abordagens para modelagem de diferentes itens como demanda e avaliação das externalidades.

Baseados nas recomendações do *WebTAG*, Worsley (2011) apresenta uma análise socioeconômica do *London CrossRail Scheme* – um novo projeto ferroviário para conexão dos extremos leste e oeste da cidade de Londres com o intuito de reduzir os tempos de viagem – e provê reflexões acerca dos métodos de avaliação socioeconômica propostas pelo *DfT*.

Em relação aos parâmetros da análise socioeconômica, o *WebTAG* contém recomendações equivalentes ao Banco Mundial, porém com especificações mais detalhadas. Do ponto de vista dos parâmetros de entrada dos modelos, as avaliações devem incluir: os valores de tempos de viagem dos modos de transporte existentes e daqueles em análise; as despesas operacionais dos veículos; as tarifas cobradas dos usuários; os impactos econômicos nos provedores dos serviços; as alterações da quantidade de acidentes; e os impactos ambientais dos projetos.

Além dos períodos de contabilização da *CBA* discriminados pelo Banco Mundial, o *WebTAG* também considera a separação dos projetos naqueles com vida útil finita ou infinita. No primeiro caso, o projeto é considerado operante até o limite da vida útil de seus ativos, em geral estabelecido até o máximo de 60 anos no casos de projetos de transporte. Nessas condições a *CBA* deve computar o valor residual dos ativos envolvidos e estimá-los com base em preços de

revenda do material utilizado ou pelos valores de disposição (como sucata, por exemplo).

Por outro lado, nos projetos com vida útil infinita é esperado que sejam efetuados reparos e substituições dos equipamentos e instalações que permitam a sua utilização por um período de tempo indefinido, de modo que a avaliação socioeconômica pode ser executada para períodos maiores que 60 anos.

O *DfT* também considera a aplicação da taxa de desconto como uma forma de comparação dos custos e benefícios em um horizonte de planejamento, pela conversão desses itens econômicos em valores presentes no ano base de avaliação sem considerar os efeitos inflacionários.

4.2.3 Parâmetros de Entrada

Na aplicação do método de análise custo-benefício proposto nesta tese, os bens adquiridos na construção e operação da infraestrutura são calculados em termos monetários a preços de mercado da moeda corrente brasileira (Real - R\$). O ano base é considerado como o de aplicação da análise (2015), bem como o de início da construção da infraestrutura, sobre a qual incide uma taxa de produtividade da construção (km/ano).

Em relação à demanda, os valores assumidos para o fluxo de tráfego são aqueles resultantes dos modelos de distribuição e de projeção de viagens detalhados no Capítulo 3, bem como os modelos de divisão modal derivados da pesquisa de preferência declarada descrita nesta tese.

Uma vez que a taxa mínima de atratividade é reflexo das condições econômicas do país onde se pretende implantar uma nova infraestrutura de transporte, o valor utilizado nas análises apresentadas nesta tese é aquele indicado para as condições brasileiras segundo as recomendações do Banco Mundial, equivalente a 5,1% (LOPEZ, 2008).

Quanto ao horizonte de avaliação socioeconômica, considera-se um período de 35 anos incluindo aquele necessário para construção da infraestrutura ferroviária para operação dos trens. Portanto, a *CBA* apresentada restringe-se ao horizonte operacional até o ano de 2050, compatível com as projeções de demanda indicadas no Capítulo 3.

4.2.4 Custos

4.2.4.1 Investimentos em Infraestrutura

Os valores monetários de investimentos são aqueles relacionados à construção de uma nova infraestrutura de transporte. Os investimentos na construção de túneis e instalação da via em áreas urbanas geralmente são os mais expressivos em relação ao valor total de um novo traçado (NASH, 2010) e também variam expressivamente em função da topografia do terreno nas áreas onde serão implantadas conforme relatado no Capítulo 2.

Os elevados investimentos no acesso dos trens às áreas urbanas podem ser mitigados pela utilização da infraestrutura ferroviária existente nessas regiões, o que incorre na redução dos investimentos totais dos projetos sob a penalidade de aumento dos tempos de acesso às cidades. No Brasil, sobretudo na Região Sudeste, é possível aproveitar-se dessa estratégia (conforme exemplificado na seção 2.3.2, página 68) uma vez que as principais cidades e regiões metropolitanas desenvolveram-se nos eixos ferroviários.

Apesar de a formulação de *CBA* proposta por De Rus et al. (2009) considerar investimentos médios de construção de uma nova infraestrutura ferroviária para operação de trens de alta velocidade, as particularidades da configuração topográfica da Região Sudeste do Brasil justificam a aplicação do método de estimativa de investimentos baseado no *GA* descrito no Capítulo 2.

Nesta tese apresenta-se a formulação de *CBA* de um novo traçado ferroviário para operação de trens de passageiros tendo-se como principal referência a metodologia proposta por De Rus et al. (2009). Essa formulação é apresentada neste capítulo considerando-se uma nova conexão entre duas cidades genéricas, cujas equações podem se estendidas a uma rede ferroviária conforme descrito no Capítulo 5.

Inicialmente, considera-se T_0 o ano de início da operação dos trens após o término da construção da via, tal que:

$$T_0 = \frac{L_R}{\omega} \quad (4.1)$$

onde L_R = comprimento do alinhamento ferroviário entre estações; e ω = produtividade média da construção do alinhamento (km/ano).

Apesar das possibilidades atuais de maior acurácia na estimativa dos investimentos de implantação dos novos traçados ferroviários, existem outras fontes de incertezas que podem afetar os valores finais dos projetos, representadas por uma constante de majoração denominada "Viés do Otimismo" (*Optimism Bias*).

Nesse contexto, Chevroulet e Reynaud (2011) avaliaram seis projetos de *HST* na Europa e concluíram que o aumento dos investimentos totais em infraestrutura são, em geral, motivados pelos atrasos no início da construção, alterações nas especificações do projeto, mudanças nos requisitos de proteção ambiental, alteração da quantidade e preços dos materiais, e subestimativa dos valores de desapropriações.

TRT (2008) apresenta valores dos investimentos estimados e efetivamente realizados em diferentes projetos de novas linhas ferroviárias de alta velocidade na Europa (Tabela 4.1), indicando que a maioria dos métodos apresentam resultados aquém dos valores efetivamente praticados.

Tabela 4.1 – Investimentos estimados e realizados para construção de novos alinhamentos ferroviários para Trens de Alta Velocidade em países europeus

Projeto	Estimado (milhões Euros)	Realizado (milhões Euros)	Subestimativa (%)
ICE Frankfurt - Cologne	2.784	6.015	116
Eurotunnel	2.702	4.568	69
Oeresund Fixed Link	1.795	2.924	63
Paris - Lille TGV	2.666	3.334	25
Madrid - Seville	3.263	4.029	23
Lyon - Marseille TGV	4.015	4.338	8

Dessas considerações, o valor presente líquido dos investimentos totais para construção de um novo alinhamento ferroviário pode ser calculado conforme a Equação (4.2).

$$IC^C = \sum_{t=0}^{T_0-1} \frac{(1 + \varphi) \cdot (1 + \rho) \cdot CC}{T_0 \cdot (1 + MARR)^t} \quad (4.2)$$

onde IC^C = valor presente líquido dos investimentos para construção da infraestrutura ; CC = estimativa do custo de construção do novo alinhamento ferroviário, resultante da aplicação do Algoritmo Genético descrito no Capítulo 2; φ = fator de correção devido ao viés do otimismo; ρ = custo de planejamento (porcentagem do investimento total); $MARR$ = taxa mínima de atratividade .

4.2.4.2 Investimentos de aquisição de material rodante

Anteriormente à estimativa dos investimentos em aquisição do material rodante para operação de uma conexão ferroviária é necessário estabelecer uma formulação para o cálculo da frota que atenda uma demanda específica em um horizonte operacional. Assumindo que um trem jamais operará em sua capacidade total, seja δ a ocupação média (em porcentagem) e $\bar{q}$ a sua capacidade total em número de assentos, então a sua ocupação efetiva ($\bar{q}_e$) é dada por:

$$\bar{q}_e = \delta \cdot \bar{q} \quad (4.3)$$

Ainda, considera-se que a demanda diária total pelos serviços ferroviários no ano t do horizonte de operação é calculada conforme a Equação (4.4).

$$q_t = \frac{D^t \cdot (1 + GT) \cdot (P_{Rw} + P_{Rl})}{ND} \quad (4.4)$$

onde D^t = número total de viagens estimadas entre uma origem e um destino no ano t (em ambos os sentidos); P_{Rw} = percentual de usuários que escolhem o modo trem para viagens por motivo de trabalho no ano t após o início da operação do sistema mediante uma tarifa ferroviária preestabelecida; P_{Rl} = percentual de usuários que escolhem o modo trem para viagens por lazer ou outros motivos no ano t ; GT = percentual de tráfego gerado pela operação dos novos serviços ferroviários; ND = número de dias por ano de operação do sistema.

Considerando que a frota ferroviária é calculada para atender a demanda do horário de pico, tal que ψ é a porcentagem da demanda diária total nesse período e H é o intervalo de operação do sistema (*e.g.* de 16 horas entre 6 horas e 22 horas), a frequência mínima para os serviços em cada direção no ano t é dada por:

$$F_t = \frac{\psi \cdot (q_t / \bar{q}_e)}{H} = \frac{\psi \cdot q_t}{\bar{q}_e \cdot H} \quad (4.5)$$

Ainda, seja τ a duração da viagem redonda entre as cidades de origem e destino (*i.e.* tempo sair da cidade de origem, chegar ao destino e retornar àquela localidade incluindo as paradas nas estações). Então, a quantidade mínima de trens diários necessários para operar o serviço de transporte de passageiros é dada pela Equação 4.6.

$$MRS^t = \frac{\tau}{1/F_t} = \tau \cdot \frac{q_t}{\bar{q}_e \cdot H} \quad (4.6)$$

onde $\tau = 2 \cdot (L_R/S_R + WT)$ (em horas); S_R = velocidade média dos trens (km/h); WT = tempo de espera nas estações (horas).

Entretanto, considerando que fatores exógenos podem afetar a operação do sistema (*e.g.* manutenções programadas ou falhas imprevistas), um fator de contingência (CF) é aplicado à equação anterior, de modo que o número total de trens a serem adquiridos anualmente pelo operador é dado por:

$$RS^t = (1 + CF) \cdot MRS^t = \frac{(1 + CF) \cdot \tau \cdot q_t}{\bar{q}_e \cdot H} \quad (4.7)$$

Portanto, dessa estimativa final da frota de veículos, o investimento total de aquisição do material rodante (RSC^A) ao longo do horizonte de operação do sistema é dado por:

$$RSC^A = \sum_{t=0}^T \frac{(RS^t - RS^{t-1}) \cdot a \cdot \bar{q}}{(1 + MARR)^t} \quad (4.8)$$

onde $RS^t - RS^{t-1}$ = número de trens adquiridos entre o ano $(t - 1)$ e o ano (t) ; a = custo unitário por assento de um trem; $\bar{q}$ = número de assentos de um trem; T = último ano do horizonte de avaliação socioeconômica; e $MARR$ = taxa mínima de atratividade.

Assume-se na formulação proposta que os primeiros trens são adquiridos no ano em que a construção da infraestrutura é iniciada ($t = 0$) pela adoção de uma abordagem conservadora em relação aos custos totais do projeto. Quanto mais cedo for a aquisição do material rodante, maior é o seu valor presente líquido pois o resultado do denominador da Equação (4.8) reduz-se com o aumento do valor de t no horizonte de planejamento.

4.2.4.3 Despesas Operacionais

Além dos investimentos para construção da infraestrutura e aquisição de material rodante, a avaliação socioeconômica deve contemplar as despesas decorrentes da oferta dos serviços. Os principais itens relativos a essas despesas são devido à operação dos trens (sinalização e controle de tráfego) e manutenção do sistema (reparos na via e limpeza de instalações).

O TRN-14: *Sources of Operating Costs* das referências do Banco Mundial (MACKIE et al., 2003) apresenta os principais itens de despesas operacionais de rodovias, ferrovias e infraestruturas portuárias. No caso dos projetos ferroviários, essas despesas incidem sobre os operadores e variam entre serviços de transporte de cargas e passageiros em função das distâncias percorridas, das características das vias e da política operacional do sistema.

Na formulação apresentada nesta tese, as despesas totais operacionais são calculadas com base em coeficientes médios incidentes sobre os agentes responsáveis pela oferta dos serviços. A partir do número de trens adquiridos anualmente segundo a Equação (4.7) as despesas de operação da frota de trens no horizonte de planejamento é calculado pela Equação (4.9).

$$RSC^O = \sum_{t=T_0}^T \frac{r_o \cdot \bar{q} \cdot RS^t \cdot 2 \cdot L_R \cdot TD}{(1 + MARR)^t} \quad (4.9)$$

onde RSC^O = valor presente líquido das despesas operacionais dos trens; T = último ano do horizonte de avaliação socioeconômica; r_o = custo médio de consumo de energia (ou combustível) e com a tripulação (R\$/assento-km); RS^t = número de trens operados no ano (t); L_R = comprimento do alinhamento ferroviário entre estações; $\bar{q}$ = capacidade total de um trem (número de assentos); $TD = ND \cdot \tau / H$ = número de viagens (ida e volta) executadas por um trem anualmente; e $MARR$ = taxa mínima de atratividade.

4.2.4.4 Despesas de Manutenção da Via Permanente

As referências para avaliação socioeconômica do Banco Mundial (MACKIE et al., 2003) proveem um relatório (TRN-13: *Treatment of Maintenance*) dedicado exclusivamente ao tratamento das despesas de manutenção sob a perspectiva do operador da infraestrutura de transporte instalada.

Segundo a referência, a estratégia de manutenção é uma questão chave na redução dos custos repassados aos usuários, uma vez que a política de manutenção eficaz pode reduzir as despesas totais finais e, portanto, aquelas transferidas aos passageiros.

Mackie et al. (2003) classificam as despesas de manutenção da via permanente em quatro categorias principais: a *Manutenção de Rotina* diz respeito aos itens básicos de conservação, como corte de grama e iluminação; a *Manutenção Recorrente* refere-se às atividades executadas em pequenos períodos de tempo (e.g um ano ou menos), tal como a manutenção do lastro;

e a *Manutenção Periódica* é aquela realizada em grandes intervalos tempo, como a troca de dormentes. Finalmente, a *Manutenção Urgente ou Especial* está relacionada a imprevistos ou eventos cujas ocorrências são de difícil previsão.

No contexto da proposta de formulação de *CBA*, as despesas relativas à manutenção da via permanente são calculadas em função de um coeficiente médio e da extensão dos alinhamentos ferroviários conforme indicado na Equação (4.10). Essa equação considera que a manutenção da via só começa a ocorrer nos períodos posteriores ao início da operação efetiva dos trens.

$$IC^M = \sum_{t=T_0}^T \frac{m \cdot \bar{q} \cdot RS^t \cdot 2 \cdot L_R \cdot TD}{(1 + MARR)^t} \quad (4.10)$$

onde IC^M = valor presente líquido das despesas de manutenção da infraestrutura; T = último ano do horizonte de avaliação socioeconômica; m = custo médio de manutenção da via permanente (R\$/assento-km); RS^t = número de trens operados no ano (t); L_R = comprimento do alinhamento ferroviário entre estações; $\bar{q}$ = capacidade total de um trem (número de assentos); $TD = ND \cdot \tau / H$ = número de viagens (ida e volta) executadas por um trem anualmente; e $MARR$ = taxa mínima de atratividade.

4.2.4.5 Despesas de Manutenção do Material Rodante

Para esse item, o valor presente líquido é calculado conforme a Equação (4.11), que considera um custo médio anual em função da distância total percorrida pela frota operante no ano t .

$$RSC^M = \sum_{t=T_0}^T \frac{r_m \cdot \bar{q} \cdot RS^t \cdot 2 \cdot L_R \cdot TD}{(1 + MARR)^t} \quad (4.11)$$

onde RSC^M = valor presente líquido das despesas de manutenção do material rodante; T = último ano do horizonte de avaliação socioeconômica; r_m = custo médio de manutenção do material rodante (R\$/assento-km); RS^t = número de trens operados no ano (t); L_R = comprimento do alinhamento ferroviário entre estações; $\bar{q}$ = capacidade total de um trem (número de assentos); $TD = ND \cdot \tau / H$ = número de viagens (ida e volta) executadas por um trem anualmente; e $MARR$ = taxa mínima de atratividade.

Analogamente às despesas de manutenção da infraestrutura, aquelas relativas ao material rodante são computadas apenas nos períodos posteriores ao final da construção da infraestrutura, ou seja, a partir do início da operação comercial dos trens.

4.2.5 Benefícios

4.2.5.1 Receitas

Ambos os documentos do Banco Mundial e do *WebTAG* esclarecem que as receitas operacionais são um dos itens mais importantes de benefícios econômicos de uma *CBA*. A demanda que potencialmente utilizará um novo modo de transporte é uma questão a ser equacionada pelos planejadores e depende dos objetivos do projeto do ponto de vista socioeconômico e das condições de modelagem (fontes de dados, orçamento disponível para pesquisas etc.).

O Banco Mundial apresenta instruções a respeito do cálculo dos benefícios econômicos advindos dos usuários induzidos a escolher o novo modo de transporte (*TRN-11: Treatment of Induced Traffic*) e as principais fontes de erros na previsão da demanda (*TRN-12: Demand Forecasting Errors*). O Reino Unido possui, em concomitância com o *WebTAG*, um manual específico para o tratamento da modelagem de demanda – o *PHDF (Passenger Demand Forecasting Handbook)* – a qual está sujeita às condições específicas de tráfego daquele país e que dificilmente podem ser equiparadas àquelas observadas na realidade brasileira.

O Banco Mundial apresenta princípios gerais em relação à definição do valor das passagens de um novo serviço de transporte, entretanto, os comentários limitam-se a informações generalizadas que dificultam o estabelecimento de uma estrutura tarifária. Maiores informações podem ser obtidas no *TRN-23: Evaluation Implications of Sub-optimum Pricing*, que trata dos efeitos da definição de subpreços como a superlotação do sistema e déficit financeiro.

O *WebTAG* apresenta um método específico para precificação de novos investimentos em rodovias no Reino Unido – sob as recomendações contidas no *TAG Unit 2.12C: Introduction to Modelling and Appraisal for Road Pricing* e no *TAG Unit 3.12: Road Pricing* – e para a aplicação na avaliação socioeconômica em projetos ferroviários de transporte de passageiros (*TAG Unit 3.13: Guidance on Rail Appraisal*).

Dadas as especificidades do *WebTAG* e a generalização do tema nas recomendações do Banco Mundial, a estimativa da demanda para utilização de novos sistemas ferroviários na Região Sudeste do Brasil foram estabelecidos especificamente para os propósitos desta pesquisa conforme descrito no Capítulo 3.

Na formulação de *CBA* proposta, a principal fonte de recursos econômicos para o operador é a receita do serviço ferroviário, dada pelo número total de passageiros que utilizam os serviços nos anos do horizonte de planejamento e a tarifa média cobrada por cada bilhete emitido.

Para uma dada tarifa específica, o valor presente líquido da receita anual para o operador considerando a demanda total que utiliza o sistema (equivalente à mudança modal e ao tráfego gerado pela operação de um novo modo de transporte) é dado pela Equação (4.12).

$$TR = \sum_{t=T_0}^T \frac{D^t \cdot (1 + GT) \cdot (P_{Rw} + P_{Rl}) \cdot FA_R \cdot L_R}{(1 + MARR)^t} \quad (4.12)$$

onde TR = valor presente líquido da receita total ; T = último ano do horizonte de avaliação socioeconômica; D^t = número total de viagens estimadas entre uma origem e um destino no ano t (em ambos os sentidos); P_{Rw} = percentual de usuários que escolhem o modo trem para viagens por motivo de trabalho no ano t após o início da operação do sistema mediante uma tarifa ferroviária preestabelecida; P_{Rl} = percentual de usuários que escolhem o modo trem para viagens por lazer ou outros motivos no ano t ; FA_R = tarifa ferroviária média (R\$/km); L_R = comprimento do alinhamento ferroviário entre estações; e $MARR$ = taxa mínima de atratividade.

Nesta tese a definição da tarifa ferroviária é estabelecida com base na abordagem de maximização dos benefícios totais do projeto, que tem como objetivo identificar o preço médio das passagens que maximiza os benefícios econômicos e/ou sociais advindos da operação dos trens na nova infraestrutura ferroviária. As análises socioeconômicas de uma rede ferroviária hipotética indicadas no Capítulo 5 abordam essa estratégia com maior detalhamento.

4.2.5.2 Valor Residual

Do ponto de vista econômico, após a construção da infraestrutura ferroviária e operação dos ativos adquiridos durante o horizonte de planejamento de um projeto é possível considerar que

existe um valor residual ao final do período de avaliação socioeconômica que representa uma parcela do valor total aplicado no investimento.

Esse valor depende dos níveis de utilização e manutenção da infraestrutura e dos demais ativos adquiridos ao longo do tempo. Entretanto, no caso de projetos de grande porte como uma nova infraestrutura ferroviária, o valor residual pode resultar valores expressivos ao final do horizonte de análise socioeconômica.

Nesta tese o valor residual total é calculado como uma porcentagem dos investimentos na construção da infraestrutura, desconsiderando-se um valor residual relacionado à aquisição dos demais ativos de tal modo que, por hipótese, esses itens depreciam-se totalmente durante o horizonte de planejamento de 35 anos.

Assim, o valor presente líquido do valor residual total (TRV) decorrente da depreciação é calculado como uma proporção dos investimentos em infraestrutura conforme a Equação 4.13.

$$TRV = \frac{\xi \cdot CC}{(1 + MARR)^T} \quad (4.13)$$

onde ξ = porcentagem de valor residual estimado da infraestrutura após utilização no horizonte de planejamento; CC = estimativa de custo de construção do novo traçado ferroviário, resultante da aplicação do Algoritmo Genético descrito no Capítulo 2; $MARR$ = taxa mínima de atratividade; e T = último ano do horizonte de avaliação socioeconômica.

Nesse sentido, do ponto de vista social, o valor residual (TVR) também pode ser considerado como um benefício que se estende à sociedade quando a entidade investidora na construção de uma infraestrutura é um órgão público. Portanto, além de um benefício econômico, o resultado da depreciação dos ativos relacionados à infraestrutura também é computado nesta tese como um benefício social na comparação entre os custos e benefícios da análise socioeconômica.

4.2.5.3 Excedente do Consumidor

A mensuração dos benefícios do excedente do consumidor baseia-se no conceito da disponibilidade do usuário em arcar com os custos de uma viagem diferente daquela que realiza. Esses benefícios são calculados com base na variação do custo generalizado de uma viagem e, con-

sequentemente, na possibilidade de redução do valor de um ou mais itens de custo da viagem pela melhoria do sistema de transporte existente ou implantação de uma nova tecnologia.

Apesar do usuário perceber diretamente apenas os custos econômicos de uma viagem, existem outros itens que perfazem o seu custo generalizado total (em geral, em termos de moeda corrente), tais como o equivalente monetário ao tempo dispendido no acesso ao equipamento de transporte e na viagem, desconfortos passíveis de mensuração, segurança etc.

O *TAG Unit 3.5.3: Transport User Benefit Calculation* do *WebTAG* introduz um procedimento de cálculo do excedente do consumidor em um cenário de demanda inelástica às alterações de custo generalizado da viagem. A Figura 4.3 representa graficamente esse excedente do consumidor (CS_{ij}) quando há uma alteração das condições de transporte entre uma origem i e um destino j .

Figura 4.3 – Estimativa do excedente do consumidor considerando demanda inelástica –

Fonte: DfT (2014)

$$CS_{ij} = (\text{Número Inicial de Viagens} + \text{Variação do Número de Viagens}) \cdot \text{Variação do Custo Generalizado} \quad (4.14)$$

$$= \text{Área do Retângulo } C^0_{ij}ABC^1_{ij} = (C^0_{ij} - C^1_{ij}) \cdot N^0_{ij} = (C^0_{ij} - C^1_{ij}) \cdot N^1_{ij}$$

onde C_{ij}^0 = custo generalizado de uma viagem antes da modificação do sistema de transporte; C_{ij}^1 = custo generalizado de uma viagem após a modificação do sistema de transporte; N_{ij}^0 = número de viagens antes da modificação do sistema de transporte; N_{ij}^1 = número de viagens após a modificação do sistema de transporte.

Entretanto, no âmbito da Engenharia de Transportes, a demanda geralmente decresce assintoticamente em função do custo generalizado de uma viagem e, portanto, ela é elástica e pode ser representada pela Figura 4.4. Nesse caso, analogamente à Equação (4.14), o excedente do consumidor é calculado em relação aos usuários que utilizam um modo de transporte (retângulo $C_{ij}^0 ABC_{ij}^1$) e àqueles que migram para o sistema (triângulos ABD).

Para efeito de simplificação a curva de demanda pode ser aproximada para um segmento reto (AD). Nesse caso, o excedente do consumidor pode ser formulado conforme a Equação (4.15) conforme recomendado pelo Banco Mundial (MACKIE et al., 2003).

Figura 4.4 – *Rule of Half* para estimativa do excedente do consumidor considerando demanda elástica

$$\begin{aligned}
 CS_{ij} &= \text{Área do Retângulo } C_{ij}^0 ABC_{ij}^1 + \text{Área do Triângulo } ABD \\
 &= (C_{ij}^0 - C_{ij}^1) \cdot N_{ij}^1 + \frac{1}{2} \cdot (C_{ij}^0 - C_{ij}^1) \cdot (N_{ij}^1 + N_{ij}^0)
 \end{aligned}
 \tag{4.15}$$

Apesar dessa definição ser contemplada pelo *TAG Unit 3.5.3* (DFT, 2014) para o cálculo do excedente do consumidor, as diretrizes estabelecidas esclarecem que essa abordagem geralmente não permite estimativas acuradas em relação ao modo de transporte que os usuários deixaram de usar. Assim, Williams e Sugden (1988) propõem a aplicação da Equação (4.15) ao k -ésimo modo de transporte resultando na Equação (4.16).

$$TCS_{ij} = \sum_M CS_{ijM} = \sum_M \frac{1}{2} \cdot (C_{ijM}^0 - C_{ijM}^1) \cdot (N_{ijM}^1 - N_{ijM}^0) \quad (4.16)$$

onde TCS_{ij} = excedente do consumidor total considerando todos os modos de transporte; C_{ijM}^0 = custo generalizado de uma viagem pelo modo M antes da modificação do sistema de transporte; C_{ijM}^1 = custo generalizado de uma viagem pelo modo M após a modificação do sistema de transporte; N_{ijM}^0 = número de viagens pelo modo M antes da modificação do sistema de transporte; N_{ijM}^1 = número de viagens pelo modo M após a modificação do sistema de transporte.

Nellthorp e Hyman (2001) esclarecem que, apesar dessa abordagem ser amplamente difundida para o cálculo do excedente do consumidor na análise de projetos de transporte, o método é falho em três situações: quando há uma grande diferença nos custos generalizados antes e depois da melhoria do sistema (*i.e.* quando a curva de demanda entre C_{ijM}^0 e C_{ijM}^1 não pode ser aproximada para uma reta); quando um novo modo de transporte é introduzido; ou quando novos polos geradores ou atratores de viagens são criados após a implantação da infraestrutura.

No âmbito da formulação de análise custo-benefício desta tese o cálculo do excedente do consumidor enquadra-se na segunda falha ao aplicar-se a Equação (4.16). Nesse sentido, Nellthorp e Hyman (2001) apresentam uma abordagem alternativa considerando a demanda pelos serviços como uma função contínua dependente do custo generalizado de uma viagem.

Os autores estabelecem que o excedente do consumidor pela oferta de um novo modo de transporte pode ser representado graficamente pela Figura 4.5 e calculado pela Equação (4.17).

Figura 4.5 – Modelo teórico para estimativa do excedente do consumidor – Fonte: Nellthorp e Hyman (2001)

$$CS_{ijM} = \int_{C_{ijM}^0}^{C_{ijM}^1} D_{ijM}(C_{ijM}) dC_{ijM} \quad (4.17)$$

onde $N_{ijM}(C_{ijM})$ = número de passageiros pelo modo de transporte M entre i e j representado como uma função contínua do custo generalizado C_{ijM} ; C_{ijM}^0 = custo generalizado da viagem para o qual nenhum usuário escolheria o modo de transporte M entre i e j ; C_{ijM}^1 = custo generalizado entre i e j após a implementação do sistema.

Um problema prático de aplicação dessa formulação decorre do fato de que a função de demanda nem sempre é diferenciável e, portanto, o cálculo da integral da Equação (4.17) pode ser inviabilizado, como no caso de modelos de escolha hierárquica (*e.g.* árvores de decisão) ou de funções descontínuas que representam a escolha modal. Para resolver esse problema, Nellthorp e Hyman (2001) consideram a integração numérica da curva de demanda em intervalos igualmente espaçados conforme indicado na Figura 4.6.

Figura 4.6 – Aproximação numérica do *Rule of Half* para estimativa do excedente do consumidor segundo Nellthorp e Hyman (2001)

A recomendação dos autores é considerar intervalos iguais entre C^0_{ijM} e C^1_{ijM} , de modo que o custo generalizado nos pontos intermediários esses valores destacados na Figura 4.6 são calculados pelas equações a seguir.

$$C^a_{ijM} = C^1_{ijM} + 0,75 \cdot (C^0_{ijM} - C^1_{ijM}) = 0,75 \cdot C^0_{ijM} + 0,25 \cdot C^1_{ijM} \quad (4.18)$$

$$C^b_{ijM} = C^1_{ijM} + 0,50 \cdot (C^0_{ijM} - C^1_{ijM}) = 0,50 \cdot C^0_{ijM} + 0,50 \cdot C^1_{ijM} \quad (4.19)$$

$$C^c_{ijM} = C^1_{ijM} + 0,25 \cdot (C^0_{ijM} - C^1_{ijM}) = 0,25 \cdot C^0_{ijM} + 0,75 \cdot C^1_{ijM} \quad (4.20)$$

Portanto, o excedente do consumidor decorrente da implantação de um novo sistema de transporte ferroviário de passageiro mediante um custo generalizado de viagem poder ser calculado conforme a Equação (4.21).

$$\begin{aligned} CS_{ijM} &= \frac{1}{2} \cdot \{ N^a_{ijM} \cdot (C^0_{ijM} - C^a_{ijM}) + (N^a_{ijM} + N^b_{ijM}) \cdot (C^a_{ijM} - C^b_{ijM}) \\ &\quad + (N^b_{ijM} + N^c_{ijM}) \cdot (C^b_{ijM} - C^c_{ijM}) \\ &\quad + (N^c_{ijM} + N^1_{ijM}) \cdot (C^c_{ijM} - C^1_{ijM}) \} \\ &= \frac{1}{2} \cdot (0,25 \cdot C^0_{ijM} - 0,25 \cdot C^1_{ijM}) \cdot (2 \cdot N^a_{ijM} + 2 \cdot N^b_{ijM} + 2 \cdot N^c_{ijM} + N^1_{ijM}) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Nellthorp e Hyman (2001) apontam que a integração numérica satisfaz o cálculo do excedente do consumidor apesar de dificuldades práticas para definição de alguns parâmetros no procedimento. O primeiro problema paramétrico é estabelecer o valor de C_{ijM}^0 da Figura 4.5 que resulta em um número de viagens N_{ijM} próximo de zero. Nesse caso, os autores recomendam um valor aproximado de $C_{ijM}^0 = 3 \cdot C_{ijM}^1$, o qual pode ser ajustado para valores mais realísticos dependendo das condições da função de demanda.

Outro fator de ordem prática diz respeito à quantidade de intervalos entre os extremos C_{ijM}^0 e C_{ijM}^1 que resulte em uma aproximação adequada da integração numérica da função de demanda. Novamente, Nellthorp e Hyman (2001) indicam que três pontos intermediários (conforme ilustrado na Figura 4.6) são suficientes para uma estimativa adequada e que a adição de mais intervalos não contribui para um aumento significativo da acurácia.

Para efeito das análises socioeconômicas propostas nesta tese, o custo generalizado da viagem é dividido em dois elementos: custos econômicos referentes ao preço das passagens dos novos serviços ferroviários; e custos de tempo de viagem resultantes da relação entre o tempo de percurso (incluindo acesso e egresso) e o valor do tempo mediante o motivo da viagem.

a. Excedente do Consumidor devido às Tarifas

Primeiramente, considera-se que os custos médios de viagem dos modos de transporte diferentes do ferroviário não sofrerão alterações significativas ao longo do horizonte de planejamento da análise socioeconômica, mesmo aquelas decorrentes de efeitos inflacionários uma vez que incidiriam também no preço das passagens de trem.

Portanto, é válida a premissa de que o excedente do consumidor para os modos de transporte diferentes do ferroviário é nula – ou seja, os custos C_{ijM}^0 e C_{ijM}^1 permanecem constantes na Equação (4.16) –, sobretudo pelo fato de que a previsão de alterações nos demais sistemas de transporte e a estimativa de seus efeitos econômicos são inviáveis para aplicação nesta tese.

Para efeito de cálculo numérico, considera-se a substituição do número de viagens N_{ij} entre o par de cidades (i,j) na Equação (4.21) pelos percentuais de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens a trabalho (P_{Rw}) ou lazer (P_{Rl}). Disto, considere C_R^1 o custo monetário dessa viagem ao passageiro (*i.e.* o preço da passagem) e C_R^0 o valor da passagem em que a

escolha do modo ferroviário (*HPT* ou *HST*) é igual a zero, ou seja, na situação hipotética de que nenhum usuário está disposto a pagar esse valor pela viagem.

Assim, considerando os percentuais de escolha modal a partir das tarifas ferroviárias nos pontos intermediários entre C_R^0 e C_R^1 , o excedente do consumidor decorrente da cobrança de tarifa pelos serviços pode ser calculado conforme a Equação (4.22).

$$\begin{aligned}
 TCSUC = \sum_{t=T_0}^T \frac{1}{2} \cdot \frac{D^t}{(1 + MARR)^t} \\
 \cdot \{ [0, 25 \cdot C_R^0 - 0, 25 \cdot C_R^1] \\
 \cdot [2 \cdot (P_{Rw}^a + P_{Lw}^a) + 2 \cdot (P_{Rw}^b + P_{Lw}^b) \\
 + 2 \cdot (P_{Rw}^c + P_{Lw}^c) + (P_{Rw}^1 + P_{Lw}^1)] \}
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

onde P_{Rw}^1 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando a tarifa é igual a C_R^1 ;

P_{Rw}^a = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando a tarifa é igual a $C_R^1 + 0, 25 \cdot (C_R^0 - C_R^1)$;

P_{Rw}^b = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando a tarifa é igual a $C_R^1 + 0, 50 \cdot (C_R^0 - C_R^1)$;

P_{Rw}^c = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando a tarifa é igual a $C_R^1 + 0, 75 \cdot (C_R^0 - C_R^1)$;

P_{Rw}^0 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando a tarifa é igual a C_R^0 ;

P_{Rl}^1 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando a tarifa é igual a C_R^1 ;

P_{Rl}^a = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando a tarifa é igual a $C_R^1 + 0, 25 \cdot (C_R^0 - C_R^1)$;

P_{Rl}^b = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando a tarifa é igual a $C_R^1 + 0, 50 \cdot (C_R^0 - C_R^1)$;

P_{RI}^c = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando a tarifa é igual a $C_R^1 + 0,75 \cdot (C_R^0 - C_R^1)$;

P_{RI}^0 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando a tarifa é igual a C_R^0 .

b. Excedente do Consumidor devido ao Tempo de Viagem

Assim como no caso das tarifas para o cálculo do excedente dos consumidor, considera-se válida a premissa de que os tempos de viagem dos modos de transporte diferentes do ferroviário (Automóvel, Ônibus e Avião) permanecerão praticamente constantes ao longo do horizonte de planejamento da CBA. Portanto, novamente, o excedente do consumidor daqueles modos é considerado nulo uma vez que $C_{ij}^0 = C_{ij}^1$ na Equação (4.16).

De acordo com o documento *TRN-15: Valuation of Time Saving* das recomendações do Banco Mundial, a redução dos tempos de viagem pela implementação ou melhoria das condições de um modo de transporte pode ser contabilizado em até 80% dos benefícios totais do projeto em países desenvolvidos.

Seja VOT_w o valor monetário do tempo de viagem por motivo de trabalho (R\$/hora), VOT_l o valor monetário do tempo de viagem por lazer ou outros motivos (R\$/hora), TT_R^0 o tempo de viagem pelo modo ferroviário (*HPT* ou *HST*) no qual a sua escolha é praticamente nula (*i.e.* o número de passageiros nessas condições de viagens não é significativo) e TT_R^1 o tempo de viagem efetivo dependendo da velocidade média da tecnologia ferroviária.

Assim, o excedente do consumidor total decorrente da redução do tempo de viagem para os motivos de viagem (*TCSTS*) pode ser calculado conforme a Equação (4.23).

$$\begin{aligned}
 TCSTS = \sum_{t=T_0}^T \frac{1}{2} \cdot \frac{D^t}{(1 + MARR)^t} & \cdot \left\{ [0,25 \cdot VOT_w \cdot TT_R^0 - 0,25 \cdot VOT_w \cdot TT_R^1] \right. \\
 & \cdot [2 \cdot P_{Rw}^a + 2 \cdot P_{Rw}^b + 2 \cdot P_{Rw}^c + P_{Rw}^1] \\
 & + [0,25 \cdot VOT_l \cdot TT_R^0 - 0,25 \cdot VOT_l \cdot TT_R^1] \\
 & \cdot [2 \cdot P_{Rl}^a + 2 \cdot P_{Rl}^b + 2 \cdot P_{Rl}^c + P_{Rl}^1] \left. \right\} \quad (4.23)
 \end{aligned}$$

onde P_{Rw}^1 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_w \cdot TT_R^1$;

P_{Rw}^a = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_w \cdot [TT_R^1 + 0,75 \cdot (TT_R^0 - TT_R^1)]$;

P_{Rw}^b = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_w \cdot [TT_R^1 + 0,50 \cdot (TT_R^0 - TT_R^1)]$;

P_{Rw}^c = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_w \cdot [TT_R^1 + 0,25 \cdot (TT_R^0 - TT_R^1)]$;

P_{Rw}^0 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de trabalho quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_w \cdot TT_R^0$;

P_{Rl}^1 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_l \cdot TT_R^1$;

P_{Rl}^a = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_l \cdot [TT_R^1 + 0,75 \cdot (TT_R^0 - TT_R^1)]$;

P_{Rl}^b = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_l \cdot [TT_R^1 + 0,50 \cdot (TT_R^0 - TT_R^1)]$;

P_{Rl}^c = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_l \cdot [TT_R^1 + 0,25 \cdot (TT_R^0 - TT_R^1)]$;

P_{Rl}^0 = percentual de usuários que escolhem o modo ferroviário para viagens por motivo de lazer ou outros quando o equivalente monetário do tempo de viagem é igual a $VOT_l \cdot TT_R^0$.

Do ponto de vista de análise do valor do tempo de viagem por motivo de trabalho, existem duas abordagens apresentadas pelo Banco Mundial para aplicações em projetos de países em desenvolvimento: a comparação em relação ao salário médio e a abordagem de Hensher.

A primeira estratégia sugere que a economia em relação à redução do tempo de viagem é equivalente a uma proporção do salário médio somado aos custos de uma unidade extra de trabalho. Por outro lado, o segundo método sugere uma alteração do valor do salário médio considerando diferentes fatores, como a proporção do tempo utilizado para lazer ao invés de trabalho adicional, ou a proporção do tempo da viagem utilizado para execução de uma atividade relacionada ao trabalho.

Apesar de mais acurada, a abordagem de Hensher mostra-se mais difícil de aplicação prática e requer um banco de dados confiável para sua estimativa, de modo que o *TRN-15: Valuation of Time Saving* recomenda aquela baseada no salário médio para avaliação preliminar de viabilidade socioeconômica de projetos de transporte. A Tabela 4.2 a seguir representa os três principais métodos de estimativa do valor do tempo de viagem por motivo de viagem a trabalho segundo essa abordagem proposta pelo Banco Mundial.

Tabela 4.2 – Alternativas para estimativa do tempo médio de viagem por motivo trabalho - adaptado de Mackie et al. (2003)

ABORDAGEM	TIPO	MÉTODO
Caso Base	Valor Simples	Opção 1: Salário médio modificado por fatores exógenos de ajuste
		Opção 2: 1,33·Salário Médio
Segunda melhor alternativa	Por modo de transporte	Ajustado pelo salário médio observado utilizando fatores de ajuste
Ideal	Por setor da economia	Ajustado pelo salário médio a partir de fatores em função do setor da economia (serviços, indústria, comércio etc.)

Por outro lado, a estimativa do valor do tempo de viagem por motivo lazer depende de outros fatores como a renda do indivíduo, *status* social, tempos de espera e acesso/egresso ao modo de transporte e condições da viagem (MACKIE et al., 2003). Assim, no âmbito econômico, a sua definição está associada à diferença entre o valor marginal do tempo dispendido na viagem e no tempo efetivo de lazer.

Analogamente à estimativa do valor do tempo de viagem a trabalho, o Banco Mundial sugere alternativas para esse parâmetro em viagens pelo motivo lazer conforme a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Alternativas para estimativa do tempo médio de viagem por motivo lazer - adaptado de Mackie et al. (2003)

ABORDAGEM	TIPO	MÉTODO
Base	Valor Simples	Adultos: $0,3 \cdot \text{Renda Média Familiar}$
		Crianças: $0,15 \cdot \text{Renda Média Familiar}$
		Ajuste para tempo de acesso/egresso e espera: $1,5 \cdot \text{Valor do Tempo de Viagem no Veículo (IVT - In-vehicle Time)}$
Segunda Melhor	Por modo de transporte	Valoração por métodos de pesquisa de preferência declarada e revelada
		Ajustado pelo preço base da tarifa
Ideal	Por grupos de renda, socioeconômicos ou motivos específicos de viagem	Valoração por métodos de pesquisa de preferência declarada e revelada
		Ajustado pelo preço base da tarifa

Na avaliação de novos projetos ferroviários apresentado nesta tese, o valor monetário do tempo de viagem pelo motivo trabalho (VOT_w) é definido como " $1,33 \cdot \text{Salário Médio}$ " na Região Sudeste (Tabela 4.2) e pelo motivo lazer (VOT_l) é definido como " $0,3 \cdot \text{Renda média familiar per capita}$ " na mesma região (Tabela 4.3).

4.2.5.4 Redução de Acidentes

Ao invés de considerar os custos com acidentes como uma componente do custo generalizado da viagem, o Banco Mundial infere que esses itens são eventos aleatórios que podem ser computados pelo total de acidentes ocorridos e as suas respectivas severidades por modo de transporte. Nellthorp, Mackie e Bristow (1998) apresentam uma classificação da severidade na tentativa de mensurar os benefícios econômicos decorrentes da redução de acidentes, os quais são discriminados nos itens a seguir.

- *Fatal*: com pelo menos uma morte no intervalo máximo de 30 dias em consequência do acidente;
- *Grave*: não há mortes porém os danos requerem tratamento hospitalar intenso e resulta em lesões permanentes;

- *Moderado*: ocorrências que não necessitam de atendimento hospitalar mas, se o requerem, os efeitos das lesões não são duradouros;
- *Danos menores*: apenas danos materiais sem vítimas.

Jacobs (1995) apresenta cinco possíveis métodos de estimativa dos custos de acidentes em sistemas de transporte.

- *Gross Output* ou *Human Capital*: o custo de uma fatalidade é equivalente aos ganhos futuros da vítima;
- *Net Output*: o custo da fatalidade é igual ao *Gross Output* subtraído do consumo da vítima após o sinistro;
- *Life Insurance*: o custo do acidente é equivalente à quantia monetária que a vítima está disposta a pagar pelo seguro de sua própria vida;
- *Court Award*: o custo de um acidente está vinculado à soma das recompensas dadas pelos tribunais aos dependentes das vítimas;
- *Implicit Public Sector Valuation*: o custo dos acidentes é dado por uma estimativa dos custos necessários à sua prevenção;
- *Value of Risk Change* ou *Willingness-to-Pay*: o custo dos acidentes é definido pelo valor que os usuários estão dispostos a pagar pela melhoria da segurança do sistema de transporte (*i.e.* pela redução dos riscos).

Sob essas definições, Nellthorp, Mackie e Bristow (1998) consideram os componentes de custo dos acidentes como a soma daqueles relativos à severidade (*e.g.* custos médicos e administrativos, tratamento psicológico às vítimas etc.) e aos danos materiais ocorridos (*e.g.* serviços de emergência como bombeiros e polícia, custos legais etc.).

Do ponto de vista do Banco Mundial a abordagem *Gross Output* é o método mais apropriado para definição do valor dos acidentes para estimativa dos benefícios decorrentes da implementação de sistemas de transporte mais seguros. Por outro lado, o *WebTAG* recomenda *Willingness-to-Pay* como alternativa mais adequada para estimativa desses benefícios. Nesta tese, a primeira abordagem (*Gross Output*) será considerada para desenvolvimento da formulação de CBA em detrimento da recomendação do *WebTAG*.

Segundo Mackie et al. (2003), é necessário estabelecer um modelo de estimativa do número de acidentes para cada modo de transporte, dadas as respectivas demandas e suas características operacionais, em geral, em termos do número de acidentes em um período de tempo.

Dado que a ocorrência de um acidente envolve mais de uma perda, é comum que o número médio de perdas por acidente seja definido em termos de valores médios (*e.g.* danos materiais severos e mortes). Portanto, os custos econômicos decorrentes dos acidentes devem refletir um número médio de danos por severidade (fatal, grave, moderado ou de danos menores).

Uma vez que a formulação de *CBA* apresentada nesta tese é para estimar os valores mais representativos da análise socioeconômica de novas conexões ferroviárias, a formulação apresentada considera um coeficiente que representa o número médio de acidentes por modo de transporte e os respectivos custos médios considerando a severidade. Assim, o custo total dos acidentes é dado pela soma do produto entre o número de acidentes por severidade e seus respectivos custos por modo de transporte e, portanto, os benefícios estão relacionados à redução dos custos totais após a implementação do projeto.

Os padrões de viagens intermunicipais da Região Sudeste indicam que o número de passageiros transportados pelos modos Automóvel e Ônibus são maiores que por Avião (conforme relatado no Capítulo 3). Considerando válidas as premissas de que o risco de acidentes por aqueles dois modos é maior do que pelo último, e de que o número de passageiros transferidos daqueles para modo ferroviário é maior que a transferência do modo aéreo, espera-se uma redução do custo total de acidentes pela implementação de serviços ferroviários pois o número de viagens transferidas é maior dos modos com maior índice de accidentalidade.

Sejam AAC_C , AAC_B , AAC_R e AAC_A os custos médios de acidentes para Automóveis, Ônibus, Trens e Avião, receptivamente, expressos em passageiros-km e que incorporam uma taxa de accidentalidade em função de cada modo de transporte.

A formulação proposta para estimativa da redução dos valores monetários decorrentes de acidentes é dada pela diferença entre o custo total de acidentes por modo de transporte na ausência de uma infraestrutura ferroviária e esse custo total no cenário com a operação das ferrovias. Assim, a formulação para cômputo dos valores monetários totais de acidentes pelo modo Automóvel no ano t sem a existência de uma infraestrutura ferroviária (*i.e.* $P_R^t = 0$) é dada pela Equação (4.24).

$$ACNR_C^t = AAC_C \cdot D^t \cdot PNR_C^t \cdot L_C \quad (4.24)$$

onde $ACNR_C^t$ = custo de acidentes pelo modo Automóvel no ano t no cenário sem infraestrutura ferroviária; PNR_C^t = percentual de usuários que escolhem o modo Automóvel no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer na ausência do modo ferroviário.

De maneira análoga, o valor monetário total dos acidentes por Ônibus e Avião na ausência do modo ferroviário no ano t do horizonte de planejamento é dado por, respectivamente:

$$ACNR_B^t = AAC_B \cdot D^t \cdot PNR_B^t \cdot L_B \quad (4.25)$$

$$ACNR_A^t = AAC_A \cdot D^t \cdot PNR_A^t \cdot L_A \quad (4.26)$$

onde $ACNR_B^t$ = custo de acidentes pelo modo Ônibus no ano t no cenário sem infraestrutura ferroviária; $ACNR_A^t$ = custo de acidentes pelo modo Avião no ano t no cenário sem infraestrutura ferroviária; PNR_B^t = percentual de usuários que escolhem o modo Ônibus no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer na ausência do modo ferroviário; PNR_A^t = percentual de usuários que escolhem o modo Avião no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer na ausência do modo ferroviário.

Por outro lado, no ano t do horizonte de planejamento em que supõe-se a existência de uma infraestrutura ferroviária e operação dos trens, o valor monetário total de acidentes para os modos Automóvel, Ônibus, Trens e Avião são dados, respectivamente, pela Equação 4.27 à Equação 4.30. O índice referente ao ano na proporção de usuários (P_C^t , P_B^t , P_R^t e P_A^t) faz-se necessário para distinguir a utilização dos sistemas antes e depois da finalização das linhas ferroviárias e início da operação dos serviços.

$$AC_C^t = AAC_C \cdot D^t \cdot P_C^t \cdot L_C \quad (4.27)$$

$$AC_B^t = AAC_B \cdot D^t \cdot P_B^t \cdot L_B \quad (4.28)$$

$$AC_R^t = AAC_R \cdot D^t \cdot (1 + GT) \cdot P_R^t \cdot L_R \quad (4.29)$$

$$AC_A^t = AAC_A \cdot D^t \cdot P_A^t \cdot L_A \quad (4.30)$$

onde D^t = número total de viagens estimadas entre uma origem e um destino no ano t (em ambos os sentidos); P_C^t = percentual de usuários que escolhem o modo Automóvel no ano t

por motivo de viagem trabalho e lazer após implantação do modo ferroviário; P_B^t = percentual de usuários que escolhem o modo Ônibus no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer após implantação do modo ferroviário; P_R^t = percentual de usuários que escolhem o modo Trem no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer; P_A^t = percentual de usuários que escolhem o modo Avião no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer após implantação do modo ferroviário.

Portanto, das equações apresentadas anteriormente o valor monetário esperado pela redução de acidentes para os modos Automóvel, Ônibus, Trens e Avião são, respectivamente:

$$\begin{aligned} MAR_C^t &= ACNR_C^t - AC_C^t \\ &= AAC_C \cdot D^t \cdot (PNR_C^t - P_C^t) \cdot L_C \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} MAR_B^t &= ACNR_B^t - AC_B^t \\ &= AAC_B \cdot D^t \cdot (PNR_B^t - P_B^t) \cdot L_B \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} MAR_R^t &= AC_R^t \\ &= AAC_R \cdot D^t \cdot (1 + GT) \cdot P_R^t \cdot L_R \end{aligned} \quad (4.33)$$

$$\begin{aligned} MAR_A^t &= ACNR_A^t - AC_A^t \\ &= AAC_A \cdot D^t \cdot (PNR_A^t - P_A^t) \cdot L_A \end{aligned} \quad (4.34)$$

Portanto, o valor presente líquido total estimado dos benefícios de redução de acidentes decorrentes da operação de novos serviços ferroviários é calculado segundo a Equação (4.35).

$$\begin{aligned} TAR &= \sum_{t=0}^T \frac{MAR_C^t + MAR_B^t + MAR_R^t + MAR_A^t}{(1 + MARR)^t} \\ &= \sum_{t=0}^T \frac{D^t}{(1 + MARR)^t} \cdot [AAC_C \cdot (PNR_C^t - P_C^t) \cdot L_C \\ &\quad + AAC_B \cdot (PNR_B^t - P_B^t) \cdot L_B \\ &\quad - AAC_R \cdot (1 + GT) \cdot P_R^t \cdot L_R \\ &\quad + AAC_A \cdot (PNR_A^t - P_A^t) \cdot L_A] \end{aligned} \quad (4.35)$$

É importante esclarecer que os benefícios monetários da redução de acidentes pela operação de Trens de Alto Desempenho (*HPT*) são calculados conforme a Equação (4.35). Entretanto, dadas as especificidades operacionais dos Trens de Alta Velocidade pela automatização do controle dos trens, nenhum acidente com veículos acima de 300 km/h foi registrado até o momento (NASH, 2010) e, portanto, o valor da Equação 4.33 é nulo (*i.e.* $ARR_R = 0$ para *HSTs*) resultando em maiores benefícios quanto a esse item da *CBA* para essa tecnologia.

4.2.5.5 Externalidades

As externalidades em uma análise socioeconômica estão relacionadas às alterações dos impactos ambientais decorrentes da modificação do sistema de transporte de uma região. Segundo as recomendações do Banco Mundial contidas no *TRN 17: Treatment of Environmental Impacts* esses impactos são "distúrbios no ambiente natural e incluem as alterações no solo, recursos hídricos, vida animal e flora".

Mackie et al. (2003) sugerem um procedimento de Avaliação Ambiental (*Environmental Assessment*) para identificar e evitar (ou mitigar) os potenciais efeitos negativos decorrentes da implementação do investimento. Entretanto, dado o seu alto grau de especificidade e a grande quantidade de dados necessários para sua elaboração, considera-se nesta tese apenas a estimativa dos prováveis valores econômicos decorrentes das alterações das externalidades provocadas pela implantação de novos sistemas ferroviários para o transporte de passageiros.

Os valores médios decorrentes das externalidades de cada modo de transporte são obtidos de estudos prévios acerca dos seus efeitos sobre a biodiversidade e o meio urbano, e quanto à poluição do solo, ar e água, e de alterações da paisagem natural.

Sejam AEC_C , AEC_B , AEC_R e AEC_A os custos médios das externalidades (poluição ambiental, alteração do ambiente e efeitos sobre a biodiversidade) devido à operação dos Automóveis, Ônibus, Trens e Aviões, respectivamente. Assim, o valor econômico das externalidades para cada modo de transporte existente antes da implantação de uma infraestrutura ferroviária é dado pelo conjunto de equações a seguir.

$$ECNR_C^t = AEC_C \cdot D^t \cdot PNR_C^t \cdot L_C \quad (4.36)$$

$$ECNR_B^t = AEC_B \cdot D^t \cdot PNR_B^t \cdot L_B \quad (4.37)$$

$$ECNR_A^t = AEC_A \cdot D^t \cdot PNR_A^t \cdot L_A \quad (4.38)$$

onde $ECNR_C^t$ = custo de externalidades pelo modo Automóvel no ano t no cenário sem infraestrutura ferroviária; $ECNR_B^t$ = custo de externalidades pelo modo Ônibus no ano t no cenário sem infraestrutura ferroviária; $ECNR_A^t$ = custo de externalidades pelo modo aéreo no ano t no cenário sem infraestrutura ferroviária; D^t = número total de viagens estimadas entre uma origem e um destino no ano t (em ambos os sentidos); PNR_C^t = percentual de usuários que escolhem o modo Automóvel no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer na ausência do modo ferroviário; PNR_B^t = percentual de usuários que escolhem o modo Ônibus no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer na ausência do modo ferroviário; PNR_A^t = percentual de usuários que escolhem o modo Avião no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer na ausência do modo ferroviário.

No caso da operação ferroviária os valores monetários das externalidades dos Automóveis, Ônibus, Trens e Aviões são calculados pelas respectivas Equação (4.39) à Equação (4.42). Novamente, o índice referente ao ano na proporção de usuários (P_C^t , P_B^t , P_R^t e P_A^t) distingue a utilização dos sistemas antes e depois do início da operação dos serviços.

$$EC_C^t = AEC_C \cdot D^t \cdot P_C^t \cdot L_C \quad (4.39)$$

$$EC_B^t = AEC_B \cdot D^t \cdot P_B^t \cdot L_B \quad (4.40)$$

$$EC_R^t = AEC_R \cdot D^t \cdot (1 + GT) \cdot P_R^t \cdot L_R \quad (4.41)$$

$$EC_A^t = AEC_A \cdot D^t \cdot P_A^t \cdot L_A \quad (4.42)$$

onde EC_C^t = custo de externalidades pelo modo Automóvel no ano t no cenário de operação ferroviária; EC_B^t = custo de externalidades pelo modo Ônibus no ano t no cenário de operação

ferroviária; EC_R^t = custo de externalidades dos trens no ano t no cenário de operação ferroviária; EC_A^t = custo de externalidades pelo modo aéreo no ano t no cenário de operação ferroviária; D^t = número total de viagens estimadas entre uma origem e um destino no ano t (em ambos os sentidos); P_C^t = percentual de usuários que escolhem o modo Automóvel no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer após implantação do modo ferroviário; P_B^t = percentual de usuários que escolhem o modo Ônibus no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer após implantação do modo ferroviário; P_R^t = percentual de usuários que escolhem o modo Trem no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer; P_A^t = percentual de usuários que escolhem o modo Avião no ano t por motivo de viagem trabalho e lazer após implantação do modo ferroviário.

Do exposto, a variação dos valores monetários devido às alterações de externalidade no ano t para cada modo de transporte após o início da operação dos trens são calculados como se segue.

$$\begin{aligned} ER_C^t &= ECNR_C^t - EC_C^t \\ &= AEC_C \cdot D^t \cdot (PNR_C^t - P_C^t) \cdot L_C \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} ER_B^t &= ECNR_B^t - EC_B^t \\ &= AEC_B \cdot D^t \cdot (PNR_B^t - P_B^t) \cdot L_B \end{aligned} \quad (4.44)$$

$$\begin{aligned} ER_R^t &= EC_R^t \\ &= AEC_R \cdot D^t \cdot (1 + GT) \cdot P_R^t \cdot L_R \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} ER_A^t &= ECNR_A^t - EC_A^t \\ &= AEC_A \cdot D^t \cdot (PNR_A^t - P_A^t) \cdot L_A \end{aligned} \quad (4.46)$$

Portanto, o valor presente líquido total da variação dos valores econômicos das externalidades pela construção e operação de uma conexão ferroviária é calculado pela Equação 4.47.

$$\begin{aligned}
TER &= \sum_{t=0}^T \frac{ER_C^t + ER_B^t + ER_R^t + ER_A^t}{(1 + MARR)^t} \\
&= \sum_{t=0}^T \frac{D^t}{(1 + MARR)^t} \cdot [AEC_C \cdot (PNR_C^t - P_C^t) \cdot L_C \\
&\quad + AEC_B \cdot (PNR_B^t - P_B^t) \cdot L_B \\
&\quad - AEC_R \cdot (1 + GT) \cdot P_R^t \cdot L_R \\
&\quad + AEC_A \cdot (PNR_A^t - P_A^t) \cdot L_A]
\end{aligned} \tag{4.47}$$

4.2.6 Medidas de Desempenho

O Valor Presente Líquido Total ($TNPV$) e a Taxa Interna de Retorno (IRR) são as medidas de desempenho mais comuns para avaliação e comparação de projetos. Enquanto o foco do $TNPV$ é a relação entre os benefícios e custos totais ao longo da vida útil do projeto, a IRR está relacionada à taxa decorrente do fluxo financeiro no horizonte de planejamento.

O $TNPV$ é a soma dos valor presente líquido dos benefícios do projeto subtraído do valor presente líquido dos seus custos totais ao longo da vida útil descontados a uma taxa específica de atratividade. Algebricamente, essa medida de desempenho é definida pela Equação (4.48).

$$\begin{aligned}
TNPV &= B^0 + \frac{B^1}{(1 + MARR)} + \dots + \frac{B^t}{(1 + MARR)^t} \\
&\quad - C^0 - \frac{C^1}{(1 + MARR)} - \dots - \frac{C^t}{(1 + MARR)^t} \\
&= B^0 - C^0 + \frac{B^1 - C^1}{(1 + MARR)} + \dots + \frac{B^t - C^t}{(1 + MARR)^t} \\
&= \sum_{t=0}^T \frac{B^t - C^t}{(1 + MARR)^t} \\
&= (TR + TRV + TCSUC + TCSTS + TAR + TER) \\
&\quad - (IC^C + RSC^A + RSC^O + IC^M + RSC^M)
\end{aligned} \tag{4.48}$$

onde B^t = Benefícios Totais no ano t ; C^t = Custos Totais no ano t ; onde TR = valor presente líquido da receita total; TRV = valor presente líquido do valor residual da infraestrutura; $TCSUC$ = valor presente líquido do excedente do consumidor devido à tarifa; $TCSTS$ = valor

presente líquido do excedente do consumidor devido ao tempo de viagem ; TAR = valor presente líquido devido à redução de acidentes ; TER = valor presente líquido devido à redução de externalidades; IC^C = valor presente líquido dos investimentos para construção da infraestrutura; RSC^A = valor presente líquido dos investimentos para aquisição de material rodante; RSC^O = valor presente líquido das despesas de operação do material rodante; IC^M = valor presente líquido das despesas de manutenção da infraestrutura; RSC^M = valor presente líquido das despesas de manutenção do material rodante.

Nesta tese, o termo "Valor Presente Líquido Econômico" ($ENPV$) é utilizado para representar somente a diferença entre o valor presente líquido dos benefícios econômicos do projetos e os seus respectivos custos econômicos segundo a Equação 4.49.

$$ENPV = (TR + TRV) - (IC^C + RSC^A + RSC^O + IC^M + RSC^M) \quad (4.49)$$

Por outro lado, a IRR é estimada como a taxa de desconto que anula os custos e benefícios econômicos totais do projeto no ano base de cálculo da avaliação socioeconômica, tal como caracterizado na Equação (4.50)

$$IRR = \text{Taxa de Desconto (MARR) quando} \quad (4.50)$$

$$(TR + TRV) - (IC^C + RSC^A + RSC^O + IC^M + RSC^M) = 0$$

Do ponto de vista estritamente econômico, um projeto é considerado viável se $ENPV > 0$ e se o IRR calculado é maior que um valor predefinido, em geral maior que uma taxa de oportunidade oficializada pelo governo, tal como a taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) no caso brasileiro. Para esta pesquisa de doutorado, um cenário é considerado economicamente viável se $ENPV > 0$ e a condição da IRR maior que o valor médio da taxa SELIC de 10,9% equivalente à media diária entre Janeiro/2014 e Janeiro/2015 (BCB, 2015a).

O WebTAG (TAG Unit 3.5.4 - Cost Benefit Analysis) apresenta a Razão Benefício-Custo (*Benefit Cost Ratio - BCR*) como uma medida de desempenho para análise de projetos de transporte por refletir a proporção dos benefícios sociais obtidos para cada unidade de investimento dispendido no projeto como apresentado na Equação (4.51).

$$BCR = \frac{TRV + TCSUC + TCSTS + TAR + TER}{IC^C + RSC^A + RSC^O + IC^M + RSC^M} \quad (4.51)$$

Em um aspecto mais abrangente, um projeto é considerado viável do ponto de vista dos custos e benefícios totais quando o valor presente líquido total é positivo ($TNPV > 0$) e o resultado da razão entre os benefícios sociais e os custos ao investidor e operador BCR é maior ou igual a 1,50 (DE RUS et al., 2009).

Cabe ressaltar novamente que no cômputo das medidas de desempenho socioeconômicas o valor residual ao final do horizonte de planejamento (TVR) é considerado como um benefício econômico e social simultaneamente, pelo fato de que os investimentos representam um bem material com valor econômico ao final do horizonte de planejamento e que pode ser considerado um bem intangível pertencente à sociedade. Assim, além de benefício econômico esse valor residual também é considerado um benefício social por representar uma infraestrutura revertida à sociedade após sua construção e utilização, de modo que os valores estimados são considerados tanto no cálculo do $ENPV$ quanto do BCR .

Cenários para o Transporte Ferroviário Regional de Passageiros

A avaliação socioeconômica de uma rede ferroviária hipotética na Região Sudeste do Brasil é apresentada neste capítulo mediante a operação exclusiva de *HPTs* ou de *HSTs* para verificação da hipótese de tese proposta. Ao considerar a formulação de análise custo-benefício do Capítulo 4, os investimentos requeridos para construção da infraestrutura são obtidos pela execução do *GA* em paralelo em diferentes conexões ferroviárias conforme discutido no Capítulo 2, e a distribuição de viagens e divisão modal são consideradas segundo as análises do Capítulo 3.

Para caracterização da rede ferroviária hipotética foram consideradas as cidades da Região Sudeste conforme a estruturação hierárquica dos centros urbanos brasileiros definido pelo IBGE no estudo denominado "Regiões de influência das cidades 2007" (HENDERSON, 2008). Nessa publicação, a Região Metropolitana de São Paulo é denominada "Grande Metrópole Nacional", a do Rio de Janeiro é "Metrópole Nacional" e a de Belo Horizonte é simplesmente "Metrópole".

Em uma subdivisão dessa classificação, as regiões metropolitanas de Vitória e Campinas são denominadas "Capitais Regionais A", as cidades de Uberlândia, Juiz de Fora, Montes Claros, Uberaba, Ribeirão Preto e São José do Rio Preto são denominadas "Capitais Regionais B" e outras 21 cidades na Região Sudeste são denominadas "Capitais Regionais C". Nessa hierarquia, outras cidades de menor porte são classificadas como "Centros Sub-Regionais A ou B".

Nesta tese a Região Metropolitana de São Paulo, do Rio de Janeiro e de Belo Horizonte, e as "Capitais Regionais A" e "Capitais Regionais B" foram consideradas como os 11 centros urbanos a serem conectados por uma rede ferroviária hipotética de trens de passageiros, cujas respectivas siglas podem ser consultadas no Apêndice B.

Assim, uma análise da posição relativa desses centros urbanos e avaliação dos fluxos de passageiros resultantes das considerações do Capítulo 3 resultaram na definição da rede ferroviária hipotética ilustrada na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Proposta de rede ferroviária hipotética conectando os principais centros urbanos da Região Sudeste

Dado que a proposta de formulação de análise custo-benefício do Capítulo 4 requer a definição de estações iniciais e finais para os serviços ofertados (para cálculo do tempo total de viagem, frequência de operação etc.) e que a rede da Figura 5.1 é ramificada (impedindo a operação de um único serviço que atenda a todas as cidades), as suas conexões foram agrupadas regionalmente para satisfazer aquelas restrições e na tentativa de estabelecer serviços com distâncias de mesma ordem de grandeza e atendimento adequado da demanda estimada. Esse agrupamento resultou na segregação de serviços em 6 eixos ferroviários ilustrados na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Segregação dos serviços da rede hipotética em eixos ferroviários para avaliação socioeconômica

Assim, os serviços segregados nos eixos ferroviários da Figura 5.2 foram distinguidos conforme as seguintes denominações e respectivas cidades atendidas: **SJP-UDI**: São José do Rio Preto - Ribeirão Preto - Uberaba - Uberlândia; **RAO-CGH**: Ribeirão Preto - Campinas - São Paulo; **CGH-SDU**: São Paulo - Rio de Janeiro; **SDU-VIX**: Rio de Janeiro - Vitória; **SDU-PLU**: Rio de Janeiro - Juiz de Fora - Belo Horizonte; **PLU-MOC**: Belo Horizonte - Montes Claros.

No contexto dessa rede ferroviária foram admitidas as premissas a seguir para aplicação da formulação de análise custo-benefício proposta.

1. Somente um tipo de tecnologia ferroviária (*HPT* ou *HST*) circula em todos os arcos da rede em um cenário da análise socioeconômica;
2. O início da operação de um eixo ferroviário independe do término da construção da rede;

3. Todos os trens são paradores nas cidades (estações) que pertencem a um eixo ferroviário, não havendo oferta de serviços expressos;
4. Os arcos da rede são construídos em função de uma produtividade média e todos têm construção iniciada no primeiro ano do horizonte de análise socioeconômica (2015);
5. As cidades de um eixo ferroviário começam a ser atendidas somente quando todos os seus respectivos arcos estiverem finalizados;
6. As características dos sistemas de transporte para os modos Automóvel, Ônibus e Avião mantêm-se inalteradas após início da operação dos serviços ferroviários e em todo o horizonte de análise socioeconômica;
7. Os usuários podem acessar qualquer cidade da rede pela troca de trens em estações que possuem conexão entre os eixos ferroviários da rede (Ribeirão Preto, São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte);
8. Os tempos de parada dos trens são fixos e iguais em todas as estações, mesmo naquelas em que há transbordo entre eixos ferroviários;
9. Os investimentos estimados pelo AG para construção de novos alinhamentos ferroviários contemplam somente as regiões rurais, de modo que as faixas de domínio em áreas urbanas são definidas para circulação dos trens com velocidade reduzida. Nesse caso, os investimentos nos trechos urbanos são estimados com base em um comprimento médio de via na área urbana e um custo médio de superestrutura;
10. Os benefícios de receita são computados entre todos os pares de cidades, cujos números de viagens são representados no Apêndice B entre os anos de 2015 e 2050.

5.1 Definição de Traçados e Estimativa de Investimentos

Os traçados que conectam as cidades da rede ferroviária ilustrada na Figura 5.2 foram definidos com base na aplicação do GA executado com múltiplas máquinas virtuais em paralelo conforme caracterizado no Capítulo 2.

As máquinas virtuais acessadas remotamente pelo ambiente de infraestrutura computacional em nuvem da USP (NUVEMUSP, 2013) são equipamentos idênticos com oito processadores de memória RAM total de 32.768 MB e disco rígido com capacidade de 500 GB.

A apresentação dos resultados relativos à análise de desempenho do AG no Capítulo 2 demonstrou que a condição de distância média de 5 km entre Pontos de Interseção (PIs) e disponibilidade de 50 máquinas virtuais simultâneas é aquela que propicia resultados de maior acurácia para estimativa de investimentos na construção de novas ferrovias em áreas rurais – uma vez que permite o melhor detalhamento do traçado na projeção horizontal e longitudinal – e em menor tempo de processamento computacional.

Quanto aos investimentos na infraestrutura das áreas urbanas, infere-se um custo médio por quilômetro como parte de um processo de revitalização das vias outrora implantadas nessas regiões. Esse valor é equivalente ao custo médio por quilômetro de ferrovia indicado no Apêndice A ("Custo Médio da Via" em R\$/km) dependendo da tecnologia ferroviária implantada.

Além disso, o Apêndice A contém os valores relativos aos demais parâmetros considerados na execução do AG, aos custos unitários para estimativa do investimento total e às características geométricas dos traçados para cada tecnologia de trens.

Do ponto de vista dos raios mínimos das curvas horizontais circulares, são consideradas as análises indicadas na seção 2.3.1 (página 66) segundo os critérios de segurança e conforto em função da tecnologia ferroviária a ser operada na rede.

Assim, após executar cinco replicações do GA entre as cidades da Figura 5.2 (em pontos específicos nas interfaces entre as zonas urbana e rural) foram obtidos os valores indicados na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2 referentes às replicações que resultaram no menor valor de investimento total estimado para traçados apropriados à operação de *HPT* e *HST*, respectivamente. Nas tabelas também são apresentadas as estimativas para recuperação das linhas em áreas urbanas segundo o valor de custo médio indicado no Apêndice A.

Primeiramente, há uma variação substancial das proporções entre os itens que compõem os investimentos totais (superestrutura, terraplenagem, túneis, pontes e desapropriações), tanto para construção da infraestrutura para operação de *HPTs* quanto para de *HSTs*.

Nas regiões com declividades do terreno mais acentuadas (SDU-JDF, SDU-VIX, JDF-PLU, VCP-CGH, PLU-MOC, SDU-CGH) os valores referentes à construção de túneis são os mais representativos entre os itens da composição de investimentos do AG, com valores máximos de 64,7% e 64,3% na conexão entre o Rio de Janeiro (SDU) e Juiz de Fora (JDF) para traçados de *HPT* e *HST* respectivamente. Por outro lado, nas regiões mais planas (UDI-UBA, SJP-RAO, RAO-UBA, RAO-VCP) essas respectivas proporções reduzem-se expressivamente, com valores mínimos de 1,3% e 5,1% entre Ribeirão Preto (RAO) e São José do Rio Preto (SJP).

Cabe ressaltar que as proporções dos investimentos em desapropriação de áreas rurais são pequenas em comparação aos totais para ambas as tecnologias ferroviárias, com valores menores que 3,0% nas regiões mais planas e 1,0% naquelas de topografia acentuada.

Quando os investimentos totais são analisados em função da tecnologia ferroviária (*HPT* ou *HST*), a diferença entre valores necessários para a construção da rede proposta na Figura 5.2 é relativamente pequena. No caso da operação de *HPTs* é necessário um investimento total de R\$90.950,11·10⁶ para a construção de uma rede de 2.443,03 km, perfazendo um investimento médio de R\$37,2·10⁶/km.

Por outro lado, a construção da rede para operação de *HSTs* com comprimento total de 2.472,41 km requer um investimento total de R\$95.825,94·10⁶, ou seja, um valor médio de R\$38,8·10⁶/km. Assim, em termos absolutos, a diferença de investimento total entre tecnologias ferroviárias é de R\$4.875,83·10⁶, ou um aumento de 5,36% do investimento para construção da rede de *HST* em detrimento de *HPT*. Em valores médios essa alteração de tecnologia representa um aumento de investimento de R\$1,6·10⁶/km, que pode ser considerado uma diferença pequena pelas perspectivas de redução dos tempo de viagem pela operação de *HSTs*.

A análise dos investimentos médios nos arcos da rede em relação às características do terreno também indica uma pequena diferença entre tecnologias. No caso de *HPT*, observa-se o investimento médio na conexão entre São José do Rio Preto e Ribeirão Preto (SJP-RAO), cuja

topografia regional pode ser considerada plana, é de de $R\$6,5 \cdot 10^6/\text{km}$, em detrimento de um valor máximo de $R\$52,3 \cdot 10^6/\text{km}$ entre Rio de Janeiro e Vitória (SDU-VIX), em uma região com topografia montanhosa sobretudo nas proximidades daquela cidade.

Essas avaliações indicam que, a partir da premissa que a atual infraestrutura ferroviária da Região Sudeste não é compatível para a oferta competitiva de serviços ferroviários para o transporte de passageiros, o aumento relativo do investimento em uma rede para operação de *HST* é pequeno quando comparado à uma rede de *HPT*. Ou seja, nas condições analisadas, as características geométricas dos traçados para operação de uma determinada tecnologia ferroviária não exercem influencia significativa sobre os investimentos totais em uma nova infraestrutura.

A Figura 5.3 e Figura 5.4 a seguir representam os traçados da rede de menor investimento para operação de *HPT* sobre a projeção de declividade do terreno e ocupação do solo respectivamente, e a Figura 5.5 e Figura 5.6 representam os alinhamentos de menor investimento total das conexões entre cidades para operação de *HST*.

Além desses investimentos em novos alinhamentos ferroviários, aqueles referentes à construção das estações para acesso aos trens também podem afetar os resultados de uma avaliação socioeconômica. No caso das cidades contempladas na análise custo benefício apresentada nesta tese, todas possuem instalações que já foram utilizadas para oferta de serviços dessa natureza, algumas das quais ainda em operação, como nas regiões metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte.

Entretanto, existe uma dificuldade na estimativa dos investimentos requeridos na recuperação dessas instalações devido às suas particularidades arquitetônicas e atual estado de conservação. A literatura sobre análises socioeconômicas de novos investimentos em infraestruturas de transporte em geral desconsidera esse item de investimento nas investigações justamente devido às dificuldades de estimativas acuradas desses valores (*e.g.* DE RUS et al., 2009).

Desse modo, nas avaliações apresentadas nesta tese, também são desconsiderados valores específicos de investimentos nas estações para aplicação da formulação de análise custo-benefício. Entretanto, são apresentados alguns exemplos de pesquisas que sugerem valores para esse item na tentativa de avaliar os possíveis efeitos sobre as análises socioeconômicas.

Figura 5.3 – Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por *HPT* sobre a projeção de declividade do terreno

Figura 5.4 – Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por *HPT* sobre a projeção de uso do solo

Figura 5.5 – Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por *HST* sobre a projeção de declividade do terreno

Figura 5.6 – Rede ferroviária estimada para o transporte de passageiros por *HST* sobre a projeção de uso do solo

Ao analisar os efeitos da implantação de *HSTs* sobre a reestruturação do espaço urbano Bellet (2009) apresenta um valor estimado de 180 € milhões (ou aproximadamente R\$558 milhões) para construção de uma nova estação na cidade de Logroño (Espanha). Em um relatório técnico sobre os efeitos da reestruturação de estações ferroviárias na Inglaterra, Gleave (2011) apresenta os seguintes investimentos nas respectivas localidades: £62·10⁶ em *Machester Piccadilly*; £25·10⁶ em *Sheffield*; £550·10⁶ em *Birmingham New Street*; £60·10⁶ em *Nottingham Hub*; £35·10⁶ em *Reading*; £6·10⁶ em *St. Helens*; £5·10⁶ em *St. Albans*; e £4,5·10⁶ em *Epsom*.

É importante salientar que, além da variação significativa, esses valores referem-se à investimentos em infraestruturas já existentes e com oferta regular de serviços ferroviários em contraposição à atual situação da maioria estações nas cidades contempladas na rede hipotética desta tese, o que incorre em maior dificuldade para estimativa acurada desse item da *CBA*.

Assim, em um exercício de avaliação da influência dos investimentos em estações sobre as estimativas totais para a rede proposta, se esses valores forem superestimados em relação àquele apresentado por Bellet (2009) e equivalentes a R\$1 bilhão por estação, o valor total dos recursos aplicados em estações para a rede ferroviária proposta seria estimado em R\$11 bilhões, ou aproximadamente 12,0% do investimento total para a construção dos traçados da rede de *HPT* e de 11,5% para a rede de *HST*.

Portanto, o valor equivalente à reestruturação das estações ferroviárias para a operação de trens de passageiros pode ser considerado como uma porcentagem dos investimentos totais na rede. Nesse caso, ao analisar a operação ferroviária sob a perspectiva de diferentes cenários dos investimentos totais da rede, é possível captar os efeitos da reestruturação de estações sobre as medidas de desempenho da *CBA*.

Sob a hipótese de que a construção de todos os arcos da rede hipotética proposta têm início no primeiro ano do horizonte de planejamento da avaliação socioeconômica é possível analisar o tempo total de finalização da rede – e, portanto, o período de obtenção de receita – em função da produtividade média de construção dos alinhamentos ferroviários. Nesse sentido, os comprimentos dos traçados estimados pelo *GA* (Tabela 5.1 e Tabela 5.2) e os respectivos períodos para finalização da rede são apresentados na Tabela 5.3 para ambas as tecnologias ferroviárias.

Tabela 5.3 – Estimativa de tempo necessário para construção da rede ferroviária em cada cenário mediante a tecnologia ferroviária

Origem	Destino	Comprimento <i>HPT</i> (km)			Cenário			Comprimento <i>HST</i> (km)		
		Conservador	Intermediário	Otimista	Conservador	Intermediário	Otimista	Conservador	Intermediário	Otimista
UDI	UBA	108,5	5	3	2	108,4	5	3	2	
SJP	RAO	194,7	8	4	2	191,9	8	4	2	
RAO	UBA	158,5	7	4	2	166,3	7	4	2	
RAO	VCP	217,8	9	5	3	219,6	9	5	3	
SDU	JDF	142,9	6	3	2	138,5	6	3	2	
SDU	VIX	504,8	21	11	6	489,9	20	10	5	
JDF	PLU	250,2	11	6	3	250,0	10	5	3	
VCP	CGH	105,9	5	3	2	106,0	5	3	2	
PLU	MOC	385,0	16	8	4	429,0	18	9	5	
SDU	CGH	374,8	15	8	4	373,1	15	8	4	

No cenário Conservador, em um horizonte de 35 anos (entre 2015 e 2050) a rede proposta na Figura 5.2 para a operação de *HPT* estaria totalmente conectada somente no ano de 2036 quando da finalização do trecho mais extenso entre o Rio de Janeiro e Vitória, resultando em apenas 14 anos de benefícios econômicos e sociais plenos.

Por outro lado, em um cenário Otimista com produtividade de construção de 100 km/ano, a finalização da rede dar-se-ia apenas seis anos após o primeiro período do horizonte de planejamento (em 2021), resultando em 29 anos de rendimento de benefícios.

Para uma rede com operação de *HST* no cenário Conservador, o tempo necessário para conexão total da rede seria de 20 anos, com conclusão em 2035 e, portanto, com 15 anos de retorno econômico e social do investimento. No cenário Otimista esse período seria de 5 anos, com finalização da rede em 2020 pela conclusão do trecho entre o Rio de Janeiro e Vitória.

A produtividade da construção afeta significativamente o período disponível para obtenção de receita e cômputo dos benefícios sociais advindos do uso do sistema ferroviário implantado. Portanto, o tempo de finalização dos arcos da rede ferroviária é um fator importante para garantia de retorno do investimento, sobretudo em termos de benefícios econômicos.

5.2 Estimativa de Número de Passageiros e Divisão Modal

Quanto à estimativa do número de viagens pelos modos de transporte atualmente disponíveis na Região Sudeste do Brasil (Automóvel, Ônibus e, eventualmente, Avião) foram consideradas as projeções dos modelos indicados na seção 3.1.6 (página 119) para os anos do horizonte de avaliação socioeconômica, cujos valores estão representados nas tabelas do Apêndice B.

Quanto à divisão modal, apesar dos modelos de utilidade referirem-se à escolha dos modos de transporte em termos desagregados – ou seja, representativos das probabilidades de escolha em função do perfil do usuário e da viagem –, na aplicação da formulação de *CBA* considera-se que essas escolhas representam as características médias da população extrapolando-se, assim, a decisão individual para um nível agregado de divisão modal.

Segundo o Modelo D escolhido para cálculo das probabilidades de escolha modal (seção 3.2.4.4, página 164), as funções utilidade dos modos de transporte podem ser representadas por (5.1) e (5.2) para os motivos trabalho e lazer, respectivamente, conforme os coeficientes da Tabela C.7 e Tabela C.8 do Apêndice B.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = -0,00497 \cdot TT_{CAR} - 0,00841 \cdot PE_{CAR} - 0,00841 \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = -0,51200 - 0,00497 \cdot TT_{BUS} - 0,00511 \cdot FR_{BUS} - 0,00240 \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = -0,51200 - 0,00497 \cdot TT_{HPT} - 0,00511 \cdot FR_{HPT} - 0,00240 \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = -0,51200 - 0,00497 \cdot TT_{HST} - 0,00511 \cdot FR_{HST} - 0,00240 \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = -0,51200 - 0,00497 \cdot TT_{AIR} - 0,00511 \cdot FR_{AIR} - 0,00240 \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (5.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{CAR} = -0,00788 \cdot TT_{CAR} - 0,00261 \cdot PE_{CAR} - 0,00261 \cdot TO_{CAR} \\ V_{BUS} = -0,00788 \cdot TT_{BUS} - 0,00354 \cdot FA_{BUS} \\ V_{HPT} = -1,06000 - 0,00788 \cdot TT_{HPT} - 0,00261 \cdot FA_{HPT} \\ V_{HST} = -1,06000 - 0,00788 \cdot TT_{HST} - 0,00261 \cdot FA_{HST} \\ V_{AIR} = -1,43000 - 0,00788 \cdot TT_{AIR} - 0,00261 \cdot FA_{AIR} \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Essas funções utilidade que caracterizam as tecnologias ferroviárias apresentam os mesmos valores de coeficientes estimados pela maximização da função de verossimilhança. Isso indica que, sob a premissa de que as estimativas desses coeficientes são válidas para representação da escolha modal, os usuários têm idêntica percepção dos serviços de *HPT* e *HST* dependendo do motivo de viagem. Entretanto, isso não significa que a utilidade final para essas tecnologias também é idêntica, uma vez que os níveis dos seus respectivos atributos variam mediante o desempenho operacional (tempo de viagem e frequência dos serviços) e da política tarifária.

Logo, para calcular o número de usuários potencialmente dispostos a utilizar o modo de transporte ferroviário – na eventualidade de implantação da rede proposta na Figura 5.2 – considera-se a multiplicação do número total de viagens projetadas nos anos do horizonte de planejamento da análise socioeconômica pela proporção da escolha pelos trens mediante o motivo de viagem conforme especificado na Equação 4.12 (página 190).

Por sua vez, essas proporções de usuários que escolhem o modo ferroviário (*HPT* ou *HST*) são calculadas pelo produto das probabilidades de escolha modal segundo níveis específicos dos seus atributos (Equação 3.29 na página 154) e a proporção de usuários que viajam pelo motivo trabalho (*W*) ou lazer (*L*).

Pela dificuldade de estimativa da parcela de usuários em função do motivo de viagem, esses valores são inferidos como equivalentes à porcentagem de respondentes que acessaram a pesquisa de preferência declarada descrita no Capítulo 3 e que escolheram um dos motivos de viagem que já tivessem realizado anteriormente para condução do questionário proposto. Isso foi calculado para todos os acessos à pesquisa, mesmo para os questionários que foram iniciados mas não finalizados tal que, de 651 acessos, 52,2% revelaram ter viajado pelo menos uma vez entre uma origem e um destino especificado pelo motivo trabalho e 47,8% revelaram ter viajado entre cidades por motivo lazer ou outros.

Portanto, a proporção de usuários que eventualmente viajariam pelo modo ferroviário a trabalho nas equações do Capítulo 4 é calculada como $P_{Rw} = 0,522 \cdot Prob_{Rw}$ e a proporção daqueles que viajariam por motivo lazer ou outros é calculada por $P_{Lw} = 0,478 \cdot Prob_{RL}$.

5.3 Definição dos Tempos de Viagem e Tarifas

Os custos aos usuários e os respectivos tempos de viagem (incluindo eventuais acesso e egresso) pelos diferentes modos de transporte referem-se aos níveis dos atributos representados nas funções utilidade para cálculo das probabilidades de divisão modal.

Para definição dos tempos totais de viagem pelos diferentes modos de transporte propõe-se uma abordagem que considera os tempos de acesso e egresso, e aqueles efetivamente dispendidos nos veículos conforme a representação esquemática da Figura 5.7.

Figura 5.7 – Representação esquemática para estimativa dos tempos de viagem entre uma origem (A) e um destino (B) pelos diferentes modos de transporte

Segundo essa representação, os tempos de viagem para cada modo de transporte podem ser calculados conforme (5.3).

$$\begin{cases} TT_{CAR} = tv_{CAR} \\ TT_{BUS} = ta_{BUS} + tv_{BUS} + te_{BUS} \\ TT_{RAIL} = ta_{RAIL} + tv_{RAIL} + te_{RAIL} \\ TT_{AIR} = ta_{AIR} + tv_{AIR} + te_{AIR} \end{cases} \quad (5.3)$$

onde tv_{CAR} = tempo de viagem por Automóvel; ta_{BUS} = tempo de acesso ao modo Ônibus; tv_{BUS} = tempo de viagem pelo modo Ônibus; te_{BUS} = tempo de egresso do modo Ônibus; ta_{RAIL} = tempo de acesso ao modo Trem (*HPT* ou *HST*); tv_{RAIL} = tempo de viagem pelo modo Trem (*HPT* ou *HST*); te_{RAIL} = tempo de egresso do modo Trem (*HPT* ou *HST*); ta_{AIR} = tempo de acesso ao modo Avião; tv_{AIR} = tempo de viagem pelo modo Avião; te_{AIR} = tempo de egresso pelo modo Avião.

Os tempos de acesso e egresso às infraestruturas para Ônibus, Avião e Trem (mesmo essas últimas não sejam utilizadas atualmente) são estimados por uma regressão linear multivariada em relação às respostas obtidas na pesquisa de preferência declarada.

Os valores indicados nos histogramas da Figura 3.21 e Figura 3.22 no caso de Ônibus e Avião quanto aos tempos de acesso e egresso de fato dispendidos pelos modos de transporte utilizados foram agrupados, respectivamente, àqueles da Figura 3.23 e Figura 3.24 para Ônibus, Trem e Avião, referentes aos tempos estimados pelos participantes para os modos de transporte que não utilizaram nas viagens. Esse agrupamento deu-se pelo fato de que as distribuições das respostas em ambos os casos (para as viagens efetivamente realizadas e para os tempos estimados) são semelhantes com valores no intervalo entre 30 minutos e 1 hora.

As variáveis independentes utilizadas na regressão foram a densidade populacional e a distância entre as estações (rodoviária e ferroviária) e aeroportos ao centroide das respectivas cidades de origem (no caso dos tempos de acesso) e destino (para os tempo de egresso), cujos valores resultantes das calibrações são os coeficientes indicados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Regressão dos tempos de acesso e egresso segundo a pesquisa de preferência declarada e as características das cidades

Modo	Tempo	R^2	R^2 ajustado	Densidade populacional (hab./km ²)			Distância ao centroide (km)		
				Coef.	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	Coef.	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
Ônibus	Acesso	0,715	0,714	0,021	22,173	0,000	2,552	6,425	0,000
	Egresso	0,624	0,623	0,026	9,387	0,000	7,621	7,901	0,000
Trem	Acesso	0,715	0,714	0,019	12,745	0,000	3,953	3,985	0,000
	Egresso	0,642	0,640	0,027	11,258	0,000	8,571	9,436	0,000
Avião	Acesso	0,732	0,731	0,016	13,050	0,000	2,367	8,816	0,000
	Egresso	0,637	0,636	0,014	8,124	0,000	4,168	12,449	0,000

Os tempos efetivamente em viagem pelos modos Ônibus e Trem foram estimados com base na velocidade média dos veículos, de 80 km/h para o primeiro, e 150 km/h e 300 km/h para os *HPT* e *HST* respectivamente, e a distância média entre estações. No caso do Automóvel foi considerada uma velocidade média de 90 km/h (menor do que a velocidade regulamentada das rodovias, em geral de 110 km/h) na tentativa de representar os tempos requeridos para entrada e saída das zonas urbanas das cidades.

Para o modo Avião foram considerados os tempos médios de bloco (Tabela 5.5) provenientes dos relatórios da ANAC (ANAC, 2014b) entre os pares de origem e destinos da rede da Figura 5.2 que possuem conexões aéreas operantes comercialmente no ano de 2015.

Tabela 5.5 – Tempo médio de bloco pelo modo Aéreo (minutos) – Fonte: ANAC (2014b)

ORIGEM	DESTINO									
	SDU	PLU	VIX	VCP	UDI	JDF	MOC	UBA	RAO	SJP
CGH	66	86	93	48	84	–	89	84	63	65
SDU	–	79	71	68	127	–	–	–	94	–
PLU	–	–	69	84	74	57	62	81	83	83
VIX	–	–	–	99	–	–	–	–	146	–
VCP	–	–	–	–	86	93	–	78	59	73
UDI	–	–	–	–	–	–	–	28	48	47
JDF	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
MOC	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
UBA	–	–	–	–	–	–	–	–	32	–
RAO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	39

Quanto à estimativa do valor monetário desembolsado pelos usuários para os modos Auto-móvel, Ônibus e Avião foram consideradas as formulações da Tabela 3.11 (página 131) equivalentes aos níveis dos atributos da pesquisa de preferência declarada em função da distância de viagem. No caso de um novo modo ferroviário (*HPT* ou *HST*) foram considerados diferentes valores de tarifa média por quilômetro e calculados os respectivos itens da análise custo-benefício de modo a identificar aquele valor médio que maximizasse uma medida de desempenho da rede ferroviária conforme procedimento descrito na seção a seguir.

5.4 Análise Socioeconômica de Cenários

A partir das estimativas de investimentos, do número de viagens no ano de 2015 e projetadas até 2050, e a modelagem de propensão à escolha modal proposta, um conjunto de planilhas eletrônicas foi elaborado para cálculo das medidas de desempenho da análise socioeconômica.

Dadas as incertezas inerentes à aplicação do método de *CBA*, propõe-se três cenários distintos pela variação dos investimentos estimados pelo *GA*, da produtividade de construção da infraestrutura e do tráfego gerado pela demanda reprimida após início da operação dos sistemas.

Assim, os valores indicados na Tabela 5.6 caracterizam os cenários "Otimista", "Intermediário" e "Conservador", sendo o viés do otimismo caracterizado pelo coeficiente φ da Equação 4.2 (página 184), a produtividade da construção definida pelo coeficiente ω da Equação 4.1 (página 183) e a porcentagem de tráfego gerado estabelecida pelo parâmetro GT conforme a Equação 4.4 na página 185.

Tabela 5.6 – Definição dos parâmetros dos cenários para avaliação socioeconômica

Cenário	Viés do Otimismo (φ - %)	Produtividade de Construção (ω - km/ano)	Tráfego Gerado (GT - %)
Otimista	10	100	40
Intermediário	50	50	25
Conservador	100	25	10

Uma vez que a porcentagem de usuários do modo ferroviário depende da frequência dos serviços para viagens por motivo trabalho (W), e que esse intervalo entre trens é função do número de passageiros que utilizariam o sistema, é necessário que uma dessas variáveis seja estabelecida para que a outra possa ser calculada.

Assim, em uma abordagem iterativa, para todos os anos do horizonte de planejamento, o valor inicial de intervalo horário entre trens é definido *a priori* como igual a 6 horas e a divisão modal calculada com base nesse valor e nos demais níveis dos atributos dos modos de transporte, sendo a frequência de serviços calculada conforme a Equação 4.5 (página 185).

Se a diferença entre a frequência calculada e o valor inferido inicialmente for menor do que 5%, então aquela é admitida como correta e os itens da análise socioeconômica são estimados. Caso a condição não seja satisfeita, os valores iniciais de frequência são substituídos pelos calculados e novas iterações são executadas até que a diferença entre a frequência inferida e a calculada seja menor do que aquela porcentagem mínima.

Esse procedimento foi executado nos cenários mediante os parâmetros indicados no Apêndice D para valores de tarifa ferroviária por quilômetro (FA_R da Equação 4.12 na página 190) aplicados igualmente a todos os serviços operados nos eixos ferroviários da Figura 5.2. Os resultados indicados nesta seção foram obtidos considerando a taxa mínima de atratividade ($MARR$) de 5,1% (LOPEZ, 2008) e porcentagem do valor residual dos investimentos em infraestrutura igual a 60%, sendo apresentadas algumas considerações sobre o efeito da variação desses dois parâmetros na última seção deste capítulo.

O Apêndice E contém as estimativas dos itens da avaliação socioeconômica nos cenários descritos, cujos valores presente líquido econômico ($ENPV$) calculados pela Equação 4.49 (página 211) são representados na Figura 5.8 e na Figura 5.9 para $HPTs$ e $HSTs$ respectivamente.

Figura 5.8 – Valor Presente Líquido Econômico (ENPV) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HPT

Figura 5.9 – Valor Presente Líquido Econômico (ENPV) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HST

Os resultados desses gráficos indicam que o valor presente líquido econômico ($ENPV$) devido à construção de uma infraestrutura e operação de *HST* é sempre maior que aquele para *HPT* na comparação entre cenários equivalentes. Entretanto, mesmo para as tarifas médias que maximizam essa medida de desempenho, todos os cenários analisados resultam em $ENPV$ negativo sendo o melhor resultado um déficit de $R\$-35,14 \cdot 10^9$ para tarifa média de $R\$1,10/\text{km}$ no cenário Otimista para a operação da *HSTs*.

Uma vez que os resultados dessa medida de desempenho são negativos para todos os cenários, não há uma taxa interna de retorno (IRR) que satisfaça a condição de equilíbrio do valor presente líquido dos custos e benefícios econômicos da rede e, portanto, o valor daquela medida de retorno do investimento é nula para os cenários analisados.

Cabe ressaltar que, mesmo resultando em valores totais negativos para o valor presente líquido econômico, as tarifas médias que maximizam o $ENPV$ são sempre menores para a operação de *HST* do que para os *HPT* na comparação entre cenários respectivos. Para os *HPTs*, as tarifas consideradas ótimas são de $R\$1,25/\text{km}$, $R\$1,35/\text{km}$ e $R\$1,35/\text{km}$ para os cenários Conservador, Intermediário e Otimista, respectivamente, enquanto que para os *HSTs* esses respectivos valores são $R\$1,00/\text{km}$, $R\$1,05/\text{km}$ e $R\$1,10/\text{km}$.

Essa diferença da tarifa ótima entre tecnologias nos respectivos cenários ocorre pelo fato de que, apesar de os investimentos totais na construção da rede de *HST* serem maiores do que a de *HPT*, os elementos que compõem a análise socioeconômico não variam linearmente com a tarifa média, sobretudo a demanda atendida pelos trens, a qual varia em função dos resultados das funções utilidade dos modos de transporte dependendo da tecnologia ferroviária estabelecida.

Conforme apresentado ao final da seção 5.1, os investimentos em estações ferroviárias podem ser considerados como uma parcela da majoração dos investimentos estimados para construção dos traçados da rede ferroviária dada a dificuldade de estimativa acurada daqueles valores.

Se, como no cenário Otimista, os valores obtidos pelo *GA* para construção da infraestrutura forem majorados em 10% e esse viés for devido à construção ou reestruturação de estações, o déficit referente ao valor presente líquido econômico seria de $R\$-47,46 \cdot 10^9$ para *HPT* e de $R\$-35,14 \cdot 10^9$ para *HST* nas respectivas condições de tarifa que maximizam o $ENPV$.

Por outro lado, se for considerado um acréscimo de 25% dos investimentos devido às estações (acima da proporção exemplificada na seção 5.1, página 216) e 35% em acréscimo de investimento estimados na construção dos traçados, o acréscimo total de investimento seria de 50% equivalente àquele aplicado no cenário Intermediário. Nesse cenário, reduzindo-se ainda as perspectivas de produtividade da construção da rede e de geração de demanda reprimida em relação ao cenário Otimista, o *ENPV* nas respectivas tarifas ótimas para aquelas condições seriam de $R\$-61,05 \cdot 10^9$ para *HPT* e $R\$-50,70 \cdot 10^9$ para *HST*.

Ainda, se o sobrepreço dos investimentos em estações for equivalente a 50% do valor total para construção dos traçados e for considerado um acréscimo de 50% sobre os investimentos estimados pelo *GA*, além da baixa perspectiva de rendimento da construção da rede e captação da demanda reprimida resultando no cenário Conservador, o déficit do *ENPV* seria de $R\$-70,97 \cdot 10^9$ e de $R\$-63,43 \cdot 10^9$ respectivamente para *HPT* e *HST*.

As estimativas de valor presente líquido total (*TNPV*) indicadas no Apêndice E quando os investimentos e despesas operacionais são comparados com os benefícios econômicos e sociais resultam na Figura 5.10 e Figura 5.11 para operação de *HPT* e *HST* respectivamente.

Figura 5.10 – Valor Presente Líquido Total (*TNPV*) em função da tarifa ferroviária média para a rede de *HPT*

Figura 5.11 – Valor Presente Líquido Total (*TNPV*) em função da tarifa ferroviária média para a rede de *HST*

Para a medida de desempenho $TNPV$, os valores estimados no caso da operação de HST são expressivamente maiores do que para HPT sobretudo nas situações de valores baixos de tarifa média. Segundo os gráficos anteriores, essa medida de desempenho torna-se negativa para os valores de tarifa média maiores que R\$0,40/km, R\$0,60/km e R\$0,80/km nos respectivos cenários Conservador, Intermediário e Otimista para a operação de $HPTs$, enquanto para a operação de $HSTs$ resulta em valores negativos de $TNPV$ para tarifa média acima de R\$1,00/km, R\$1,15/km e R\$1,30/km naqueles respectivos cenários.

Os valores de $TNPV$ representados nos gráficos da Figura 5.10 e Figura 5.11 decrescem assintoticamente em função da tarifa média, pois para ambas as tecnologias ferroviárias, quando o valor desse parâmetro é próximo de zero, o excedente do consumidor devido ao custo da viagem é elevado e, quando a tarifa média aumenta, o valor desse item da análise socioeconômica reduz sua proporção em relação aos demais itens de benefícios econômicos e sociais.

Nas condições das tarifas que maximizam o $ENPV$ descritas anteriormente, o $TNPV$ para a rede de $HPTs$ corresponde a R\$-44,70·10⁹, R\$-36,88·10⁹ e R\$-23,62·10⁹ para respectivas tarifas de R\$1,25/km no cenário Conservador e de R\$1,35/km no Intermediário e Otimista. Por outro lado, para a rede de $HSTs$ os valores de $TNPV$ dos cenários são positivos e equivalentes a R\$0,44·10⁹, R\$12,56·10⁹ e R\$22,01·10⁹ para tarifas de R\$1,00/km, R\$1,05/km e R\$1,10/km.

Assim, nas situações de tarifa que maximiza o $ENPV$ (mesmo que com valores negativos), nenhum cenário de rede de $HPTs$ apresenta $TNPV$ positivo, ou seja, a estimativa dos benefícios sociais devido à oferta de serviços com essa tecnologia indicam um valor menor do que os custos totais necessários à sua implantação. Em contrapartida, a operação de $HSTs$ resulta em valores positivos para o $TNPV$ naquelas condições tarifárias apesar de resultados também negativos para essa tecnologia quanto ao $ENPV$.

A Figura 5.12 e Figura 5.13 a seguir representam os valores da Razão Benefício-Custo (BCR) para a operação da rede de HPT e HST , respectivamente, conforme os valores indicados nas tabelas do Apêndice E quando os valores de benefícios sociais são comparados com os investimentos e despesas operacionais dos sistemas.

Figura 5.12 – Razão Benefício Custo (BCR) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HPT

Figura 5.13 – Razão Benefício-Custo (BCR) em função da tarifa ferroviária média para a rede de HST

As tendências do *BCR* são semelhantes às do valor presente líquido total (*TNPV*). No cenário Conservador para a operação de *HPT* a razão benefício-custo é maior que 1,00 para tarifa média abaixo de R\$0,20/km, no Intermediário quando a tarifa é menor que R\$0,30/km e no cenário Otimista quando a tarifa é menor que R\$0,40/km.

Em relação à rede de *HST*, o *BCR* é maior do que 1,00 quando a tarifa média ferroviária é menor que R\$0,55/km para o cenário Conservador, menor que R\$0,65/km no Intermediário e R\$0,75/km no cenário Otimista.

Os resultados da razão benefício-custo são maiores para baixas tarifas médias, pois o excedente do consumidor devido aos custos das viagens para os usuários são expressivamente maiores que os demais itens de benefícios nessas condições de política tarifária.

Quando as tecnologias ferroviárias são comparadas, os valores de tarifa média que resultam em *BCR* acima de 1,00 para operação de *HST* são maiores do que para *HPT* pois, mesmo com tarifas mais altas, aquela tecnologia ferroviária é capaz de captar uma demanda maior que os *HPTs*, o que resulta em benefícios econômicos e sociais maiores que os custos totais.

Ainda, apenas para a rede de *HST* o *BCR* atinge valores maiores do que 1,50 utilizado na literatura como parâmetro de aceitação da viabilidade do projeto. Entretanto, para essa tecnologia esse resultado é obtido para tarifas relativamente baixas, de R\$0,20/km, R\$0,30/km e R\$0,40/km para os cenários Conservador, Intermediário e Otimista, respectivamente.

Apesar de o valor presente líquido total (*TNPV*) serem os máximos possíveis nessas condições de política tarifária, os resultados do valor presente líquido econômico (*ENPV*) correspondem aos maiores déficits estimados para a operação de *HST*, com valores de R\$-117,68·10⁹, R\$-93,70·10⁹ e R\$-65,46·10⁹ nos respectivos cenários Conservador, Intermediário e Otimista.

Segundo os gráficos anteriores, o *BCR* não é necessariamente maior que 1,00 quando o *TNPV* torna-se positivo (ou seja, quando os benefícios sobrepõem-se aos custos totais) pois o cômputo daquela medida de desempenho não considera o valor presente líquido da receita operacional, que refere-se a um benefício econômico não revertido à sociedade.

Mesmo que as medidas de desempenho da avaliação socioeconômica tenham resultado em valores negativos para todos os cenários de ambas as tecnologias ferroviárias, são apresentadas a seguir as proporções de custos e benefícios totais para as tarifas que maximizam o *ENPV*.

Assim, os gráficos da Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16 resumem as porcentagens dos itens de custos e benefícios sociais e econômicos para os cenários Conservador, Intermediário e Otimista na hipótese de operação de uma rede de *HPT* com tarifa ótima de R\$1,25/km, R\$1,35/km e R\$1,35/km respectivamente, cujos valores referem-se às respectivas Tabela E.1, Tabela E.2 e Tabela E.3 do Apêndice E.

No caso da operação de *HPT* os investimentos para construção da infraestrutura ferroviária predominam sobre as despesas de manutenção dessa infraestrutura e aquisição, operação e manutenção do material rodante nos três cenários analisados. A proporção dos investimentos sobre os custos totais mantém-se constante em 77,7% nos cenários Conservador e Intermediário e reduzem-se para 76,8% no Otimista.

Os custos de aquisição de material rodante são pequenos em relação às despesas de manutenção da infraestrutura e dos trens, e da operação dos veículos no horizonte de planejamento. Em todos os cenários a compra do material rodante equivale a apenas 0,3% dos custos totais, enquanto que os três últimos itens equivalem a 22,1% no cenário Conservador, 22,0% no Intermediário, e 22,8% no Otimista.

Em relação aos benefícios, observa-se um aumento da proporção da receita entre o cenário Conservador, Intermediário e Otimista, com respectivos valores de 43,9%, 46,4% e 46,9% resultante do aumento da demanda reprimida por viagens após a implantação do sistema de *HPT*. Em contrapartida, há redução da proporção dos benefícios sociais do cenário Conservador para o Otimista, sobretudo em relação ao excedente do consumidor devido à tarifa, cujos valores correspondem a 21,3% no primeiro cenário e 18,7% nos dois últimos.

Figura 5.14 – Proporções de custos e benefícios da operação de HPT no cenário Conservador

Figura 5.15 – Proporções de custos e benefícios da operação de HPT no cenário Intermediário

Figura 5.16 – Proporções de custos e benefícios da operação de *HPT* no cenário Otimista

A redução de acidentes e externalidades apresentam pequena representatividade em relação aos valores totais, com proporções de 4,2%, 3,5% e 2,9% para os respectivos cenários Conservador, Intermediário e Otimista, indicando que não exercem influência significativa sobre os resultados do valor presente líquido total ($TNPV$) e da razão benefício-custo (BCR).

Na sequência, a Figura 5.17, Figura 5.18 e Figura 5.19 caracterizam as proporções dos custos e benefícios totais para a rede ferroviária de *HST* calculados nos cenários Conservador, Intermediário e Otimista para as tarifas que maximizam o valor presente líquido econômico ($ENPV$) conforme apresentado nas respectivas Tabela E.4, Tabela E.5 e Tabela E.6 do Apêndice E.

As conclusões sobre as proporções dos itens das análises socioeconômicas para a operação de *HPT* podem ser estendidas ao desempenho econômico e social dos *HST*. No caso dos custos totais há predominância das proporções dos investimentos em infraestrutura de 70,7% para 70,3% e 70,1% entre o cenário Conservador, Intermediário e Otimista respectivamente. Essas proporções são menores que para a rede de *HPT*, pois apesar dos maiores investimentos em infraestrutura para aquela tecnologia, as despesas operacionais de *HST* são maiores resultando na redução dos valores percentuais estimados.

No contexto dessas despesas, há novamente predominância daquelas de manutenção da infraestrutura e dos trens, bem como da operação dos veículos em detrimento da aquisição do trens. As proporções daqueles itens de despesas em relação aos custos totais aumentam de 28,8% para 29,1% e 29,3% respectivamente aos cenários Conservador, Intermediário e Otimista, com ênfase novamente para as baixas proporções das despesas com aquisição do material rodante menores ou iguais a 0,6%.

As proporções das despesas operacionais dos trens aumentam em relação à rede de *HPT* devido aos maiores valores unitários das despesas de manutenção (infraestrutura e material rodante) e operação dos *HSTs*, à maior demanda absorvida na operação dessa tecnologia ferroviária e à necessidade de maior número de trens e frequência dos serviços.

Figura 5.17 – Proporções de custos e benefícios da operação de HST no cenário Conservador

Figura 5.18 – Proporções de custos e benefícios da operação de HST no cenário Intermediário

Figura 5.19 – Proporções de custos e benefícios da operação de HST no cenário Otimista

Quanto às receitas, há novamente uma tendência de aumento dos valores em relação aos benefícios totais entre os cenários Conservador, Intermediário e Otimista, com respectivas proporções de 41,6%, 43,3% e 45,1%. No aspecto dos benefícios sociais, as maiores proporções também referem-se ao excedente do consumidor devido à tarifa com respectivos valores de 31,4%, 29,8% e 27,9%, enquanto que aqueles relativos à redução de acidentes e externalidades mantêm-se baixos, com respectivas proporções totais de 6,5% e 5,6% e 5,1%.

Apesar de serem observadas tarifas ótimas menores para *HST* em relação aos *HPT* nos cenários correspondentes, a proporção de receita mantém-se alta para aquela tecnologia pois a demanda atendida é elevada devido ao maior valor final da função utilidade pela oferta de *HSTs*, haja vista que o tempo de viagem é menor para essa tecnologia, incorrendo em maior proporção de divisão modal em detrimento da operação de *HPTs*.

5.5 Considerações sobre a Análise Socioeconômica

Dado que o investimento em infraestrutura é o principal item de custo da *CBA*, cabe investigá-lo sob diferentes enfoques socioeconômicos. Se for considerado um modelo alternativo de construção da infraestrutura em que os investimentos na rede forem aplicados por órgãos públicos sem expectativa de retorno dos investimentos (a fundo perdido), os resultados estimados para o valor presente líquido econômico (*ENPV*) seriam alterados pois os itens de investimentos em infraestrutura são os mais significativos entre os custos totais.

Nesse caso, excluindo-se o valor presente líquido dos investimentos para a construção da rede de *HPT*, o *ENPV* na tarifa ótima do cenário Conservador alterar-se-ia para um valor presente líquido positivo de $R\$13,38 \cdot 10^9$ no horizonte de 35 anos, tornando o investimento atraente do ponto de vista de um operador privado mesmo nas condições mais desfavoráveis de produtividade de construção da rede, absorção de demanda e majoração dos investimentos. Sob essas mesmas premissas, o *ENPV* resultante da operação de *HSTs* no cenário Conservador aumentaria para um valor positivo de $R\$25,73 \cdot 10^9$.

Nas condições do cenário Otimista investigado os resultados dessa medida de desempenho econômico seriam também positivos com valores de $R\$19,02 \cdot 10^9$ para a operação de *HPT* e de

R\$35,16·10⁹ para *HST* em um horizonte de planejamento 35 anos, tornando ambos os investimentos atraentes economicamente com destaque para a tecnologia de alta velocidade.

Outra linha de argumentação relativa às avaliações socioeconômicas refere-se à variação da porcentagem de valor residual dos investimentos em infraestrutura e da taxa mínima de atratividade para o cálculo do valor presente líquido dos itens da *CBA*.

Variando-se a porcentagem do valor residual dos investimentos em infraestrutura – ou seja, o parâmetro ξ da Equação 4.13 (página 191) – entre 0% e 100% em intervalos de 20%, e mantendo-se fixos os demais parâmetros para o cenário Intermediário com tarifa ótima de R\$1,35/km e R\$1,05/km que maximizam o *ENPV* da operação de *HPT* e *HST* respectivamente, o valor presente líquido econômico (*ENPV*) e a razão benefício-custo (*BCR*) sob essas condições são representados na Figura 5.20 e Figura 5.21.

Figura 5.20 – Valor Presente Líquido Econômico (*ENPV*) mediante a variação do valor residual dos investimentos em infraestrutura para o cenário Intermediário

Conforme indicado na seção 5.4, nas condições de tarifa ótima para o cenário Intermediário, quando o valor residual dos investimentos em infraestrutura é nulo, o valor presente líquido econômico (*ENPV*) resulta em déficit da operação de *HPTs* de R\$-70,62·10⁹ enquanto a ope-

ração de *HSTs* resulta também em déficit de $R\$-60,78 \cdot 10^9$.

Por outro lado, na situação em que a depreciação é nula, ou seja, quando o valor residual corresponde a 100% do investimentos em infraestrutura, o valor presente líquido econômico resultante no cenário Intermediário para a rede de *HPT* é de $R\$-54,67 \cdot 10^9$ e para *HST* é de $R\$-43,98 \cdot 10^9$, os quais mantêm-se negativos, porém com valores absolutos de déficit menores em relação à situação anterior de depreciação total da infraestrutura.

Figura 5.21 – Razão Benefício-Custo (*BCR*) mediante a variação do valor residual dos investimentos em infraestrutura para o cenário Intermediário

Do ponto de vista social, quando o valor residual dos ativos da infraestrutura são considerados nulos, o valor do *BCR* estimado é de 0,24 para a operação de *HPT* e de 0,54 para *HST*, muito aquém do valor de referência de 1,50 considerado para viabilização de projetos (DE RUS et al., 2009), indicando que o investimento na construção e operação da infraestrutura ferroviária não é vantajoso do ponto de vista dos benefícios para a sociedade nessas circunstâncias.

Quando o valor residual dos ativos de infraestrutura são computados como equivalentes a 100% do investimento na implantação da infraestrutura e esse valor é caracterizado como um bem de interesse social, os valores do *BCR* alteram-se para 0,40 e 0,69 no caso da operação

de *HPT* e de *HST*, respectivamente. Novamente, o benefício social que os investimentos em infraestrutura representam continua a indicar custos totais maiores que os benefícios sociais da operação dos sistemas ferroviários para as tarifas que maximizam o *ENPV*.

Finalmente, ao analisar a variação da taxa mínima de atratividade do investimento (*MARR*) com valores de 0,0%, 1,0%, 3,0% e 5,1% (este último aplicado nas análises dos cenários detalhados na seção 5.4) considerando valor residual fixo de 60% dos investimentos na construção da infraestrutura e as tarifas ótimas do cenário Intermediário, tem-se os resultados dos gráficos da Figura 5.22 e Figura 5.23 respectivamente para o valor presente líquido econômico (*ENPV*) e a razão benefício-custo (*BCR*) estimados para a operação de *HPT* e *HST*.

Figura 5.22 – Valor Presente Líquido Econômico (*ENPV*) mediante a variação da taxa mínima de atratividade para o cenário Intermediário

Os resultados indicam que, se a taxa mínima de atratividade for nula para o cálculo do valor presente líquido dos itens da *CBA* – por exemplo, se a construção e operação do sistema for de competência do poder público e este não tiver expectativas de retorno do investimento devido aos interesses sociais do projeto – o valor presente líquido econômico (*ENPV*) devido à operação de *HPT* é equivalente a um déficit R\$-17,99·10⁹ e para a operação de *HST* é equivalente a

um superávit de $R\$17,22 \cdot 10^9$. Nesse caso, o valor final positivo para a medida de desempenho na operação de *HSTs* indica que a implantação dessa tecnologia poderia, eventualmente, ser viável sob o aspecto econômico nas condições estabelecidas.

Nessa mesma tendência, em relação aos benefícios sociais, uma rede de *HPTs* resultaria em *BCR* menor que 1,00 (0,79) mesmo que a taxa de atratividade fosse de 0,0%. Por outro lado no caso da operação de *HSTs*, para o cenário Intermediário na tarifa ótima e taxa de atratividade nula, a razão benefício-custo resultaria no valor estimado de 1,20, porém ainda menor do que a recomendação mínima de 1,50.

Figura 5.23 – Razão Benefício-Custo (*BCR*) mediante a variação da taxa mínima de atratividade para o cenário Intermediário

Nas condições do cenário Intermediário, se for considerado um valor residual equivalente a 60% dos investimentos em infraestrutura, a implantação do sistema de *HST* poderia viabilizar-se do ponto de vista econômico a uma taxa de atratividade (*MARR*) menor do que aproximadamente 0,7% dado que o *ENPV* torna-se positivo nessas condições. Por outro lado, sob a perspectiva socioeconômica, o *BCR* é maior que 1,00 somente na operação dos *HSTs* quando essa taxa de atratividade é menor do que aproximadamente 1,4%.

Considerações Finais e Recomendações

Esta tese visou contribuir para o amadurecimento das ideias sobre alternativas de transporte intermunicipal de passageiros na Região Sudeste do Brasil em um horizonte de planejamento estratégico. Porém, não existe a pretensão de encerrar as discussões a respeito das possibilidades de implantação de um sistema de transporte dessa natureza, haja vista as restrições de tempo e de recursos humanos e econômicos para realização de um trabalho desse porte.

A formulação para análise socioeconômica contida nesta tese abre perspectivas para análises mais aprofundadas sobre os investimentos necessários para a construção de uma infraestrutura ferroviária e sobre uma possível estrutura de pesquisa de preferência que permita captar as escolhas dos usuários pelo transporte ferroviário em um ambiente de pouca experiência do público-alvo com o uso desse tipo de infraestrutura.

Nesse sentido, o objetivo principal de estimar e comparar as perspectivas de implantação de diferentes serviços ferroviários para o transporte de passageiros na Região Sudeste do Brasil sob a perspectiva de desempenho socioeconômico dos projetos foi atingido. Isso foi possível pela estimativa dos investimentos necessários à construção de nova infraestrutura ferroviária compatível com as exigências das tecnologias propostas, da potencial demanda para utilização do modo de transporte e aplicação de uma formulação de *CBA* em uma rede hipotética.

Mediante os resultados do Capítulo 5 uma reflexão sobre a hipótese de tese proposta no Capítulo 1 indica que, sob a perspectiva estritamente econômica, a implantação de uma rede ferroviária para o transporte de passageiros na Região Sudeste não parece ser promissora independentemente da tecnologia ferroviária a ser operada.

Sob a premissa de construção de uma nova infraestrutura segregada das atuais linhas ferroviárias para o transporte de cargas, o desempenho econômico da operação de *HSTs* parece mais atraente que para *HPTs*, haja vista que as estimativas de investimentos na construção da via permanente são praticamente equivalentes para ambas as tecnologias ferroviárias.

De fato, existia uma ideia de que um projeto de rede de *HST* incorresse em elevados investimentos e despesas operacionais que pudessem inviabilizar a sua implementação. Porém, a importante conclusão de que os investimentos são elevados seja qual for a tecnologia ferroviária leva a crer que a operação de *HSTs* é uma alternativa mais conveniente em relação aos *HPTs* como proposto pela hipótese de tese, dado que os benefícios marginais pela redução do tempo de viagem para aquela tecnologia são mais expressivos.

Quando o desempenho dos sistemas é avaliado no âmbito dos benefícios e custos totais, os resultados da avaliação socioeconômica são positivos em situações específicas de política tarifária. Assim, sob a hipótese de tese investigada, a diferença entre benefícios e custos socioeconômicos totais pela oferta serviços de *HSTs* pode resultar em valores positivos para tarifas específicas, sendo essa diferença, em geral, maior do que para a operação de *HPTs*.

Apesar da necessidade de análises mais aprofundadas ou mais específicas em termos de conexões entre cidades – explorando-se por exemplo alternativas de ofertas de serviços expressos e paradores – esses resultados permitem afirmar que, na atual conjuntura brasileira, eventualmente existem outras áreas prioritárias no setor de transportes que necessitem de maiores investimentos ou que conduzam a benefícios econômicos e sociais mais significativos que um sistema de trens de passageiros conforme investigado nesta pesquisa.

É importante ressaltar que uma configuração de rede distinta daquela proposta nesta tese pode incorrer em resultados mais promissores uma vez que a exclusão de arcos com elevado investimento de construção e pequena contribuição marginal sobre a receita total do sistema eventualmente proveria resultados positivos para a medida de desempenho representativa do valor presente líquido econômico (*ENPV*).

Algumas considerações podem ser apresentadas sobre as contribuições da tese do ponto de vista metodológico. A aplicação de um Algoritmo Genético utilizando uma abordagem de computação paralela foi eficaz para estimativa dos investimentos em infraestrutura e obtenção de traçados ferroviários em reduzido tempo de processamento computacional.

A utilização desse método permitiu a exploração de uma infraestrutura computacional robusta e de alta confiabilidade provida pela Universidade de São Paulo e abre perspectivas promissoras para resolução de problemas de otimização combinatória de grande porte ou até mesmo de modelos matemáticos exatos no âmbito da programação paralela e concorrente.

Em relação à modelagem da demanda, a estimativa de modelos de distribuição de viagens e projeção dessas em um horizonte de planejamento mostrou-se pertinente para aplicação nesta tese, tanto para os modos de transporte cuja modelagem é explorada na literatura (no caso de Ônibus e Avião), quanto para o modo Automóvel, em que não há registros na literatura.

Ainda no contexto da demanda, a proposta de uma pesquisa de preferência declarada para estimativa da propensão à escolha modal é uma contribuição para análises da percepção dos usuários em relação à escolha de alternativas de modos de viagem. Os resultados das calibrações dos modelos de divisão modal com base na teoria de maximização da utilidade indicam que, até o momento, essa percepção é igual para serviços de (*HPTs* e *HSTs*).

Quanto à formulação de análise custo-benefício, apesar de ser um método extensivamente explorado na literatura, as propostas permitiram a aplicação de uma abordagem quantitativa contextualizada ao problema de uma rede ferroviária regional para o transporte de passageiros.

Cabe ressaltar, entretanto, que as medidas de desempenho apresentadas no Capítulo 5 indicam tendências de resultados socioeconômicos de uma nova rede ferroviária para o transporte de passageiros na Região Sudeste, as quais estão sujeitas às variações decorrentes de múltiplos fatores, como aplicação de diferentes métodos de estimativa e projeção de demanda, oscilações dos valores de investimentos estimados (inclusive pela inclusão daqueles referentes à construção ou estimativas acuradas para readequação de estações) e dos valores unitários considerados na aplicação da formulação de análise socioeconômica.

6.1 Recomendações para Pesquisas Futuras

As considerações apresentadas nesta tese de doutorado possuem diversos desdobramentos possíveis quanto ao melhoramento e aplicação dos modelos propostos. A implementação do Algoritmo Genético em paralelo para resolução do problema de obtenção de traçados ferroviários permite estimar e avaliar os investimentos necessários à duplicação de ferrovias existentes fora das faixas de domínio atuais em que estão instaladas, alternativa que pode ser promissora dada a pequena proporção dos custos de desapropriações em relação aos demais itens.

Do ponto de vista de avaliação da demanda, existem possibilidades de abordagens alternativas aos modelos analíticos para estimativa do número de viagens pelos modos de transporte existentes – tais como redes neurais artificiais e simulação multiagente –, os quais podem apresentar maior acurácia para as estimativas de viagens de longa distância.

Quanto à avaliação da propensão à escolha modal é possível considerar a aplicação de uma abordagem metodológica alternativa à apresentada nesta tese – por exemplo, pela utilização de um modelo do tipo *Nested Logit Multinomial* ou pelo treinamento de uma rede neural artificial – com vistas ao aumento da porcentagem de acertos em relação às respostas dos respondentes da pesquisa de preferência declarada descrita no Capítulo 3.

Em relação à formulação de análise custo-benefício, além da contribuição direta de proposição de uma formulação específica para as condições brasileiras e explícita para avaliação de novos projetos ferroviários para o transporte de passageiros, pesquisas futuras podem ser realizadas ao considerar diferentes configurações de rede ferroviária em detrimento daquela proposta no Capítulo 5. Investigações dessa natureza podem resultar em valores distintos dos identificados nesta tese como, por exemplo, na restrição da rede a conexões com elevada demanda, em que o investimento marginal na construção da infraestrutura é compensado pelo aumento da demanda entre cidades atendidas.

A avaliação socioeconômica de diferentes configurações de rede ferroviária permite investigações acerca de combinações de arcos que otimizem uma medida de desempenho específica, remetendo à resolução de problemas de planejamento de redes de transporte do ponto de vista da aplicação de métodos de otimização.

Além disso, a avaliação de diferentes combinações de arcos para composição de uma nova rede ferroviária pode ser associada a investigações mais aprofundadas sobre os efeitos da variação dos diferentes parâmetros considerados na formulação de análise custo-benefício tal como considerado no Capítulo 5 em relação à produtividade média da construção da infraestrutura, majoração dos investimentos requeridos pelos traçados e potencial de absorção de demanda.

Referências

- ABCR (2013). *Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias – Tarifas de Pedágio*. <http://www.abcr.org.br/TarifasPedagio/TarifaPedagio.aspx>. Acessado em 25/08/2013.
- ADEDAYO, A. K.; AGUNBIADE, D. A. (2013). Parameter estimation and determination of sample size in logistic regression. *Journal of Mathematics and Statistics*, Science Publications, v. 8, n. 4, p. 481.
- AGRESTI, A. (1996). *An introduction to categorical data analysis*. New York, NY, USA: Wiley.
- AGUIAR JÚNIOR, S. R. (2004). *Modelo RAPIDE: uma aplicação de mineração de dados e redes neurais artificiais para a estimativa da demanda por transporte rodoviário interestadual de passageiros no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Católica de Brasília, Brasília, DF.
- AHERN, A. A.; TAPLEY, N. (2008). The use of stated preference techniques to model modal choices on interurban trips in ireland. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, v. 42, n. 1, p. 15–27.
- ALEKSEEV, K. P. G.; SEIXAS, J. M. (2002). Forecasting the air transport demand for passengers with neural modelling. In: IEEE. *Proceedings of VII Brazilian Symposium on Neural Networks, 2002*. Recife, Brazil, p. 86–91.
- AMOS, P.; BULLOCK, D.; SONDHJ, J. (2010). *High-speed rail: the fast track to economic development?* Washington, DC, USA: World Bank.
- ANAC (1998). *Agência Nacional de Aviação Civil - Demanda Global do Transporte Aéreo Brasileiro*. <http://www2.anac.gov.br/arquivos/pdf/demandaGlobalTranspAer1998.pdf>. Acessado em 17/04/2014.
- ANAC (2013). *Anuário do Transporte Aéreo: Dados Estatísticos e Econômicos de 2012*. <http://www2.anac.gov.br/arquivos/zip/Anuario2012.zip>. Acessado em 12/11/2013.
- ANAC (2014a). *Agência Nacional de Aviação Civil - Relatório de Tarifas Aéreas*. <http://www.anac.gov.br/>. Acessado em 12/08/2014.

ANAC (2014b). *Série Histórica Voo Regular Ativo – VRA*. <http://www2.anac.gov.br/vra/>. Acessado em 12/12/2014.

ANP (2013). *Agência Nacional de Petróleo - Boletim Anual de Preços de Combustível*. <http://www.anp.gov.br/?pg=65870&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1369405304193>. Acessado em 17/08/2013.

ANTT (2011). *Agência Nacional de Transportes Terrestres – Pesquisa Operacional: serviços interestaduais com extensão superior a 75 km*. http://propass.antt.gov.br/index.php/content/view/105717/Pesquisa_Operacional___servicos_interestaduais_com_extensao_superior_a_75_km.html. Acessado em 18/05/2014.

ANTT (2013). *Agência Nacional de Transportes Terrestres – Coeficientes Tarifários de Serviços de Ônibus Intermunicipais*. <https://www.antt.gov.br/sgp/src.br.gov.antt/apresentacao/consultas>. Acessado em 15/08/2013.

AREMA (2003). Railway track design. In: *Practical Guide to Railway Engineering*. Maryland, USA: American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association. cap. 6.

AVDAGIC, Z.; SMAJEVIC, A.; BOSKOVIC, D. (2008). Track layout design using modified genetic algorithm. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2008*. Cambridge, UK: [s.n.], p. 803–808.

BATISTA, C. N. O. (2006). *Contribuição à Análise da Capacidade de Processamento de Trens Cargueiros em Linhas Ferroviárias Singelas no Brasil*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP.

BCB (2015a). *Banco Central do Brasil - Taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia)*. <http://www.bcb.gov.br/?SELICDIARIOS>. Acessado em 27/01/2015.

BCB (2015b). *Banco Central do Brasil - Taxas de Câmbio*. <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/port/ptaxnpesq.asp?id=txcotacao>. Acessado em 19/01/2015.

BELLET, C. (2009). The introduction of the high speed rail and urban restructuring: the case of Spain. *City Futures*, v. 9, p. 4–6.

BERECHMAN, J. (2010). *The evaluation of transportation investment projects*. [S.l.]: Routledge.

BERTONCINI, B. V.; KAWAMOTO, E. (2012). Modelagem da matriz OD sintética a partir dos volumes observados nas interseções da rede de transportes. *Transportes (Rio de Janeiro)*, v. 20, n. 2, p. 75–83.

BIERLAIRE, M.; FETIARISON, M. (2009). Estimation of discrete choice models: extending biogeme. In: *Swiss Transport Research Conference (STRC)*. [S.l.: s.n.].

BOARDMAN, A. E. (2010). *Cost-benefit analysis*. [S.l.]: Pearson Education.

BOS (2013). *Bristol Online Surveys*. www.survey.bris.ac.uk/. Acessado em 15/09/2013.

- CALIPER (2007). *TransCAD: Transportation GIS Software*. Newton, MA , USA: Caliper Corporation.
- CARSON, R. T. et al. (1994). Experimental analysis of choice. *Marketing letters*, Springer, v. 5, n. 4, p. 351–367.
- CASCETTA, E.; NGUYEN, S. (1988). A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 22, n. 6, p. 437–455.
- CERVERO, R.; RADISCH, C. (1996). Travel choices in pedestrian versus automobile oriented neighborhoods. *Transport Policy*, Elsevier, v. 3, n. 3, p. 127–141.
- CHEN, J. X.; GUO, Y. Y.; LV, M. X. (2011). An adaptive genetic algorithm based on multi-population parallel evolutionary for highway alignment optimization model. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, v. 58, p. 1499–1503.
- CHEVROULET, T.; REYNAUD, C. (2011). Assessment of high speed rail projects: Selection of european cases and recommendations from eva-tren research. In: *Proceedings of the 11th World Conference on Transportation Research*. Lisbon, Portugal: WCTR Society.
- CHEW, E. P.; GOH, C. J.; FWA, T. F. (1989). Simultaneous optimization of horizontal and vertical alignments for highways. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 315–329.
- CHOICE METRICS (2014). *Ngene*. Version 1.1.2., Choice Metrics Pty Ltd.
- CPTM (2014a). *Companhia Paulista de Trens Metropolitanos*. <http://www.cptm.sp.gov.br>. Acesso em: 20/09/2014.
- CPTM (2014b). *Programa de Investimentos em Trens Regionais – CPTM*. <http://www.cptm.sp.gov.br/Obras/trens-regionais.asp>. Acesso em: 21/08/2014.
- CRAINIC, T. G.; DAVIDOVIĆ, T.; RAMLJAK, D. (2012). Designing parallel meta-heuristic methods. In: DESPOTOVIC-ZRAKIC, M.; MILUTINOVIC, V.; BELIC, A. (Ed.). *Handbook of Research on High Performance and Cloud Computing in Scientific Research and Education*. Québec, Canada: IGI Global. cap. 11.
- DATTALO, P. (2008). *Determining sample size: Balancing power, precision, and practicality*. ew York, NY, USA: Oxford University Press.
- DE RUS, G. (2008). *The economic effects of high speed rail investment*. Spain.
- DE RUS, G. et al. (2009). *Economic analysis of high speed rail in Europe*. Spain: Fundación BBVA.
- De Rus, G.; NOMBELA, G. (2007). Is investment in high speed rail socially profitable? *Journal of transport economics and policy*, JSTOR, v. 41, n. 1, p. 3–23.
- DESU, M. M. (2012). *Sample size methodology*. Waltham, MA, USA: Elsevier.
- DFT (2014). *Transport Analysis Guidance – WebTAG*. <https://www.gov.uk/transport-analysis-guidance-webtag>. UK Department for Transport's website for guidance on the conduct of transport studies.

- DOMENCICH, T.; MCFADDEN, D. (1975). *Urban Travel Demand: A Behavioral Approach*. Amsterdam, Netherlands: North-Holland Publishing Co.
- DOMENCICH, T. A.; KRAFT, G.; VALETTE, J. (1968). Estimation of urban passenger travel behavior: An economic demand model. *Highway Research Record*.
- DREYER, S. B. (2010). *Comparative Analysis of the Quality of Appraisal Practices for High Speed Rail Investments Projects in Europe*. Dissertação (Mestrado) — Molde University College, Molde, Norway.
- EMPLASA (2006). *Pesquisa de Origem e Destino do Transporte Rodoviário e Aéreo do Estado de São Paulo- Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano*. http://www.emplasa.sp.gov.br/emplasa/conselhos/rmsp/arquivos/Pesquisa_OD_Rodoviaria_-_Executivo.swf.
- FLORIO, M. et al. (2004). *Guide to cost-benefit analysis of investment projects*. Brussels, Belgium: European Commission, DG Regional Policy.
- FOWKES, T.; WARDMAN, M. (1988). The design of stated preference travel choice experiments: with special reference to interpersonal taste variations. *Journal of Transport Economics and Policy*, JSTOR, p. 27–44.
- FURNESS, K. P. (1965). Time function iteration. *Traffic Engineering and Control*, v. 7, n. 7, p. 458–460.
- GAMPER, C. D.; TURCANU, C. (2007). On the governmental use of multi-criteria analysis. *Ecological economics*, Elsevier, v. 62, n. 2, p. 298–307.
- GIVONI, M. (2006). Development and impact of the modern high-speed train: A review. *Transport reviews*, Taylor & Francis, v. 26, n. 5, p. 593–611.
- GLEAVE, S. D. (2004). *High Speed Rail: International Comparisons: Final Report*. [S.l.].
- GLEAVE, S. D. (2011). The value of station investment—research on regenerative impacts. *Network Rail, London*.
- GOH, C. J.; CHEW, E. P.; FWA, T. F. (1988). Discrete and continuous models for computation of optimal vertical highway alignment. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 22, n. 6, p. 399–409.
- GOKTEPE, A.; LAV, A.; ALTUN, S. (2009). Method for optimal vertical alignment of highways. In: *Proceedings of the ICE - Transport*. [S.l.: s.n.], v. 162, n. 4, p. 177–188.
- GOMES, L. E. D. (1973). *Transporte Rodoviário de Passageiros*.
- GONÇALVES, M. B.; BEZ, E. T.; NOVAES, A. G. (2007). Modelos econométricos aplicados à previsão de demanda por transporte interestadual de passageiros de ônibus no Brasil. *Transportes (Rio de Janeiro)*, v. 15, n. 1, p. 24–33.
- GRANGE, L. et al. (2013). A polarized logit model. *Transportation research part A: policy and practice*, Elsevier, v. 53, p. 1–9.
- GROSCHE, T.; ROTHLAUF, F.; HEINZL, A. (2007). Gravity models for airline passenger volume estimation. *Journal of Air Transport Management*, Elsevier, v. 13, n. 4, p. 175–183.

- GUPTA, M.; DEEP, K. (2009). A state-of-the-art review of population-based parallel meta-heuristics. In: IEEE. *World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing, 2009*. Coimbatore, India, p. 1604–1607.
- HASHEM, I. A. T. et al. (2015). The rise of "big data" on cloud computing: Review and open research issues. *Information Systems*, Elsevier, v. 47, p. 98 – 115.
- HAYASHI, Y.; MORISUGI, H. (2000). International comparison of background concept and methodology of transportation project appraisal. *Transport policy*, Pergamon, v. 7, n. 1, p. 73–88.
- HENDERSON, J. V. (2008). Regiões de influência das cidades 2007. *Rio de Janeiro: IBGE*.
- HOGAN, J. D. (1973). Experience with optloc optimum location of highways by computer. In: *Proceedings on Cost Model and Optimization in Highway*. London, UK: [s.n.]. Session L10.
- HSIEH, F. Y. (1989). Sample size tables for logistic regression. *Statistics in medicine*, Wiley Online Library, v. 8, n. 7, p. 795–802.
- HUANG, S.; CHEN, C.; DZENG, R. (2011). Design of track alignment using building information modeling. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 137, n. 11, p. 823–830.
- IBGE (1990). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Séries Econômicas, Demográficas e Sociais de 1550 a 1990*. http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/monografias/GEBIS%20-%20RJ/serieestatisticasrestrospectivas/Volume%203_Estatisticas%20historicas%20do%20Brasil_series%20economicas_demograficas%20e%20sociais%20de%201550%20a%201988.pdf. Acesso em: 12/08/2013.
- IBGE (2010). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: Censo Populacional 2010*. <http://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 10/04/2013.
- IBGE (2014a). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Mapa Mural de Cobertura e Uso da Terra*. http://www.metadados.geo.ibge.gov.br/geonetwork_ibge/srv/por/metadata.show?id=11079&currTab=simple. Acessado em 25/01/2014.
- IBGE (2014b). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Projeção de Crescimento da População Brasileira*. http://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?u=ftp.ibge.gov.br/Projecao_da_Populacao/Revisao_2008_Projecoes_1980_2050/Estimativas_1980_2050.zip. Acessado em 20/03/2014.
- IBGE (2014c). *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – WebCart*. <http://www.ibge.gov.br/webcart/>. Acessado em 23/02/2014.
- ISLER, C. A. (2010). *Proposta de um Modelo de Capacidade de Processamento de Trens Cargueiros em Redes Ferroviárias de Linha Singela*. Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP.
- ISLER, C. A.; PITOMBO, C. S. (2014). Avaliação da escolha modal para o transporte ferroviário de passageiros na região sudeste através de árvores de decisão. In: *Anais do XXVIII Congresso da ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Curitiba, PR: ANPET.

ISLER, C. A.; WIDMER, J. A. (2012). Considerações sobre a via permanente ferroviária brasileira para o transporte de carga em contêineres. In: *Anais do XXVI Congresso da ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Joinville, SC: ANPET, v. 1, p. 2075–2078.

JACOBS, G. D. (1995). *Costing Road Accidents in Developing Countries*. London, UK.

JHA, M. K. (2003). Criteria-based decision support system for selecting highway alignments. *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 129, n. 1, p. 33–41.

JHA, M. K.; MCCALL, C.; SCHONFELD, P. (2001). Using gis, genetic algorithms, and visualization in highway development. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley Online Library, v. 16, n. 6, p. 399–414.

JHA, M. K.; SCHONFELD, P. (2000). Integrating genetic algorithms and geographic information system to optimize highway alignments. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board, v. 1719, n. 1, p. 233–240.

JHA, M. K. et al. (2006). *Intelligent Road Design*. Boston, MA, USA: [s.n.].

JHA, M. K.; SCHONFELD, P.; SAMANTA, S. (2007). Optimizing rail transit routes with genetic algorithms and geographic information system. *Journal of Urban Planning and Development*, American Society of Civil Engineers, v. 133, n. 3, p. 161–171.

JONG, J. C.; SCHONFELD, P. (2003). An evolutionary model for simultaneously optimizing three-dimensional highway alignments. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 37, n. 2, p. 107–128.

JPPF (2014). *Java Parallel Programming Framework – JPPF*. <http://www.jppf.org/>. Acessado em 18/04/2014.

KANG, M.; JHA, M. K.; SCHONFELD, P. (2012). Applicability of highway alignment optimization models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, v. 21, n. 1, p. 257–286.

KAZEMI, S. F.; SHAFABI, Y. (2013). An integrated model of parallel processing and PSO algorithm for solving optimum highway alignment problem. In: *Proceedings of the 27th European Conference on Modelling and Simulation*. Aalesund, Norway: European Council for Modeling and Simulation, p. 551–557.

KIM, E. et al. (2004). Intersection modeling for highway alignment optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Wiley Online Library, v. 19, n. 2, p. 119–129.

KIM, E.; JHA, M. K.; SON, B. (2005). Improving the computational efficiency of highway alignment optimization models through a stepwise genetic algorithms approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 39, n. 4, p. 339–360.

KITAMURA, R.; MOKHTARIAN, P. L.; LAIDET, L. (1997). A micro-analysis of land use and travel in five neighborhoods in the san francisco bay area. *Transportation*, Springer, v. 24, n. 2, p. 125–158.

- KOC, W.; PALIKOWSKA, K. (2001). Evolution programming applied to the railway line design in the presence of terrain obstacles. In: *2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Proceedings*. Oakland, CA, USA: IEEE, p. 1084–1089.
- KRAFT, G. (1968). *Demand for intercity passenger travel in the Washington-Boston corridor*. Boston, MA, USA.
- LACERDA, S. M. (2008). Trens de alta velocidade: experiência internacional. *Revista do BNDES*, v. 14, n. 29, p. 61–80.
- LEE, Y.; CHENG, J.-F. (2001). Optimizing highway grades to minimize cost and maintain traffic speed. *Journal of transportation engineering*, American Society of Civil Engineers, v. 127, n. 4, p. 303–310.
- LEMESHOW, S. et al. (1990). *Adequacy of sample size in health studies*. Chichester: Wiley.
- LOPEZ, H. (2008). *The social discount rate: Estimates for nine Latin American countries*. Washington, DC, USA.
- MACKIE, P. et al. (1999). *Socio-economic Cost Benefit Analysis: Transport Infrastructure Needs Assessment – TINA*. Geneva, Switzerland.
- MACKIE, P. et al. (2003). *Toolkit for the Economic Evaluation of World Bank Transport Projects*. Leeds, UK.
- MATHEWS, P. (2010). *Sample size calculations: practical methods for engineers and scientists*. Fairport Harbor, OH, USA: Mathews Malnar and Bailey, Inc.
- MCKINSEY (2010). *Estudo do Setor de Transporte Aéreo do Brasil: Relatório Consolidado*. Brasil, Rio de Janeiro.
- MITCHELL, R. C.; CARSON, R. T. (1989). *Using surveys to value public goods: the contingent valuation method*. Washington, DC, USA: Resources for the Future.
- MOREIRA, R. (2000). *Avaliação de projetos de transportes utilizando análise benefício custo e método de análise hierárquica*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP.
- MPS (2013). *Ministério da Previdência Social – Projeções Atuariais para o Regime Geral de Previdência Social*. <http://www12.senado.gov.br/orcamento/documentos/lido/2014/elaboracao/projeto-de-lei/2014/anexo-iv.5-2013-projecoes-atuariais-para-o-regime-geral-de-previdencia-social-2013>
- MUNASINGHE, M. (2007). *Multi-criteria analysis in environmental decision-making*. Washington, DC, USA: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment.
- MYSQL (2014). *Open Source Database – MySQL*. <http://www.mysql.com/>. Acessado em 10/07/2014.
- NASA (2014). *National Aeronautics and Space Administration – NASA*. <http://www.nasa.gov/>. Acessado em 10/08/2014.
- NASH, C. (2010). *Enhancing the Cost Benefit Analysis of High Speed Rail*. [S.l.].

- NELLTHORP, J.; HYMAN, G. (2001). Alternatives to the rule of a half in matrix-based appraisal. In: *Proceedings of the AET European Transport Conference*. Cambridge, UK: Association for European Transport.
- NELLTHORP, J.; MACKIE, P. J.; BRISTOW, A. L. (1998). *Measurement and valuation of the impacts of transport initiatives*. [S.l.].
- NICHOLSON, A. J.; ELMS, D. G.; WILLIMAN, A. (1976). A variational approach to optimal route location. *Highway Engineer*, American Society of Civil Engineers, v. 23, n. 3, p. 22–25.
- NUVEMUSP (2013). *Ambiente de infraestrutura em nuvem da Universidade de São Paulo - NuvemUSP*. <https://nuvem.uspdigital.usp.br/>. Acessado em 15/10/2013.
- OECD (1973). *Optimisation of road alignment by the use of computers*. Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development, 117 p.
- ORACLE (2012). *Java Software*. <https://www.oracle.com/java/index.html>. Acessado em 21/02/2012.
- ORME, B. (1998). Sample size issues for conjoint analysis studies. *Sawthooth Software Research paper Series*. Squim, WA, USA: Sawthooth Software Inc.
- ORTUZAR, J. D. (1982). Fundamentals of discrete multimodal choice modelling. *Transport Reviews*, Taylor and Francis Ltd, v. 2, n. 1, p. 47–78.
- ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. (2011). *Modelling transport*. 4. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd.
- PARKER, N. A. (1977). Rural highway route corridor selection. *Transportation Planning and Technology*, Taylor & Francis, v. 3, n. 4, p. 247–256.
- PEDUZZI, P. et al. (1996). A simulation study of the number of events per variable in logistic regression analysis. *Journal of clinical epidemiology*, Elsevier, v. 49, n. 12, p. 1373–1379.
- PITOMBEIRA NETO, A. R.; BERTONCINI, B. V.; LOUREIRO, C. F. G. (2011). Abordagem bayesiana na estimação de matrizes origem-destino sintéticas em redes de transportes. In: *Anais do XXV Congresso da ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. [S.l.]: ANPET.
- PITOMBO, C. S.; KAWAMOTO, E.; SOUSA, A. J. (2011). An exploratory analysis of relationships between socioeconomic, land use, activity participation variables and travel patterns. *Transport Policy*, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 347–357.
- PNLT (2014). *Plano Nacional de Logística e Transporte*. <http://www2.transportes.gov.br/bit/01-inicial/pnlt.html>. Acessado em 10/03/2014.
- PRODAN, A. (2011). *Infrastructure Pricing Models for New High-Speed Railway Corridors in Europe: Pricing Model Development for the Lisbon-Madrid High-Speed Line*. Dissertação (Mestrado) — Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal.
- QUALTRICS (2013). *Qualtrics Online Surveys*. www.qualtrics.com/. Acessado em 20/09/2013.

- QUINLAN, J. R. (1983). Learning efficient classification procedures and their application to chess end games. In: MICHALSKI, R. S.; CARBONELL, J. G.; MITCHELL, T. M. (Ed.). *Machine learning*. [S.l.]: Springer, (Symbolic Computation). p. 463–482.
- RONG, C.; WU, J. (2013). Railways debt crisis intervention and its relevance for railways reform in china. In: *Proceedings of the 13th World Conference on Transportation Research*. Rio de Janeiro, Brazil: WCTR Society.
- ROSE, J. M.; BLIEMER, M. C. J. (2008). *Stated preference experimental design strategies*. 2. ed. Oxford, UK: Elsevier Science.
- ROSE, J. M.; BLIEMER, M. C. J. (2013). Sample size requirements for stated choice experiments. *Transportation*, Springer, v. 40, n. 5, p. 1021–1041.
- SAELENMINDE, K. (1999). *Valuation of Non-Market Goods for Use in Cost-Benefit Analyses: Methodological Issues*. Tese (Doutorado) — Department of Economics and Social Sciences, Agricultural University of Norway.
- SAMANTA, S.; JHA, M. K. (2011). Modeling a rail transit alignment considering different objectives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, v. 45, n. 1, p. 31–45.
- SCHONFELD, P. et al. (2007). *Improved Alignment Optimization and Evaluation*. Maryland, USA.
- SCHOPPA, R. F. (2004). *150 anos do trem no Brasil*. Rio de Janeiro: Vianapole Design e Comunicação Ltda.
- SHMUELI, D.; SALOMON, I.; SHEFER, D. (1996). Neural network analysis of travel behavior: evaluating tools for prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Elsevier, v. 4, n. 3, p. 151–166.
- SPSS (2008). *SPSS Statistics for Windows*. Version 17.0. Chicago: SPSS Inc.
- STE-ENEFER (2001). *Estudo de reavaliação do modelo de estimativa da demanda de passageiros em ligações de transporte*. Brasília, DF: Secretaria Nacional de Transportes Terrestres. Não paginado.
- STEVENS, A. (2004). The application and limitations of cost-benefit assessment (cba) for intelligent transport systems. *Research in Transportation Economics*, Elsevier, v. 8, p. 91–111.
- STREET, D. J.; BUNCH, D. S.; MOORE, B. J. (2001). Optimal designs for 2 k paired comparison experiments. *Communications in Statistics-Theory and Methods*, Taylor & Francis, v. 30, n. 10, p. 2149–2171.
- STREET, D. J.; BURGESS, L. (2004). Optimal and near-optimal pairs for the estimation of effects in 2-level choice experiments. *Journal of Statistical Planning and Inference*, Elsevier, v. 118, n. 1, p. 185–199.
- STREET, D. J.; BURGESS, L.; LOUVIERE, J. J. (2005). Quick and easy choice sets: constructing optimal and nearly optimal stated choice experiments. *International Journal of Research in Marketing*, Elsevier, v. 22, n. 4, p. 459–470.
- SUN, X. S.; BRAUNER, E.; HORMBY, S. (1998). A large-scale neural network for airline forecasting in revenue management. In: *Operations Research in the Airline Industry*. [S.l.]: Springer. p. 46–67.

SURVEYMONKEY (2013). *Survey Monkey Surveys*. <https://pt.surveymonkey.com>. Acessado em 29/08/2013.

TARDIFF, T. J. (1976). A note on goodness-of-fit statistics for probit and logit models. *Transportation*, Springer, v. 5, n. 4, p. 377–388.

TAV (2014). *Trem de Alta Velocidade no Brasil*. http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/5448/Trem_de_Alta_Velocidade___TAV.html. Acesso em: 20/09/2014.

TAYLOR, J. et al. (2013). *Comparison of International Rail Fares and Ticketing*. [S.l.].

THEIL, H. (1971). *Principles of econometrics*. New York: Wiley.

THOMOPOULOS, N.; GRANT-MULLER, S.; TIGHT, M. R. (2009). Incorporating equity considerations in transport infrastructure evaluation: Current practice and a proposed methodology. *Evaluation and program planning*, Elsevier, v. 32, n. 4, p. 351–359.

TINTNER, G. (1965). *Elementos de econometria*. São Paulo: Pioneira.

TRIETSCH, D. (1987). A family of methods for preliminary highway alignment. *Transportation Science*, INFORMS, v. 21, n. 1, p. 17–25.

TRT (2008). *High Speed Rail: International Comparisons: Final Report*. [S.l.].

TSAMBOULAS, D. A. (2007). A tool for prioritizing multinational transport infrastructure investments. *Transport Policy*, Elsevier, v. 14, n. 1, p. 11–26.

TUDELA, A.; AKIKI, N.; CISTERNAS, R. (2006). Comparing the output of cost benefit and multi-criteria analysis: An application to urban transport investments. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, v. 40, n. 5, p. 414–423.

TUNALIOĞLU, N.; SOYCAN, M. (2011). An approach with distance-angle based search algorithm in route design for minimizing earthwork. *International Journal of Physical Sciences*, Academic Journals, v. 6, n. 23, p. 5442–5453.

TURRÓ, M.; INVERSIONES, B. E. de (2005). *Railpag: Railway Project Appraisal Guidelines*. [S.l.]: Office for Official Publications of the European Communities.

UIC (2010). *Relationship between rail service operating direct costs and speed*. <http://errac.uic.org/download.php/publication/527E.pdf>. Acesso em: 10/01/2015.

UIC (2011). *Freight transport growing across all regions of the world and passenger transport also records sustained growth due to growth in Asia*. http://www.uic.org/com/IMG/pdf/cp18_uic_stats_2010_en.pdf. Acesso em: 20/02/2013.

USGS (2014). *Earth Explorer*. <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acessado em 25/08/2014.

VAN ESSEN, H. et al. (2011). *External Costs of Transport in Europe*. Delft, Netherlands.

WANG, J. J. et al. (2012). The funding of hierarchical railway development in china. *Research in Transportation Economics*, Elsevier, v. 35, n. 1, p. 26–33.

- WEI, X. L. et al. (2007). Contrast research on od matrix estimation result with transcad software. *Highway*, v. 6, p. 122–128.
- WHITTEMORE, A. S. (1981). Sample size for logistic regression with small response probability. *Journal of the American Statistical Association*, Taylor & Francis Group, v. 76, n. 373, p. 27–32.
- WILLIAMS, A.; SUGDEN, R. (1988). *The principles of practical cost-benefit analysis*. [S.l.]: University Press.
- WILLIAMS, H. C. W. L. (1981). *Travel demand forecasting: an overview of theoretical developments*. Leeds, UK: School of Geography, University of Leeds.
- WILLIAMS, H. C. W. L.; SENIOR, M. L. (1977). Model-based transport policy assessment: 2. removing fundamental inconsistencies from models. *Traffic Engineering & Control*, v. 18, n. 10, p. 464–469.
- WILLIAMS, M. (1978). Factors affecting modal choice decisions in urban travel: some further evidence. *Transportation Research*, Elsevier, v. 12, n. 2, p. 91–96.
- WILSON, A. G. (1970). *Entropy in urban and regional modelling*. [S.l.]: Pion Ltd.
- WORSLEY, T. (2011). The evolution of london's crossrail scheme and the development of the department for transport's economic appraisal methods. In: *International Transport Forum*. [S.l.]: OECD Publishing.
- XIE, C.; LU, J.; PARKANY, E. (2003). Work travel mode choice modeling with data mining: decision trees and neural networks. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board, v. 1854, n. 1, p. 50–61.
- YEH, C. et al. (1999). Task oriented weighting in multi-criteria analysis. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 119, n. 1, p. 130–146.
- YUANQING, W. et al. (2010). Od matrix estimation for urban expressway. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 83–87.

Apêndices

APÊNDICE

Parâmetros para Estimativa de Investimentos em Traçados

A

PARÂMETRO DO ALGORITMO GENÉTICO	FONTE		
Grau de Não Uniformidade (<i>k</i>)	6,00		Jha et al. (2006)
Parâmetro de Troca (<i>q</i>)	0,25		Jha et al. (2006)
PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	HPT	HST	
Bitola (m)	1,435	1,435	–
Largura da plataforma com as 2 vias (m)	8,00	8,00	–
Largura da faixa de domínio (m)	24,00	24,00	
Aceleração Vertical (m/s ²)	0,1829	0,1829	AREMA (2003)
Distância entre Estacas (m)	90,00	90,00	–
Coefficiente de Rolamento	0,29	0,29	AREMA (2003)
Rampa Mínima (%)	-2,00	-2,00	–
Rampa Máxima (%)	2,00	2,00	–
Adendos sobre valor total (%)	10,0	10,0	–
Velocidade de Projeto (km/h)	150	300	–
Raio Mínimo Curvas Horizontais (m)	2.000,0	7.000,0	–
PARÂMETROS DE TERRAPLENAGEM	HPT	HST	
Ângulo de Aterro (graus)	45	45	–
Ângulo de Corte (graus)	45	45	–
PARÂMETROS DE VIADUTOS E TÚNEIS	HPT	HST	
Profundidade Máxima de Túneis (m)	40,0	40,0	–
Altura Máxima de Corte (m)	30,0	30,0	–
Altura Máxima de Pontes (m)	20,0	20,0	–
Altura Máxima de Aterro (m)	20,0	20,0	–
Comprimento Mínimo de Túneis e Pontes/Viadutos (m)	50,0	50,0	–
Comprimento Máximo de Túneis e Pontes/Viadutos (m)	200,0	200,0	–
Largura de Pontes (m)	8,00	8,00	–
Área da Seção do Túnel (m ²)	90,00	90,00	–
CUSTO UNITÁRIO DE SUPERESTRUTURA	HPT	HST	
Custo médio da Via (R\$/m)	1.556,0	4.221,0	TAV (2014)
CUSTOS DE TERRAPLENAGEM	HPT	HST	
Custo de Aterro (R\$/m ³)	2,71	2,71	TAV (2014)
Custo de Corte (R\$/m ³)	15,40	15,40	TAV (2014)
Fator de Empolamento	0,15	0,15	–
Custo de Transporte Bota-fora (R\$/m ³ ·km)	1,78	1,78	TAV (2014)
Custo de Transporte Empréstimo (R\$/m ³ ·km)	6,70	6,70	TAV (2014)
CUSTOS DE VIADUTOS E TÚNEIS	HPT	HST	
Custo de Abertura de Túneis (R\$/unid)	1.660.000,0	1.660.000,0	TAV (2014)
Custo de Construção de Túneis (R\$/m)	120.000,0	120.000,0	TAV (2014)
Custo de construção de Pontes/Viadutos (R\$/m ²)	4.745,0	4.745,0	TAV (2014)
CUSTOS DE DESAPROPRIAÇÃO	HPT	HST	
Custo de Desapropriação Área Urbana (R\$/m ²)	23,60	23,60	TAV (2014)
Custo de Desapropriação Área Rural (R\$/m ²)	6,90	6,90	TAV (2014)

Figura A.1 – Representação esquemática da seção transversal dos traçados ferroviários

APÊNDICE

B

Projeções do Número de Viagens

Tabela B.1 – Siglas e respectivos municípios sob influencia das estações consideradas na análise socioeconômica

Sigla	Municípios
PLU	Balhim, Barão de Cocais, Belo Horizonte, Belo Vale, Betim, Bonfim, Brumadinho, Caeté, Capim Branco, Confins, Contagem, Esmeraldas, Florestal, Fortuna de Minas, Funilândia, Ibirité, Igarapé, Inhaúma, Itabirito, Itaguara, Itatiaiuçu, Itaúna, Jaboticatubas, Juatuba, Lagoa Santa, Mário Campos, Mateus Leme, Matozinhos, Moeda, Nova Lima, Nova União, Pará de Minas, Pedro Leopoldo, Prudente de Morais, Raposos, Ribeirão das Neves, Rio Acima, Rio Manso, Sabará, Santa Bárbara, Santa Luzia, São Joaquim de Bicas, São José da Lapa, São José da Varginha, Sarzedo, Sete Lagoas, Taquaraçu de Minas, Vespasiano
VCP	Americana, Artur Nogueira, Campinas, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Holambra, Hortolândia, Indaiatuba, Itatiba, Jaguariúna, Monte Mor, Nova Odessa, Paulínia, Pedreira, Santa Bárbara d'Oeste, Santo Antônio de Posse, Sumaré, Valinhos, Vinhedo
SDU	Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Maricá, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Queimados, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica, Tanguá,
CGH	Arujá, Barueri, Biritiba-Mirim, Caieiras, Cajamar, Carapicuíba, Cotia, Diadema, Embu, Embu-Guaçu, Ferraz de Vasconcelos, Francisco Morato, Franco da Rocha, Guararema, Guarulhos, Itapeverica da Serra, Itapevi, Itaquaquecetuba, Jandira, Juquitiba, Mairiporã, Mauá, Mogi das Cruzes, Osasco, Pirapora do Bom Jesus, Poá, Ribeirão Pires, Rio Grande da Serra, Salesópolis, Santa Isabel, Santana de Parnaíba, Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul, São Lourenço da Serra, São Paulo, Suzano, Taboão da Serra, Vargem Grande Paulista
VIX	Cariacica, Fundão, Guarapari, Serra, Viana, Vila Velha, Vitória
UDI	Uberlândia
UBA	Uberaba
RAO	Ribeirão Preto
SJP	São José do Rio Preto
JDF	Juiz de Fora
MOC	Montes Claros

Tabela B.2 – Projeções do número de viagens pelo modo Ônibus (2015 – 2032)

O	D	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
CGH	JDF	53.423	55.745	57.999	60.137	62.306	64.581	66.923	69.285	71.739	74.245	77.047	79.692	82.399	85.077	87.812	90.533	93.261	96.049
CGH	MOC	22.785	23.778	24.741	25.655	26.582	27.554	28.554	29.564	30.612	31.683	32.880	34.010	35.167	36.312	37.480	38.643	39.808	40.999
CGH	PLU	1801055	1842995	1884235	1924178	1964657	2006584	2049498	2092812	2137418	2182827	2232045	2279490	2327863	2376052	2425102	2474154	2523467	2573691
CGH	RAO	35.109	35.422	35.738	36.057	36.378	36.703	37.030	37.361	37.694	38.030	38.369	38.712	39.057	39.405	39.757	40.112	40.469	40.831
CGH	SDU	3.869.984	3.951.838	4.032.558	4.111.096	4.190.674	4.272.897	4.356.952	4.441.812	4.529.046	4.617.794	4.713.341	4.805.878	4.900.154	4.994.214	5.089.897	5.185.694	5.282.063	5.380.145
CGH	SJP	30.563	30.835	31.111	31.388	31.668	31.951	32.236	32.523	32.813	33.106	33.401	33.699	34.000	34.303	34.609	34.918	35.230	35.544
CGH	UBA	45.492	47.504	49.457	51.307	53.184	55.153	57.179	59.223	61.346	63.515	65.940	68.228	70.570	72.886	75.251	77.604	79.962	82.372
CGH	UDI	58.085	60.654	63.147	65.509	67.906	70.419	73.007	75.616	78.327	81.095	84.191	87.113	90.103	93.060	96.080	99.083	102.095	105.171
CGH	VIX	358.404	365.225	371.978	378.585	385.280	392.178	399.220	406.333	413.630	421.049	428.972	436.691	444.548	452.402	460.387	468.393	476.454	484.652
JDF	VCP	14.242	14.864	15.468	16.041	16.622	17.231	17.858	18.491	19.148	19.819	20.570	21.278	22.003	22.720	23.452	24.181	24.911	25.657
JDF	VIX	44.565	46.479	48.338	50.102	51.892	53.768	55.700	57.649	59.674	61.742	64.052	66.235	68.469	70.679	72.936	75.182	77.435	79.736
PLU	JDF	76.691	77.376	78.066	78.762	79.465	80.174	80.889	81.611	82.339	83.073	83.814	84.562	85.316	86.078	86.846	87.620	88.402	89.191
PLU	MOC	16.914	17.064	17.217	17.370	17.525	17.682	17.839	17.999	18.159	18.321	18.485	18.649	18.816	18.984	19.153	19.324	19.496	19.670
PLU	RAO	24.362	25.467	26.538	27.553	28.582	29.660	30.771	31.891	33.054	34.242	35.571	36.824	38.106	39.374	40.668	41.956	43.246	44.564
PLU	SJP	14.143	14.779	15.396	15.980	16.573	17.194	17.834	18.479	19.149	19.834	20.599	21.322	22.061	22.791	23.537	24.279	25.023	25.783
PLU	UBA	15.755	15.895	16.037	16.180	16.324	16.470	16.617	16.765	16.915	17.066	17.218	17.371	17.526	17.683	17.841	18.000	18.160	18.322
PLU	UDI	20.265	20.446	20.629	20.813	20.998	21.186	21.375	21.565	21.758	21.952	22.148	22.345	22.545	22.746	22.949	23.153	23.360	23.568
PLU	VCP	31.693	33.118	34.501	35.810	37.138	38.531	39.965	41.410	42.912	44.446	46.162	47.780	49.436	51.074	52.745	54.408	56.075	57.778
PLU	VIX	356.492	363.393	370.219	376.892	383.652	390.621	397.738	404.924	412.300	419.799	427.818	435.623	443.568	451.508	459.581	467.672	475.818	484.103
RAO	JDF	8.789	9.176	9.552	9.908	10.270	10.649	11.039	11.432	11.841	12.258	12.725	13.165	13.616	14.062	14.517	14.970	15.424	15.887
RAO	MOC	5.356	5.593	5.822	6.040	6.260	6.492	6.730	6.970	7.219	7.474	7.759	8.028	8.303	8.575	8.853	9.130	9.407	9.690
RAO	SJP	10.888	10.986	11.084	11.183	11.282	11.383	11.484	11.587	11.690	11.795	11.900	12.006	12.113	12.221	12.330	12.440	12.551	12.663
RAO	UDI	20.937	21.875	22.786	23.648	24.523	25.440	26.384	27.336	28.325	29.335	30.465	31.530	32.621	33.699	34.800	35.895	36.993	38.114
SDU	JDF	264.280	275.614	286.622	297.069	307.672	318.787	330.232	341.777	353.771	366.021	379.711	392.641	405.875	418.973	432.346	445.653	458.997	472.633
SDU	MOC	17.664	18.431	19.175	19.880	20.596	21.347	22.120	22.900	23.710	24.537	25.462	26.335	27.229	28.113	29.016	29.914	30.815	31.735
SDU	PLU	1.524.552	1.549.014	1.573.374	1.597.440	1.621.807	1.646.773	1.672.189	1.697.866	1.724.096	1.750.720	1.778.714	1.806.273	1.834.272	1.862.354	1.890.859	1.919.510	1.948.392	1.977.718
SDU	RAO	34.574	36.149	37.676	39.122	40.588	42.125	43.707	45.303	46.960	48.652	50.546	52.332	54.159	55.965	57.809	59.643	61.481	63.359
SDU	SJP	22.983	24.021	25.028	25.981	26.949	27.963	29.007	30.059	31.153	32.269	33.519	34.697	35.903	37.095	38.312	39.522	40.735	41.975
SDU	UBA	19.353	20.206	21.033	21.818	22.613	23.448	24.307	25.173	26.073	26.993	28.021	28.991	29.984	30.966	31.968	32.966	33.966	34.988
SDU	UDI	26.476	27.642	28.774	29.847	30.935	32.077	33.252	34.437	35.669	36.926	38.332	39.659	41.018	42.361	43.733	45.098	46.466	47.863
SDU	VCP	185.895	194.144	202.148	209.732	217.425	225.492	233.797	242.172	250.872	259.757	269.694	279.070	288.664	298.154	307.843	317.481	327.142	337.013
SDU	VIX	622.760	636.328	649.698	662.689	675.853	689.466	703.388	717.444	731.901	746.614	762.488	777.840	793.485	809.086	824.961	840.849	856.829	873.097
SJP	UDI	15.982	16.692	17.381	18.034	18.697	19.391	20.107	20.828	21.577	22.342	23.198	24.005	24.831	25.649	26.483	27.313	28.145	28.995
UBA	MOC	8.109	8.182	8.255	8.328	8.402	8.477	8.553	8.629	8.706	8.784	8.862	8.941	9.021	9.102	9.183	9.265	9.347	9.431
UBA	RAO	21.083	22.028	22.945	23.813	24.694	25.618	26.569	27.527	28.523	29.540	30.678	31.751	32.849	33.935	35.044	36.147	37.252	38.381
UBA	SJP	12.831	13.401	13.955	14.479	15.011	15.569	16.143	16.722	17.324	17.938	18.625	19.273	19.937	20.593	21.263	21.929	22.597	23.280
UBA	VCP	15.671	16.368	17.044	17.684	18.334	19.015	19.717	20.424	21.158	21.909	22.748	23.540	24.350	25.151	25.970	26.784	27.599	28.433
UDI	JDF	11.824	11.930	12.036	12.144	12.252	12.361	12.472	12.583	12.695	12.808	12.923	13.038	13.154	13.272	13.390	13.509	13.630	13.751
UDI	UBA	9.716	9.803	9.890	9.979	10.068	10.157	10.248	10.339	10.432	10.525	10.619	10.713	10.809	10.905	11.003	11.101	11.200	11.300
VCP	CGH	308.456	311.208	313.984	316.785	319.611	322.462	325.339	328.241	331.170	334.124	337.105	340.112	343.146	346.208	349.296	352.412	355.556	358.728
VCP	RAO	15.350	15.487	15.626	15.765	15.906	16.048	16.191	16.335	16.481	16.628	16.776	16.926	17.077	17.229	17.383	17.538	17.694	17.852
VCP	SJP	13.363	13.482	13.602	13.724	13.846	13.970	14.094	14.220	14.347	14.475	14.604	14.734	14.866	14.998	15.132	15.267	15.403	15.541
VCP	UDI	77.452	80.894	84.234	87.399	90.610	93.976	97.443	100.937	104.569	108.276	112.424	116.337	120.341	124.302	128.345	132.367	136.399	140.519
VCP	VIX	11.808	12.355	12.884	13.385	13.893	14.426	14.974	15.527	16.101	16.687	17.343	17.962	18.594	19.220	19.858	20.493	21.129	21.779

Tabela B.3 – Projeções do número de viagens pelo modo Ônibus (2033 – 2050)

O	D	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
CGH	JDF	98.796	101.593	104.344	107.131	109.934	112.737	115.542	118.395	121.341	124.300	127.271	130.281	133.267	136.264	139.312	142.368	145.448	148.549
CGH	MOC	42.173	43.368	44.543	45.734	46.932	48.129	49.327	50.546	51.805	53.069	54.338	55.624	56.900	58.180	59.482	60.788	62.103	63.428
CGH	PLU	2623603	2674294	2724614	2775567	2826900	2878416	2930155	2982689	3036559	3090799	3145382	3200661	3255844	3311376	3367746	3424435	3481630	3539316
CGH	RAO	41.195	41.562	41.933	42.307	42.685	43.065	43.450	43.837	44.228	44.623	45.021	45.423	45.828	46.237	46.649	47.065	47.485	47.909
CGH	SDU	5.477.792	5.576.925	5.675.522	5.775.350	5.875.365	5.977.023	6.078.595	6.181.688	6.287.253	6.393.598	6.500.670	6.609.096	6.717.485	6.826.619	6.937.359	7.048.795	7.161.257	7.274.721
CGH	SJP	35.861	36.181	36.504	36.829	37.158	37.489	37.824	38.161	38.502	38.845	39.192	39.541	39.894	40.250	40.609	40.971	41.337	41.706
CGH	UBA	84.747	87.164	89.541	91.949	94.371	96.791	99.214	101.678	104.222	106.778	109.344	111.944	114.522	117.109	119.741	122.379	125.037	127.714
CGH	UDI	108.203	111.289	114.324	117.399	120.490	123.581	126.674	129.820	133.068	136.332	139.607	142.927	146.218	149.522	152.881	156.250	159.644	163.062
CGH	VIX	492.831	501.132	509.407	517.784	526.233	534.727	543.272	551.942	560.805	569.739	578.740	587.854	596.980	606.175	615.501	624.893	634.375	643.945
JDF	VCP	26.393	27.141	27.878	28.624	29.374	30.124	30.875	31.639	32.427	33.219	34.014	34.820	35.619	36.421	37.236	38.054	38.878	39.708
JDF	VIX	82.005	84.314	86.586	88.888	91.203	93.518	95.835	98.192	100.625	103.070	105.524	108.011	110.478	112.955	115.473	117.998	120.543	123.106
PLU	JDF	89.986	90.789	91.599	92.416	93.241	94.072	94.912	95.758	96.613	97.475	98.344	99.221	100.107	101.000	101.901	102.810	103.727	104.652
PLU	MOC	19.846	20.023	20.201	20.382	20.563	20.747	20.932	21.119	21.307	21.497	21.689	21.882	22.078	22.275	22.473	22.674	22.876	23.080
PLU	RAO	45.862	47.184	48.483	49.799	51.123	52.445	53.768	55.115	56.505	57.901	59.302	60.722	62.130	63.542	64.979	66.419	67.870	69.331
PLU	SJP	26.532	27.294	28.043	28.802	29.565	30.328	31.091	31.867	32.669	33.474	34.282	35.101	35.913	36.728	37.557	38.388	39.225	40.068
PLU	UBA	18.486	18.651	18.817	18.985	19.154	19.325	19.498	19.672	19.847	20.024	20.203	20.383	20.565	20.748	20.933	21.120	21.308	21.499
PLU	UDI	23.779	23.991	24.205	24.421	24.639	24.858	25.080	25.304	25.530	25.757	25.987	26.219	26.453	26.689	26.927	27.167	27.410	27.654
PLU	VCP	59.455	61.163	62.842	64.543	66.253	67.962	69.672	71.412	73.208	75.013	76.824	78.659	80.479	82.305	84.162	86.024	87.900	89.789
PLU	VIX	492.366	500.752	509.109	517.570	526.101	534.677	543.303	552.055	561.004	570.025	579.112	588.313	597.523	606.802	616.214	625.691	635.259	644.914
RAO	JDF	16.344	16.810	17.267	17.731	18.197	18.663	19.129	19.603	20.093	20.585	21.079	21.579	22.076	22.574	23.080	23.588	24.100	24.615
RAO	MOC	9.969	10.253	10.532	10.815	11.099	11.384	11.669	11.958	12.257	12.557	12.859	13.164	13.467	13.771	14.080	14.390	14.703	15.017
RAO	SJP	12.776	12.890	13.005	13.121	13.238	13.356	13.475	13.596	13.717	13.839	13.963	14.087	14.213	14.340	14.468	14.597	14.727	14.858
RAO	UDI	39.219	40.344	41.449	42.570	43.696	44.822	45.948	47.094	48.278	49.466	50.659	51.868	53.067	54.269	55.493	56.719	57.955	59.199
SDU	JDF	486.076	499.757	513.220	526.861	540.580	554.296	568.025	581.992	596.411	610.898	625.441	640.179	654.798	669.473	684.397	699.362	714.442	729.630
SDU	MOC	32.642	33.566	34.474	35.394	36.320	37.245	38.171	39.113	40.086	41.063	42.044	43.038	44.024	45.014	46.020	47.029	48.046	49.070
SDU	PLU	2.007.094	2.036.875	2.066.690	2.096.866	2.127.324	2.158.000	2.188.910	2.220.242	2.252.170	2.284.385	2.316.881	2.349.774	2.382.809	2.416.133	2.449.904	2.483.959	2.518.359	2.553.102
SDU	RAO	65.208	67.091	68.941	70.816	72.701	74.584	76.469	78.386	80.366	82.354	84.350	86.372	88.376	90.388	92.434	94.485	96.551	98.632
SDU	SJP	43.196	44.439	45.661	46.899	48.143	49.387	50.632	51.898	53.205	54.519	55.837	57.172	58.496	59.825	61.177	62.531	63.896	65.271
SDU	UBA	35.995	37.020	38.028	39.049	40.076	41.103	42.130	43.175	44.255	45.339	46.427	47.529	48.623	49.721	50.837	51.956	53.083	54.219
SDU	UDI	49.241	50.643	52.022	53.419	54.824	56.228	57.634	59.064	60.540	62.023	63.511	65.020	66.516	68.017	69.544	71.075	72.617	74.171
SDU	VCP	346.741	356.640	366.376	376.240	386.158	396.072	405.994	416.086	426.507	436.975	447.482	458.129	468.687	479.284	490.060	500.864	511.750	522.713
SDU	VIX	889.284	905.720	922.057	938.598	955.268	972.007	988.827	1.005.902	1.023.394	1.041.013	1.058.749	1.076.711	1.094.658	1.112.725	1.131.061	1.149.509	1.168.124	1.186.904
SJP	UDI	29.833	30.685	31.524	32.373	33.227	34.081	34.935	35.804	36.701	37.603	38.508	39.424	40.333	41.246	42.174	43.104	44.041	44.985
UBA	MOC	9.515	9.600	9.685	9.772	9.859	9.947	10.036	10.125	10.216	10.307	10.399	10.491	10.585	10.679	10.775	10.871	10.968	11.066
UBA	RAO	39.494	40.626	41.740	42.868	44.002	45.136	46.271	47.425	48.616	49.813	51.014	52.232	53.439	54.650	55.882	57.117	58.362	59.615
UBA	SJP	23.952	24.637	25.310	25.992	26.677	27.363	28.049	28.747	29.467	30.191	30.917	31.653	32.383	33.116	33.861	34.608	35.360	36.118
UBA	VCP	29.254	30.090	30.913	31.746	32.583	33.420	34.258	35.110	35.990	36.874	37.761	38.660	39.552	40.447	41.356	42.269	43.188	44.113
UDI	JDF	13.874	13.998	14.123	14.249	14.376	14.504	14.634	14.764	14.896	15.029	15.163	15.298	15.435	15.572	15.711	15.851	15.993	16.135
UDI	UBA	11.401	11.502	11.605	11.708	11.813	11.918	12.025	12.132	12.240	12.349	12.459	12.571	12.683	12.796	12.910	13.025	13.141	13.259
VCP	CGH	361.928	365.157	368.415	371.701	375.017	378.363	381.738	385.144	388.580	392.046	395.544	399.073	402.633	406.225	409.849	413.505	417.194	420.916
VCP	RAO	18.012	18.172	18.334	18.498	18.663	18.829	18.997	19.167	19.338	19.510	19.684	19.860	20.037	20.216	20.396	20.578	20.762	20.947
VCP	SJP	15.680	15.819	15.961	16.103	16.247	16.392	16.538	16.685	16.834	16.984	17.136	17.289	17.443	17.599	17.756	17.914	18.074	18.235
VCP	UDI	144.579	148.710	152.773	156.889	161.028	165.165	169.305	173.517	177.866	182.234	186.619	191.062	195.468	199.890	204.386	208.895	213.437	218.012
VCP	VIX	22.419	23.070	23.710	24.359	25.011	25.662	26.314	26.977	27.661	28.349	29.039	29.738	30.431	31.126	31.833	32.542	33.256	33.976

Tabela B.4 – Projeções do número de viagens pelo modo Automóvel (2015 – 2032)

O	D	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
CGH	JDF	18.385	18.981	19.550	20.071	20.606	21.184	21.788	22.399	23.046	23.714	24.500	25.224	25.976	26.722	27.497	28.274	29.063	29.887
CGH	MOC	11.638	12.027	12.398	12.738	13.087	13.463	13.855	14.252	14.672	15.104	15.612	16.080	16.566	17.048	17.548	18.049	18.558	19.088
CGH	PLU	578.926	599.128	618.062	635.131	652.279	670.429	689.077	707.617	726.944	746.560	769.423	790.038	811.086	831.510	852.340	872.769	893.069	913.870
CGH	RAO	79.130	81.240	83.274	85.163	87.118	89.238	91.465	93.731	96.135	98.624	101.521	104.237	107.068	109.904	112.863	115.861	118.934	122.155
CGH	SDU	830.687	853.093	874.400	893.892	913.711	934.895	956.874	978.960	1.002.173	1.025.952	1.053.730	1.079.167	1.105.367	1.131.104	1.157.585	1.183.872	1.210.285	1.237.583
CGH	SJP	54.757	56.231	57.652	58.973	60.340	61.819	63.372	64.951	66.625	68.357	70.371	72.260	74.227	76.199	78.254	80.336	82.470	84.705
CGH	UBA	18.716	19.338	19.931	20.474	21.030	21.630	22.258	22.893	23.565	24.258	25.073	25.825	26.604	27.377	28.180	28.985	29.802	30.655
CGH	UDI	20.437	21.098	21.729	22.304	22.896	23.536	24.206	24.884	25.603	26.345	27.220	28.026	28.863	29.693	30.555	31.420	32.299	33.218
CGH	VIX	188.238	194.875	201.073	206.646	212.211	218.064	224.045	229.963	236.101	242.301	249.495	255.943	262.490	268.800	275.195	281.419	287.554	293.796
JDF	VCP	9.867	10.195	10.507	10.794	11.087	11.403	11.734	12.068	12.421	12.786	13.214	13.609	14.019	14.425	14.847	15.269	15.699	16.147
JDF	VIX	41.070	42.402	43.674	44.841	46.037	47.329	48.679	50.044	51.488	52.977	54.726	56.341	58.016	59.678	61.403	63.133	64.890	66.723
PLU	JDF	130.954	134.227	137.401	140.367	143.445	146.785	150.298	153.881	157.684	161.628	166.210	170.521	175.017	179.530	184.239	189.017	193.918	199.055
PLU	MOC	21.815	22.382	22.932	23.445	23.977	24.552	25.155	25.770	26.421	27.096	27.877	28.613	29.379	30.147	30.948	31.760	32.592	33.464
PLU	RAO	10.724	11.078	11.414	11.721	12.036	12.377	12.734	13.095	13.478	13.873	14.340	14.770	15.216	15.658	16.117	16.578	17.046	17.536
PLU	SJP	7.842	8.102	8.348	8.574	8.805	9.055	9.317	9.582	9.863	10.152	10.494	10.809	11.135	11.459	11.795	12.132	12.475	12.832
PLU	UBA	21.696	22.251	22.787	23.288	23.807	24.369	24.961	25.564	26.204	26.867	27.638	28.363	29.118	29.876	30.667	31.469	32.291	33.153
PLU	UDI	26.398	27.048	27.678	28.265	28.876	29.541	30.241	30.955	31.715	32.503	33.422	34.286	35.187	36.091	37.036	37.995	38.979	40.011
PLU	VCP	12.461	12.867	13.253	13.604	13.966	14.358	14.768	15.183	15.623	16.078	16.615	17.109	17.623	18.131	18.660	19.191	19.730	20.294
PLU	VIX	132.768	138.964	144.781	150.034	155.305	160.876	166.593	172.270	178.179	184.166	191.139	197.405	203.785	209.949	216.212	222.322	228.360	234.518
RAO	JDF	7.512	7.765	8.006	8.226	8.452	8.696	8.950	9.208	9.479	9.760	10.089	10.393	10.708	11.020	11.344	11.669	11.998	12.342
RAO	MOC	5.804	6.004	6.196	6.372	6.551	6.745	6.946	7.150	7.365	7.586	7.846	8.086	8.334	8.580	8.835	9.091	9.350	9.620
RAO	SJP	26.304	27.040	27.748	28.405	29.084	29.817	30.585	31.365	32.191	33.044	34.035	34.964	35.930	36.898	37.906	38.927	39.972	41.066
RAO	UDI	12.938	13.372	13.785	14.163	14.550	14.968	15.406	15.848	16.316	16.798	17.366	17.890	18.433	18.971	19.530	20.090	20.659	21.253
SDU	JDF	104.371	107.793	111.062	114.062	117.136	120.450	123.912	127.411	131.112	134.926	139.401	143.534	147.822	152.074	156.485	160.909	165.402	170.086
SDU	MOC	10.169	10.511	10.838	11.138	11.444	11.775	12.120	12.468	12.837	13.217	13.662	14.073	14.499	14.922	15.360	15.799	16.245	16.710
SDU	PLU	318.832	330.144	340.711	350.213	359.715	369.724	379.966	390.112	400.648	411.303	423.687	434.799	446.100	457.010	468.087	478.890	489.564	500.448
SDU	RAO	15.035	15.549	16.038	16.484	16.941	17.435	17.952	18.473	19.025	19.594	20.265	20.882	21.522	22.156	22.815	23.475	24.145	24.844
SDU	SJP	11.858	12.265	12.652	13.005	13.367	13.758	14.167	14.579	15.015	15.465	15.994	16.481	16.987	17.488	18.007	18.528	19.057	19.609
SDU	UBA	11.699	12.091	12.464	12.806	13.156	13.533	13.928	14.327	14.749	15.184	15.696	16.167	16.657	17.142	17.645	18.150	18.662	19.197
SDU	UDI	13.276	13.709	14.121	14.498	14.885	15.304	15.742	16.185	16.654	17.138	17.709	18.235	18.780	19.322	19.884	20.447	21.020	21.619
SDU	VCP	69.718	71.973	74.121	76.085	78.101	80.283	82.567	84.878	87.326	89.853	92.833	95.578	98.429	101.256	104.193	107.140	110.135	113.262
SDU	VIX	203.900	210.963	217.609	223.621	229.687	236.133	242.779	249.412	256.348	263.414	271.661	279.141	286.807	294.286	301.946	309.504	317.055	324.830
SJP	UDI	11.022	11.394	11.747	12.070	12.402	12.759	13.133	13.511	13.910	14.322	14.806	15.253	15.716	16.175	16.651	17.129	17.614	18.120
UBA	MOC	10.137	10.418	10.691	10.946	11.208	11.490	11.785	12.085	12.401	12.728	13.104	13.458	13.827	14.196	14.580	14.969	15.367	15.782
UBA	RAO	13.633	14.102	14.549	14.958	15.377	15.828	16.299	16.775	17.278	17.797	18.406	18.967	19.549	20.126	20.724	21.324	21.932	22.567
UBA	SJP	10.235	10.589	10.926	11.234	11.550	11.890	12.244	12.603	12.981	13.371	13.829	14.251	14.688	15.122	15.571	16.022	16.479	16.955
UBA	VCP	11.591	11.985	12.360	12.703	13.055	13.435	13.831	14.231	14.654	15.091	15.603	16.076	16.566	17.052	17.556	18.061	18.574	19.109
UDI	JDF	13.921	14.281	14.629	14.956	15.293	15.658	16.040	16.430	16.843	17.270	17.765	18.231	18.716	19.203	19.710	20.225	20.752	21.304
UDI	UBA	36.039	36.989	37.909	38.768	39.657	40.617	41.623	42.648	43.733	44.856	46.156	47.379	48.653	49.931	51.262	52.611	53.994	55.441
VCP	CGH	1.269.035	1.301.359	1.332.627	1.361.753	1.391.972	1.424.784	1.459.294	1.494.467	1.531.811	1.570.521	1.615.574	1.657.893	1.702.020	1.746.290	1.792.488	1.839.353	1.887.412	1.937.804
VCP	RAO	39.335	40.412	41.449	42.412	43.407	44.484	45.613	46.761	47.978	49.237	50.700	52.071	53.500	54.930	56.421	57.932	59.479	61.099
VCP	SJP	25.690	26.400	27.084	27.719	28.376	29.085	29.828	30.583	31.383	32.210	33.169	34.069	35.006	35.945	36.922	37.912	38.926	39.987
VCP	UDI	49.705	51.351	52.919	54.352	55.822	57.411	59.072	60.752	62.531	64.365	66.526	68.517	70.584	72.632	74.759	76.892	79.060	81.322
VCP	VIX	9.789	10.119	10.432	10.717	11.010	11.328	11.660	11.995	12.351	12.718	13.152	13.551	13.965	14.375	14.801	15.229	15.663	16.117

Tabela B.5 – Projeções do número de viagens pelo modo Automóvel (2033 – 2050)

O	D	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
CGH	JDF	30.708	31.562	32.413	33.295	34.199	35.122	36.064	37.045	38.082	39.147	40.240	41.374	42.524	43.705	44.935	46.200	47.507	48.859
CGH	MOC	19.617	20.165	20.712	21.278	21.858	22.449	23.053	23.680	24.344	25.024	25.722	26.445	27.178	27.930	28.713	29.517	30.348	31.205
CGH	PLU	934.046	954.631	974.571	994.811	1.015.130	1.035.363	1.055.558	1.076.241	1.097.902	1.119.688	1.141.593	1.163.946	1.186.062	1.208.353	1.231.270	1.254.384	1.277.887	1.301.796
CGH	RAO	125.407	128.806	132.240	135.817	139.517	143.324	147.247	151.348	155.688	160.175	164.815	169.652	174.609	179.740	185.106	190.664	196.446	202.462
CGH	SDU	1.264.429	1.292.061	1.319.218	1.347.035	1.375.253	1.403.673	1.432.355	1.461.945	1.493.056	1.524.648	1.556.719	1.589.684	1.622.691	1.656.256	1.690.957	1.726.261	1.762.420	1.799.467
CGH	SJP	86.961	89.318	91.699	94.178	96.741	99.377	102.092	104.930	107.931	111.034	114.241	117.582	121.005	124.547	128.249	132.082	136.067	140.212
CGH	UBA	31.505	32.389	33.269	34.181	35.117	36.070	37.045	38.059	39.132	40.233	41.363	42.535	43.724	44.945	46.217	47.525	48.877	50.274
CGH	UDI	34.133	35.086	36.036	37.021	38.031	39.063	40.117	41.215	42.377	43.571	44.797	46.070	47.361	48.689	50.073	51.497	52.970	54.495
CGH	VIX	299.789	305.856	311.665	317.511	323.322	329.046	334.696	340.436	346.413	352.362	358.277	364.258	370.093	375.907	381.834	387.739	393.678	399.651
JDF	VCP	16.593	17.057	17.519	17.997	18.488	18.988	19.498	20.029	20.591	21.168	21.759	22.372	22.994	23.632	24.297	24.979	25.685	26.414
JDF	VIX	68.549	70.448	72.340	74.297	76.305	78.352	80.441	82.615	84.913	87.270	89.688	92.195	94.735	97.343	100.058	102.847	105.728	108.703
PLU	JDF	204.248	209.675	215.165	220.881	226.794	232.880	239.152	245.708	252.640	259.808	267.219	274.941	282.856	291.046	299.607	308.471	317.687	327.273
PLU	MOC	34.343	35.262	36.190	37.156	38.154	39.181	40.238	41.342	42.508	43.713	44.958	46.254	47.582	48.954	50.388	51.871	53.412	55.013
PLU	RAO	18.023	18.531	19.037	19.562	20.101	20.650	21.213	21.798	22.419	23.056	23.711	24.391	25.081	25.792	26.532	27.294	28.083	28.900
PLU	SJP	13.189	13.560	13.930	14.313	14.707	15.108	15.518	15.946	16.398	16.863	17.340	17.835	18.338	18.856	19.394	19.948	20.521	21.115
PLU	UBA	34.023	34.933	35.853	36.812	37.802	38.822	39.873	40.971	42.133	43.334	44.576	45.870	47.196	48.558	50.003	51.488	53.032	54.639
PLU	UDI	41.055	42.148	43.253	44.404	45.597	46.824	48.091	49.415	50.817	52.267	53.768	55.333	56.937	58.599	60.338	62.140	64.014	65.966
PLU	VCP	20.856	21.441	22.024	22.629	23.250	23.884	24.532	25.208	25.923	26.658	27.414	28.198	28.994	29.813	30.667	31.547	32.457	33.399
PLU	VIX	240.444	246.457	252.230	258.052	263.853	269.582	275.251	281.021	287.040	293.044	299.029	305.095	311.030	316.959	323.016	329.068	335.171	341.326
RAO	JDF	12.685	13.041	13.396	13.763	14.139	14.523	14.915	15.322	15.753	16.195	16.649	17.119	17.596	18.085	18.595	19.119	19.660	20.219
RAO	MOC	9.889	10.168	10.447	10.734	11.029	11.329	11.635	11.953	12.289	12.634	12.988	13.354	13.725	14.105	14.501	14.907	15.327	15.760
RAO	SJP	42.169	43.322	44.485	45.695	46.945	48.230	49.554	50.936	52.398	53.908	55.468	57.092	58.756	60.477	62.275	64.135	66.069	68.079
RAO	UDI	21.845	22.460	23.073	23.708	24.360	25.025	25.703	26.410	27.158	27.927	28.715	29.533	30.362	31.215	32.103	33.017	33.961	34.938
SDU	JDF	174.752	179.601	184.433	189.431	194.556	199.779	205.109	210.653	216.513	222.523	228.685	235.071	241.542	248.184	255.096	262.194	269.522	277.091
SDU	MOC	17.172	17.653	18.132	18.627	19.135	19.652	20.179	20.728	21.308	21.902	22.512	23.143	23.783	24.439	25.122	25.823	26.547	27.295
SDU	PLU	510.928	521.562	531.780	542.091	552.372	562.534	572.602	582.856	593.557	604.244	614.911	625.732	636.339	646.949	657.800	668.658	679.622	690.696
SDU	RAO	25.541	26.266	26.988	27.736	28.503	29.285	30.085	30.917	31.798	32.702	33.631	34.594	35.571	36.575	37.622	38.698	39.811	40.962
SDU	SJP	20.159	20.730	21.299	21.888	22.492	23.108	23.737	24.392	25.085	25.796	26.526	27.283	28.050	28.838	29.660	30.504	31.376	32.278
SDU	UBA	19.729	20.283	20.835	21.405	21.991	22.588	23.197	23.832	24.502	25.191	25.897	26.629	27.371	28.133	28.927	29.743	30.586	31.457
SDU	UDI	22.215	22.835	23.454	24.094	24.751	25.422	26.107	26.821	27.576	28.352	29.148	29.974	30.812	31.674	32.572	33.495	34.449	35.437
SDU	VCP	116.380	119.625	122.861	126.212	129.654	133.165	136.754	140.492	144.450	148.514	152.688	157.019	161.414	165.933	170.644	175.489	180.501	185.687
SDU	VIX	332.426	340.215	347.822	355.584	363.425	371.287	379.188	387.318	395.857	404.498	413.241	422.207	431.147	440.212	449.570	459.066	468.773	478.699
SJP	UDI	18.624	19.148	19.671	20.211	20.765	21.331	21.908	22.509	23.144	23.797	24.466	25.160	25.864	26.587	27.340	28.114	28.913	29.740
UBA	MOC	16.202	16.638	17.079	17.536	18.009	18.493	18.992	19.511	20.059	20.624	21.208	21.814	22.433	23.073	23.740	24.429	25.143	25.884
UBA	RAO	23.199	23.856	24.510	25.187	25.881	26.588	27.310	28.061	28.855	29.671	30.507	31.373	32.252	33.154	34.093	35.059	36.056	37.086
UBA	SJP	17.430	17.923	18.413	18.921	19.441	19.971	20.512	21.075	21.670	22.280	22.905	23.553	24.210	24.884	25.586	26.306	27.051	27.819
UBA	VCP	19.642	20.196	20.747	21.318	21.903	22.500	23.109	23.743	24.413	25.101	25.807	26.538	27.279	28.041	28.833	29.648	30.490	31.360
UDI	JDF	21.862	22.444	23.033	23.645	24.278	24.928	25.598	26.298	27.037	27.800	28.589	29.410	30.251	31.120	32.028	32.967	33.943	34.956
UDI	UBA	56.902	58.427	59.968	61.571	63.228	64.931	66.685	68.517	70.452	72.451	74.516	76.665	78.867	81.143	83.520	85.978	88.532	91.186
VCP	CGH	1.988.722	2.041.960	2.095.796	2.151.872	2.209.882	2.269.604	2.331.163	2.395.521	2.463.611	2.534.031	2.606.859	2.682.764	2.760.588	2.841.147	2.925.383	3.012.637	3.103.392	3.197.830
VCP	RAO	62.735	64.443	66.169	67.965	69.821	71.731	73.698	75.754	77.928	80.175	82.498	84.918	87.438	89.964	92.646	95.422	98.309	101.312
VCP	SJP	41.058	42.176	43.306	44.480	45.694	46.942	48.227	49.570	50.989	52.455	53.971	55.549	57.165	58.836	60.583	62.390	64.268	66.221
VCP	UDI	83.576	85.921	88.258	90.678	93.162	95.695	98.283	100.978	103.831	106.759	109.765	112.884	116.047	119.299	122.687	126.170	129.773	133.499
VCP	VIX	16.569	17.040	17.509	17.995	18.494	19.004	19.525	20.068	20.643	21.234	21.842	22.472	23.113	23.771	24.458	25.166	25.898	26.656

Tabela B.6 – Projeções do número de viagens pelo modo Avião (2015 – 2032)

O	D	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
CGH	JDF	180.351	185.676	190.770	195.661	200.368	204.904	209.280	213.502	217.570	221.478	225.213	228.762	232.110	235.238	238.135	240.790	243.193	245.334
CGH	PLU	4.611.784	4.664.296	4.717.406	4.771.120	4.825.446	4.880.390	4.935.961	4.992.164	5.049.006	5.106.496	5.164.641	5.223.448	5.282.924	5.343.078	5.403.916	5.465.448	5.527.679	5.590.620
CGH	RAO	218.544	225.458	232.072	238.421	244.531	250.418	256.096	261.574	266.852	271.921	276.766	281.370	285.711	289.767	293.524	296.967	300.082	302.858
CGH	SDU	7.163.816	7.245.386	7.327.885	7.411.323	7.495.712	7.581.061	7.667.382	7.754.686	7.842.984	7.932.288	8.022.608	8.113.957	8.206.346	8.299.787	8.394.291	8.489.872	8.586.542	8.684.312
CGH	SJP	177.274	182.716	187.923	192.921	197.732	202.367	206.838	211.152	215.309	219.302	223.118	226.744	230.164	233.359	236.319	239.031	241.486	243.673
CGH	UDI	208.805	215.319	221.550	227.532	233.289	238.836	244.186	249.349	254.322	259.100	263.666	268.005	272.096	275.919	279.460	282.705	285.642	288.258
CGH	VIX	1.891.614	1.913.153	1.934.937	1.956.969	1.979.252	2.001.788	2.024.581	2.047.634	2.070.949	2.094.530	2.118.379	2.142.500	2.166.895	2.191.569	2.216.523	2.241.761	2.267.287	2.293.103
PLU	MOC	81.749	84.118	86.383	88.557	90.648	92.663	94.605	96.479	98.284	100.017	101.674	103.247	104.731	106.118	107.402	108.578	109.643	110.592
PLU	RAO	128.282	132.453	136.442	140.270	143.953	147.501	150.923	154.224	157.404	160.458	163.376	166.149	168.763	171.206	173.468	175.541	177.417	179.088
PLU	UBA	84.166	86.746	89.213	91.581	93.860	96.055	98.171	100.214	102.181	104.070	105.876	107.592	109.210	110.721	112.121	113.404	114.565	115.599
PLU	UDI	122.566	126.497	130.256	133.864	137.335	140.679	143.905	147.016	150.013	152.892	155.643	158.257	160.721	163.024	165.157	167.111	168.879	170.455
PLU	VCP	167.510	172.950	178.152	183.145	187.949	192.577	197.040	201.345	205.492	209.475	213.282	216.898	220.308	223.494	226.445	229.148	231.595	233.775
PLU	VIX	939.321	950.017	960.834	971.774	982.839	994.031	1.005.349	1.016.796	1.028.374	1.040.083	1.051.926	1.063.904	1.076.018	1.088.270	1.100.661	1.113.194	1.125.869	1.138.689
SDU	PLU	3.557.345	3.597.850	3.638.817	3.680.250	3.722.155	3.764.537	3.807.402	3.850.754	3.894.601	3.938.946	3.983.797	4.029.158	4.075.035	4.121.435	4.168.364	4.215.827	4.263.830	4.312.379
SDU	RAO	161.954	166.961	171.751	176.350	180.776	185.040	189.155	193.124	196.949	200.623	204.135	207.472	210.619	213.560	216.283	218.779	221.038	223.051
SDU	UDI	154.737	159.452	163.964	168.295	172.465	176.482	180.358	184.098	187.702	191.164	194.473	197.617	200.582	203.353	205.920	208.272	210.401	212.298
SDU	VCP	422.956	436.016	448.510	460.505	472.050	483.174	493.906	504.261	514.238	523.822	532.982	541.686	549.895	557.566	564.670	571.181	577.074	582.325
SDU	VIX	1.459.115	1.475.729	1.492.532	1.509.527	1.526.715	1.544.099	1.561.681	1.579.463	1.597.447	1.615.636	1.634.033	1.652.638	1.671.456	1.690.488	1.709.737	1.729.204	1.748.894	1.768.807
VCP	VIX	80.427	83.096	85.648	88.097	90.453	92.722	94.910	97.021	99.053	101.005	102.871	104.643	106.313	107.874	109.319	110.644	111.842	112.910

Tabela B.7 – Projeções do número de viagens pelo modo Avião (2033 – 2050)

O	D	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046	2047	2048	2049	2050
CGH	JDF	247.206	248.808	250.143	251.214	252.023	252.573	252.873	252.930	252.753	252.345	251.709	250.852	249.782	248.506	247.028	245.349	243.474	241.404
CGH	PLU	5.654.277	5.718.659	5.783.774	5.849.631	5.916.237	5.983.602	6.051.733	6.120.641	6.190.333	6.260.819	6.332.107	6.404.207	6.477.128	6.550.879	6.625.470	6.700.911	6.777.210	6.854.378
CGH	RAO	305.285	307.362	309.093	310.481	311.530	312.243	312.631	312.705	312.476	311.947	311.123	310.012	308.625	306.970	305.054	302.878	300.447	297.763
CGH	SDU	8.783.195	8.883.204	8.984.352	9.086.651	9.190.116	9.294.758	9.400.592	9.507.631	9.615.889	9.725.380	9.836.117	9.948.115	10.061.388	10.175.951	10.291.819	10.409.006	10.527.527	10.647.398
CGH	SJP	245.585	247.222	248.586	249.680	250.506	251.067	251.373	251.432	251.251	250.834	250.185	249.310	248.217	246.913	245.403	243.689	241.773	239.659
CGH	UDI	290.546	292.504	294.135	295.444	296.432	297.104	297.470	297.540	297.324	296.825	296.048	295.001	293.693	292.134	290.328	288.277	285.985	283.456
CGH	VIX	2.319.213	2.345.621	2.372.329	2.399.341	2.426.661	2.454.292	2.482.238	2.510.501	2.539.087	2.567.998	2.597.238	2.626.812	2.656.722	2.686.972	2.717.567	2.748.511	2.779.806	2.811.458
PLU	MOC	111.421	112.131	112.722	113.196	113.555	113.798	113.931	113.956	113.878	113.697	113.416	113.036	112.562	111.997	111.342	110.598	109.768	108.851
PLU	RAO	180.549	181.800	182.841	183.677	184.308	184.737	184.971	185.016	184.878	184.559	184.063	183.395	182.559	181.564	180.410	179.100	177.636	176.021
PLU	UBA	116.504	117.278	117.922	118.440	118.830	119.096	119.241	119.268	119.183	118.986	118.679	118.265	117.748	117.132	116.418	115.607	114.701	113.701
PLU	UDI	171.832	173.011	173.993	174.781	175.376	175.781	176.001	176.043	175.913	175.613	175.145	174.515	173.727	172.788	171.701	170.466	169.086	167.563
PLU	VCP	235.680	237.311	238.670	239.760	240.583	241.143	241.448	241.506	241.326	240.911	240.264	239.392	238.302	237.004	235.499	233.790	231.881	229.774
PLU	VIX	1.151.655	1.164.768	1.178.030	1.191.444	1.205.010	1.218.731	1.232.608	1.246.643	1.260.838	1.275.194	1.289.714	1.304.399	1.319.252	1.334.273	1.349.466	1.364.831	1.380.372	1.396.089
SDU	PLU	4.361.482	4.411.144	4.461.371	4.512.170	4.563.547	4.615.510	4.668.064	4.721.216	4.774.974	4.829.344	4.884.333	4.939.948	4.996.196	5.053.085	5.110.621	5.168.813	5.227.667	5.287.192
SDU	RAO	224.811	226.317	227.572	228.579	229.339	229.856	230.137	230.191	230.025	229.642	229.044	228.238	227.232	226.033	224.643	223.065	221.302	219.357
SDU	UDI	213.957	215.376	216.559	217.508	218.224	218.712	218.977	219.028	218.871	218.510	217.946	217.187	216.239	215.108	213.799	212.312	210.650	208.817
SDU	VCP	586.915	590.844	594.117	596.743	598.727	600.075	600.810	600.950	600.516	599.516	597.957	595.856	593.231	590.102	586.478	582.361	577.763	572.688
SDU	VIX	1.788.948	1.809.317	1.829.919	1.850.755	1.871.829	1.893.142	1.914.698	1.936.500	1.958.550	1.980.851	2.003.405	2.026.217	2.049.288	2.072.622	2.096.222	2.120.091	2.144.231	2.168.646
VCP	VIX	113.843	114.642	115.308	115.841	116.245	116.519	116.668	116.697	116.608	116.405	116.088	115.661	115.128	114.491	113.754	112.918	111.982	110.950

APÊNDICE

Resultados dos Modelos de Escolha Modal

A large, bold, white capital letter 'C' is centered within a solid black rectangular box.

Tabela C.1 – Modelo A (W)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC_{AIR}	-1,7600	2,92E-01	-6,02	0,00
ASC_{BUS}	-0,5940	2,21E-01	-2,69	0,01
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—
ASC_{HPR}	-0,0578	2,64E-01	-0,22	0,83
ASC_{HSR}	-0,0150	2,50E-01	-0,06	0,95
β_{FAAIR}	-0,0007	6,33E-04	-1,07	0,29
β_{FABUS}	-0,0051	2,50E-03	-2,02	0,04
β_{FAHPR}	-0,0021	1,14E-03	-1,80	0,07
β_{FAHSR}	-0,0040	9,79E-04	-4,04	0,00
β_{FRAIR}	0,0106	2,04E-02	0,52	0,60
β_{FRBUS}	-0,0610	1,56E-02	-3,92	0,00
β_{FRHPR}	-0,0594	2,04E-02	-2,91	0,00
β_{FRHSR}	-0,0905	1,87E-02	-4,84	0,00
β_{PE}	-0,0050	4,23E-03	-1,19	0,23
β_{TO}	-0,0118	4,29E-03	-2,74	0,01
β_{TTAIR}	-0,0097	6,30E-03	-1,54	0,12
β_{TTBUS}	-0,0036	1,17E-03	-3,09	0,00
β_{TTCAR}	-0,0055	2,27E-03	-2,40	0,02
β_{TTHPR}	-0,0083	2,36E-03	-3,54	0,00
β_{TTHSR}	0,0002	3,16E-03	0,06	0,95

Tabela C.2 – Modelo A (L)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC_{AIR}	-1,8900	3,18E-01	-5,94	0,00
ASC_{BUS}	0,3320	2,22E-01	1,50	0,13
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—
ASC_{HPR}	-0,6540	2,94E-01	-2,22	0,03
ASC_{HSR}	-0,3800	2,94E-01	-1,29	0,20
β_{FAAIR}	-0,0017	6,64E-04	-2,63	0,01
β_{FABUS}	-0,0049	2,25E-03	-2,16	0,03
β_{FAHPR}	-0,0058	1,04E-03	-5,57	0,00
β_{FAHSR}	-0,0039	8,84E-04	-4,40	0,00
β_{FRAIR}	-0,0101	2,26E-02	-0,45	0,66
β_{FRBUS}	-0,0192	1,40E-02	-1,36	0,17
β_{FRHPR}	-0,0067	2,16E-02	-0,31	0,76
β_{FRHSR}	-0,0177	1,91E-02	-0,93	0,35
β_{PE}	-0,0041	3,40E-03	-1,20	0,23
β_{TO}	-0,0101	3,46E-03	-2,92	0,00
β_{TTAIR}	-0,0137	6,72E-03	-2,04	0,04
β_{TTBUS}	-0,0085	1,11E-03	-7,69	0,00
β_{TTCAR}	-0,0069	1,96E-03	-3,53	0,00
β_{TTHPR}	-0,0052	2,14E-03	-2,42	0,02
β_{TTHSR}	-0,0107	2,91E-03	-3,68	0,00

Tabela C.3 – Modelo B (W)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC_{AIR}	-0,7130	2,15E-01	-3,31	0,00
ASC_{BUS}	-0,4670	1,95E-01	-2,39	0,02
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—
ASC_{HPR}	-0,6440	1,88E-01	-3,43	0,00
ASC_{HSR}	-0,3060	1,94E-01	-1,58	0,11
β_{FA}	-0,0014	4,96E-04	-2,79	0,01
β_{FR}	-0,0522	9,02E-03	-5,79	0,00
β_{PE}	-0,0049	2,49E-03	-1,96	0,05
β_{TO}	-0,0119	3,88E-03	-3,07	0,00
β_{TT}	-0,0039	8,34E-04	-4,62	0,00

Tabela C.4 – Modelo B (L)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC_{AIR}	-1,2100	2,36E-01	-5,11	0,00
ASC_{BUS}	0,3090	2,03E-01	1,53	0,13
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—
ASC_{HPR}	-0,7990	2,04E-01	-3,91	0,00
ASC_{HSR}	-0,8190	2,16E-01	-3,79	0,00
β_{FA}	-0,0026	4,92E-04	-5,28	0,00
β_{FR}	-0,0145	8,91E-03	-1,62	0,10
β_{PE}	0,0002	2,00E-03	0,09	0,93
β_{TO}	-0,0078	3,07E-03	-2,54	0,01
β_{TT}	-0,0081	8,28E-04	-9,77	0,00

Tabela C.5 – Modelo C (W)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC_{AIR}	-0,4290	1,21E-01	-3,53	0,00
ASC_{BUS}	-0,2640	1,41E-01	-1,87	0,06 *
ASC_{CAR}	0,0000	–	–	–
ASC_{HPR}	-0,4020	1,06E-01	-3,78	0,00
ASC_{HSR}	0,0000	–	–	–
β_{FA}	-0,0013	4,93E-04	-2,68	0,01
β_{FACAR}	-0,0065	7,33E-04	-8,86	0,00
β_{FR}	-0,0574	8,53E-03	-6,73	0,00
β_{TT}	-0,0035	8,02E-04	-4,36	0,00

Tabela C.6 – Modelo C (L)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC_{AIR}	-1,4400	1,92E-01	-7,50	0,00
ASC_{BUS}	0,0000	–	–	–
ASC_{CAR}	0,0000	–	–	–
ASC_{HPR}	-1,0600	1,23E-01	-8,63	0,00
ASC_{HSR}	-1,0800	1,55E-01	-6,95	0,00
β_{FA}	-0,0026	4,92E-04	-5,33	0,00
β_{FACAR}	-0,0036	5,19E-04	-6,86	0,00
β_{FR}	0,0000	–	–	–
β_{TT}	-0,0079	8,01E-04	-9,89	0,00

Tabela C.7 – Modelo D (W)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC	-0,5120	1,75E-01	-2,93	0,00
ASC_{CAR}	0,0000	–	–	–
β_{FA}	-0,0024	3,96E-04	-6,05	0,00
β_{FACAR}	-0,0084	9,23E-04	-9,10	0,00
β_{FR}	-0,0511	8,97E-03	-5,70	0,00
β_{TT}	-0,0050	5,86E-04	-8,48	0,00

Tabela C.8 – Modelo D (L)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value
ASC_{AIR}	-1,4300	1,87E-01	-7,66	0,00
ASC_{BUS}	0,0000	–	–	–
ASC_{CAR}	0,0000	–	–	–
ASC_{RAIL}	-1,0600	1,21E-01	-8,80	0,00
β_{FA}	-0,0026	4,69E-04	-5,56	0,00
β_{FACAR}	-0,0035	4,95E-04	-7,16	0,00
β_{FR}	0,0000	–	–	–
β_{TT}	-0,0079	7,12E-04	-11,07	0,00

Tabela C.9 – Modelo E (W)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value	
ASC_{AIR}	-1,2600	6,14E+02	0,00	1,00	*
ASC_{BUS}	-0,0782	6,14E+02	0,00	1,00	*
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—	
ASC_{HPR}	0,4330	6,14E+02	0,00	1,00	*
ASC_{HSR}	0,5150	6,14E+02	0,00	1,00	*
$\alpha_{AGE1CAR}$	0,3160	8,29E+02	0,00	1,00	*
$\alpha_{AGE2CAR}$	0,0358	8,29E+02	0,00	1,00	*
$\alpha_{AGE3CAR}$	0,0399	8,29E+02	0,00	1,00	*
α_{DRIV_LIC}	0,3910	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{EMP}	-0,2160	1,50E-01	-1,44	0,15	*
β_{FAAIR}	-0,0006	6,33E-04	-1,00	0,32	*
β_{FABUS}	-0,0051	2,50E-03	-2,02	0,04	
β_{FAHPR}	-0,0020	1,14E-03	-1,79	0,07	*
β_{FAHSR}	-0,0040	9,80E-04	-4,05	0,00	
β_{FRAIR}	0,0107	2,04E-02	0,53	0,60	*
β_{FRBUS}	-0,0616	1,56E-02	-3,96	0,00	
β_{FRHPR}	-0,0610	2,04E-02	-2,98	0,00	
β_{FRHSR}	-0,0899	1,87E-02	-4,80	0,00	
$\alpha_{INC1CAR}$	0,5040	1,80e+308	0,00	1,00	*
$\alpha_{INC2CAR}$	0,0367	1,80e+308	0,00	1,00	*
$\alpha_{INC3CAR}$	-0,1500	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{PE}	-0,0062	4,27E-03	-1,44	0,15	*
β_{TO}	-0,0114	4,31E-03	-2,66	0,01	
β_{TTAIR}	-0,0096	6,31E-03	-1,52	0,13	*
β_{TTBUS}	-0,0036	1,17E-03	-3,04	0,00	
β_{TTCAR}	-0,0050	2,30E-03	-2,15	0,03	
β_{TTHPR}	-0,0081	2,35E-03	-3,43	0,00	
β_{TTHSR}	0,0002	3,16E-03	0,07	0,95	*

Tabela C.10 – Modelo E (L)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value	
ASC_{AIR}	-1,3200	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{BUS}	0,8910	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—	
ASC_{HPR}	-0,1020	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{HSR}	0,2200	1,80e+308	0,00	1,00	*
$\alpha_{AGE1CAR}$	0,5490	1,80e+308	0,00	1,00	*
$\alpha_{AGE2CAR}$	-0,3240	1,80e+308	0,00	1,00	*
$\alpha_{AGE3CAR}$	0,0835	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{DRIV_LIC}	0,3090	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{EMP}	0,0178	1,39E-01	0,13	0,90	*
β_{FAAIR}	-0,0018	6,65E-04	-2,65	0,01	
β_{FABUS}	-0,0049	2,25E-03	-2,19	0,03	
β_{FAHPR}	-0,0058	1,04E-03	-5,60	0,00	
β_{FAHSR}	-0,0039	8,85E-04	-4,44	0,00	
β_{FRAIR}	-0,0105	2,27E-02	-0,47	0,64	*
β_{FRBUS}	-0,0191	1,41E-02	-1,36	0,18	*
β_{FRHPR}	-0,0061	2,16E-02	-0,28	0,78	*
β_{FRHSR}	-0,0182	1,91E-02	-0,95	0,34	*
$\alpha_{INC1CAR}$	0,3030	7,65E+02	0,00	1,00	*
$\alpha_{INC2CAR}$	0,0230	7,65E+02	0,00	1,00	*
$\alpha_{INC3CAR}$	-0,0167	7,65E+02	0,00	1,00	*
β_{PE}	-0,0041	3,47E-03	-1,19	0,23	*
β_{TO}	-0,0102	3,53E-03	-2,89	0,00	
β_{TTAIR}	-0,0139	6,73E-03	-2,07	0,04	
β_{TTBUS}	-0,0085	1,11E-03	-7,66	0,00	
β_{TTCAR}	-0,0068	2,00E-03	-3,41	0,00	
β_{TTHPR}	-0,0051	2,14E-03	-2,40	0,02	
β_{TTHSR}	-0,0108	2,91E-03	-3,73	0,00	

Tabela C.11 – Modelo F (W)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>	
α	-0,0019	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{AGE_1}	-0,0005	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{AGE_2}	0,0012	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{AGE_3}	-0,0025	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{DRIV_LIC}	-0,0033	1,64E-03	-2,01	0,04	
α_{EMP}	0,0030	1,29E-03	2,29	0,02	
α_{INC_1}	0,0021	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{INC_2}	-0,0024	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{INC_3}	-0,0016	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{AIR}	-0,8030	1,80E-01	-4,45	0,00	
ASC_{BUS}	-0,5420	2,07E-01	-2,63	0,01	
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—	
ASC_{HPR}	-0,7150	1,75E-01	-4,08	0,00	
ASC_{HSR}	-0,3380	1,80E-01	-1,87	0,06	*
β	-0,0028	2,53E+04	0,00	1,00	*
β_{AGE_1}	-0,0025	3,41E+01	0,00	1,00	*
β_{AGE_2}	0,0036	3,41E+01	0,00	1,00	*
β_{AGE_3}	-0,0040	3,41E+01	0,00	1,00	*
β_{DRIV_LIC}	-0,0028	2,53E+04	0,00	1,00	*
β_{EMP}	0,0020	5,00E-03	0,40	0,69	*
β_{INC_1}	0,0018	8,94E+00	0,00	1,00	*
β_{INC_2}	-0,0084	8,94E+00	0,00	1,00	*
β_{INC_3}	0,0037	8,94E+00	0,00	1,00	*
γ	-0,0058	9,01E+05	0,00	1,00	*
γ_{AGE_1}	-0,0045	6,63E+01	0,00	1,00	*
γ_{AGE_2}	-0,0074	6,63E+01	0,00	1,00	*
γ_{AGE_3}	0,0061	6,63E+01	0,00	1,00	*
γ_{DRIV_LIC}	-0,0058	9,01E+05	0,00	1,00	*
γ_{EMP}	0,0066	8,58E-03	0,77	0,44	*
γ_{INC_1}	-0,0010	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{INC_2}	0,0034	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{INC_3}	-0,0081	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ	-0,0370	1,55E+02	0,00	1,00	*
λ_{AGE_1}	-0,0347	9,85E+01	0,00	1,00	*
λ_{AGE_2}	-0,0123	9,85E+01	0,00	1,00	*
λ_{AGE_3}	0,0100	9,85E+01	0,00	1,00	*
λ_{DRIV_LIC}	-0,0081	2,49E-02	-0,33	0,74	*
λ_{EMP}	0,0263	1,85E-02	1,42	0,16	*
λ_{INC_1}	-0,0286	5,05E+01	0,00	1,00	*
λ_{INC_2}	-0,0137	5,05E+01	0,00	1,00	*
λ_{INC_3}	0,0053	5,05E+01	0,00	1,00	*
θ	-0,0008	1,80E+01	0,00	1,00	*
θ_{AGE_1}	-0,0015	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{AGE_2}	0,0017	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{AGE_3}	-0,0010	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{DRIV_LIC}	-0,0024	1,12E-03	-2,14	0,03	
θ_{EMP}	0,0028	8,81E-04	3,22	0,00	
θ_{INC_1}	0,0008	6,13E+00	0,00	1,00	*
θ_{INC_2}	-0,0015	6,13E+00	0,00	1,00	*
θ_{INC_3}	-0,0001	6,13E+00	0,00	1,00	*

Tabela C.12 – Modelo F (L)

Atributo	Valor	Desvio Padrão	t-test	p-value	
α_{TT}	-0,0057	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{AGE_1}	-0,0029	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{AGE_2}	-0,0009	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{AGE_3}	-0,0019	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{DRIV_LIC}	0,0009	1,52E-03	0,61	0,54	*
α_{EMP}	0,0005	1,14E-03	0,46	0,65	*
α_{INC_1}	0,0018	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{INC_2}	-0,0024	1,80e+308	0,00	1,00	*
α_{INC_3}	-0,0051	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{AIR}	-1,0200	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{BUS}	0,5070	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{CAR}	0,0000	—	—	—	
ASC_{HPR}	-0,6160	1,80e+308	0,00	1,00	*
ASC_{HSR}	-0,5790	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{PE}	0,0004	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{AGE_1}	0,0054	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{AGE_2}	-0,0051	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{AGE_3}	0,0001	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{DRIV_LIC}	0,0004	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{EMP}	-0,0012	3,82E-03	-0,31	0,75	*
β_{INC_1}	0,0009	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{INC_2}	0,0040	1,80e+308	0,00	1,00	*
β_{INC_3}	-0,0046	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{TO}	-0,0022	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{AGE_1}	-0,0069	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{AGE_2}	0,0049	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{AGE_3}	-0,0002	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{DRIV_LIC}	-0,0022	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{EMP}	-0,0015	6,40E-03	-0,23	0,82	*
γ_{INC_1}	0,0056	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{INC_2}	-0,0061	1,80e+308	0,00	1,00	*
γ_{INC_3}	-0,0017	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ_{FR}	0,0050	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ_{AGE_1}	-0,0036	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ_{AGE_2}	-0,0031	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ_{AGE_3}	0,0116	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ_{DRIV_LIC}	-0,0192	1,96E-02	-0,98	0,33	*
λ_{EMP}	-0,0242	1,74E-02	-1,39	0,16	*
λ_{INC_1}	0,0184	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ_{INC_2}	0,0038	1,80e+308	0,00	1,00	*
λ_{INC_3}	-0,0172	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{FA}	-0,0020	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{AGE_1}	-0,0012	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{AGE_2}	0,0001	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{AGE_3}	-0,0010	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{DRIV_LIC}	0,0007	9,92E-04	0,75	0,46	*
θ_{EMP}	-0,0001	8,06E-04	-0,16	0,87	*
θ_{INC_1}	0,0010	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{INC_2}	-0,0005	1,80e+308	0,00	1,00	*
θ_{INC_3}	-0,0025	1,80e+308	0,00	1,00	*

APÊNDICE

Parâmetros para Análise Custo-Benefício

A large, bold, white capital letter 'D' is centered within a solid black rectangular box. The box is positioned to the right of the main title, aligned with the top of the title text.

INVESTIMENTOS					
m	Custo Médio de Manutenção da Via (R\$/km-ano)	Comum	HPT	HST	Fonte
		-	300.00,00	300.00,00	De Rus et al. (2009)
DESPESAS OPERACIONAIS					
δ	Ocupação Média dos Trens (%)	75,0	-	-	-
$\bar{q}$	Capacidade dos trens (assentos)	-	160	535	De Rus et al. (2009)
ND	Número de dias de operação por ano	365	-	-	-
CF	Fator de Contingência da Operação dos Trens	0,60	-	-	De Rus et al. (2009)
WT	Tempo Médio de Parada nas estações (horas)	0,25	-	-	-
H	Período de Operação Diária (horas)	17,0	-	-	-
a	Custo Médio de Aquisição (R\$/assento)	-	100.552,0	122.000,0	De Rus et al. (2009)
r_o	Custo Médio de Operação (R\$/assento-km)	-	1,5593	1,5041	UIC (2010)
r_m	Custo Médio de Manutenção dos Trens (R\$/assento-km)	-	0,5000	0,5000	De Rus et al. (2009)
EXCEDENTE DO CONSUMIDOR					
-	Salário médio (R\$/hora)	2.900,0	-	-	IBGE (2014c)
-	Renda média familiar (R\$ - núcleo familiar 4 pessoas)	1.450,0	-	-	IBGE (2014c)
VOT_w	Valor do tempo para viagem a trabalho (R\$/h = 1,33 · Salário Médio - 160 horas/mês)	24,10	-	-	-
VOT_l	Valor do tempo para viagem a lazer (R\$/h = 0,3 · Renda média familiar - 160 horas/mês)	2,70	-	-	-
S_C	Velocidade média Automóvel (km/h)	90	-	-	-
S_B	Velocidade média Ônibus (km/h)	70	-	-	-
REDUÇÃO DE ACIDENTES					
		COMUM	HPT	HST	Fonte
AAC_C	Custo Médio de Acidente de Automóvel (€ / 1.000 · pax-km)	32,30	-	-	Van Essen et al. (2011)
AAC_B	Custo Médio de Acidente de Ônibus (€ / 1.000 · pax-km)	12,30	-	-	Van Essen et al. (2011)
AAC_R	Custo Médio de Acidente de Trem (€ / 1.000 · pax-km)	0,60	-	-	Van Essen et al. (2011)
AAC_A	Custo Médio de Acidente de Avião (€ / 1.000 · pax-km)	0,50	-	-	Van Essen et al. (2011)
EXTERNALIDADES					
		COMUM	HPT	HST	Fonte
AEC_C	Custo Médio de Externalidades de Automóvel (R\$/1.000 · pax-km por ano)	32,40	-	-	Van Essen et al. (2011)
AEC_B	Custo Médio de Externalidades de Ônibus (R\$/1.000 · pax-km por ano)	21,50	-	-	Van Essen et al. (2011)
AEC_T	Custo Médio de Externalidades de Trens (R\$/1.000 · pax-km por ano)	-	14,70	2,16	Van Essen et al. (2011)
AEC_A	Custo Médio de Externalidades de Avião (R\$/1.000 · pax-km por ano)	56,70	-	-	Van Essen et al. (2011)
1€	Cotação média Euro (R\$ entre 19/01/2015 e 19/05/2014)	3,10	-	-	BCB (2015b)
$Prob_{RW}$	Proporção de viagens a trabalho (%)	52,2	-	-	-
$Prob_{RL}$	Proporção de viagens a lazer (%)	47,8	-	-	-
i	Taxa de desconto (%)	5,1	-	-	Lopez (2008)

APÊNDICE

Resultados dos Cenários de Análise Socioeconômica

A large black square containing a white letter 'E' in a bold, sans-serif font, positioned to the right of the main title.

Tabela E.1 – Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de HPTs no Cenário Conservador

Tarifa Média	INVESTIMENTO Infraestrutura Construção	Infraestrutura Manutenção	DESPESA			Econômico Receita	Econômico/Social Valor Residual	BENEFÍCIO			BCR	ENPV	TNPV
			Aquisição	Operação	Material Rodante Manutenção			Acidentes	Externalidades	Social			
R\$/km	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	–	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹
0,05	84,35	10,81	1,12	39,66	12,72	5,18	9,57	6,04	4,94	129,18	1,165	-133,91	29,74
0,10	84,35	10,81	1,06	37,53	12,04	9,78	9,57	5,72	4,69	119,40	1,109	-126,44	25,70
0,15	84,35	10,81	1,00	35,63	11,42	13,85	9,57	5,42	4,46	110,25	1,054	-119,80	21,55
0,20	84,35	10,81	0,95	33,62	10,78	17,41	9,57	5,13	4,23	101,58	1,001	-113,54	17,57
0,25	84,35	10,81	0,90	31,76	10,18	20,50	9,57	4,85	4,00	93,29	0,948	-107,94	13,39
0,30	84,35	10,81	0,85	29,99	9,62	23,14	9,57	4,58	3,79	85,49	0,897	-102,91	9,17
0,35	84,35	10,81	0,80	28,25	9,06	25,36	9,57	4,32	3,58	78,12	0,847	-98,34	5,00
0,40	84,35	10,81	0,75	26,65	8,55	27,23	9,57	4,07	3,38	71,40	0,800	-94,32	1,02
0,45	84,35	10,81	0,72	25,10	8,05	28,74	9,57	3,84	3,19	65,14	0,755	-90,73	-2,88
0,50	84,35	10,81	0,67	23,75	7,62	29,97	9,57	3,62	3,01	59,54	0,713	-87,66	-6,58
0,55	84,35	10,81	0,64	22,41	7,19	30,93	9,57	3,41	2,84	54,28	0,672	-84,90	-10,17
0,60	84,35	10,81	0,60	21,13	6,78	31,63	9,57	3,21	2,67	49,52	0,635	-82,48	-13,53
0,65	84,35	10,81	0,57	19,87	6,37	32,04	9,57	3,01	2,51	44,94	0,598	-80,36	-16,98
0,70	84,35	10,81	0,53	18,65	5,98	32,31	9,57	2,83	2,36	40,80	0,575	-78,45	-18,85
0,75	84,35	10,81	0,50	17,62	5,65	32,45	9,57	2,66	2,23	37,10	0,543	-76,92	-21,93
0,80	84,35	10,81	0,48	16,70	5,36	32,40	9,57	2,51	2,10	33,74	0,513	-75,73	-24,95
0,85	84,35	10,81	0,45	15,61	5,00	32,06	9,57	2,35	1,96	30,59	0,485	-74,59	-27,78
0,90	84,35	10,81	0,42	14,71	4,72	31,70	9,57	2,20	1,84	27,75	0,459	-73,75	-30,51
0,95	84,35	10,81	0,40	13,86	4,44	31,31	9,57	2,07	1,73	25,16	0,435	-72,99	-33,01
1,00	84,35	10,81	0,38	13,18	4,23	30,89	9,57	1,95	1,63	22,80	0,412	-72,50	-35,50
1,05	84,35	10,81	0,36	12,48	4,00	30,38	9,57	1,83	1,53	20,63	0,391	-72,06	-37,81
1,10	84,35	10,81	0,34	11,80	3,79	29,87	9,57	1,73	1,45	18,66	0,372	-71,65	-39,91
1,15	84,35	10,81	0,32	11,12	3,57	29,28	9,57	1,63	1,36	16,83	0,363	-71,33	-40,87
1,20	84,35	10,81	0,30	10,51	3,37	28,67	9,57	1,53	1,28	15,16	0,346	-71,11	-42,82
1,25	84,35	10,81	0,28	9,94	3,19	28,03	9,57	1,44	1,21	13,62	0,330	-70,97	-44,70
1,30	84,35	10,81	0,28	9,53	3,05	27,43	9,57	1,36	1,14	12,20	0,315	-71,02	-46,60
1,35	84,35	10,81	0,26	9,07	2,91	26,78	9,57	1,29	1,08	10,88	0,300	-71,06	-48,36
1,40	84,35	10,81	0,25	8,73	2,80	26,16	9,57	1,22	1,02	9,66	0,287	-71,22	-50,11
1,45	84,35	10,81	0,24	8,38	2,69	25,50	9,57	1,15	0,96	8,52	0,274	-71,40	-51,78
1,50	84,35	10,81	0,23	8,04	2,58	24,84	9,57	1,09	0,91	7,45	0,262	-71,60	-53,38
1,55	84,35	10,81	0,22	7,72	2,47	24,15	9,57	1,02	0,86	6,46	0,251	-71,85	-54,93
1,60	84,35	10,81	0,21	7,44	2,39	23,48	9,57	0,97	0,81	5,54	0,240	-72,15	-56,45
1,65	84,35	10,81	0,20	7,11	2,28	22,74	9,57	0,91	0,76	4,67	0,230	-72,45	-57,90
1,70	84,35	10,81	0,19	6,86	2,20	22,03	9,57	0,86	0,72	3,86	0,221	-72,81	-59,33
1,75	84,35	10,81	0,19	6,58	2,11	21,31	9,57	0,81	0,68	3,11	0,212	-73,17	-60,71
1,80	84,35	10,81	0,18	6,32	2,03	20,55	9,57	0,76	0,64	2,40	0,203	-73,57	-62,06
1,85	84,35	10,81	0,17	6,12	1,96	19,86	9,57	0,72	0,60	1,74	0,195	-74,00	-63,37
1,90	84,35	10,81	0,17	5,96	1,91	19,21	9,57	0,68	0,57	1,12	0,188	-74,43	-64,62
1,95	84,35	10,81	0,16	5,76	1,85	18,46	9,57	0,64	0,53	0,54	0,181	-74,91	-65,89

Tabela E.2 – Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de *HPTs* no Cenário Intermediário

Tarifa Média	INVESTIMENTO		DESPESA			BENEFÍCIO				BCR	ENPV	TNPV
	Infraestrutura Construção	Infraestrutura Manutenção	Aquisição	Operação	Materiais Rodante	Manutenção	Econômico Receita	Econômico/Social Valor Residual	Social Externalidades	Tarifa	Tempo	
R\$/km	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹
0,05	77,49	9,58	1,21	42,14	13,51	13,51	5,51	9,57	5,63	137,69	25,17	43,66
0,10	77,49	9,58	1,14	39,87	12,79	12,79	10,42	9,57	5,34	127,39	23,97	39,65
0,15	77,49	9,58	1,08	37,73	12,10	12,10	14,76	9,57	5,06	117,60	22,81	35,47
0,20	77,49	9,58	1,02	35,66	11,43	11,43	18,57	9,57	4,79	108,41	21,70	31,32
0,25	77,49	9,58	0,97	33,72	10,81	10,81	21,88	9,57	4,54	99,78	20,64	27,11
0,30	77,49	9,58	0,92	31,88	10,22	10,22	24,73	9,57	4,29	91,80	19,65	23,07
0,35	77,49	9,58	0,87	30,05	9,64	9,64	27,16	9,57	4,05	84,32	18,71	19,14
0,40	77,49	9,58	0,82	28,38	9,10	9,10	29,19	9,57	3,83	77,27	17,82	15,09
0,45	77,49	9,58	0,77	26,69	8,56	8,56	30,84	9,57	3,61	70,44	16,96	10,96
0,50	77,49	9,58	0,73	25,19	8,08	8,08	32,19	9,57	3,40	64,32	16,17	7,07
0,55	77,49	9,58	0,68	23,70	7,60	7,60	33,23	9,57	3,21	58,59	15,41	3,30
0,60	77,49	9,58	0,65	22,35	7,17	7,17	34,01	9,57	3,02	53,48	14,69	-0,25
0,65	77,49	9,58	0,61	21,12	6,77	6,77	34,58	9,57	2,85	48,70	14,02	-3,76
0,70	77,49	9,58	0,58	19,98	6,41	6,41	34,95	9,57	2,68	44,40	14,79	-5,68
0,75	77,49	9,58	0,55	18,76	6,02	6,02	35,02	9,57	2,52	40,28	14,17	-8,96
0,80	77,49	9,58	0,51	17,63	5,65	5,65	35,03	9,57	2,37	36,58	13,53	-12,02
0,85	77,49	9,58	0,48	16,68	5,35	5,35	34,91	9,57	2,23	33,19	12,98	-15,04
0,90	77,49	9,58	0,46	15,73	5,04	5,04	34,63	9,57	2,10	30,17	12,46	-17,80
0,95	77,49	9,58	0,43	14,77	4,73	4,73	34,12	9,57	1,97	27,32	11,98	-20,57
1,00	77,49	9,58	0,41	13,93	4,47	4,47	33,62	9,57	1,86	24,75	11,54	-23,16
1,05	77,49	9,58	0,39	13,10	4,20	4,20	33,05	9,57	1,75	22,37	11,14	-25,59
1,10	77,49	9,58	0,36	12,41	3,98	3,98	32,47	9,57	1,64	20,21	10,76	-27,96
1,15	77,49	9,58	0,34	11,81	3,79	3,79	31,88	9,57	1,55	18,25	11,55	-29,05
1,20	77,49	9,58	0,33	11,17	3,58	3,58	31,27	9,57	1,46	16,44	11,19	-31,12
1,25	77,49	9,58	0,31	10,48	3,36	3,36	30,55	9,57	1,38	14,76	10,84	-33,09
1,30	77,49	9,58	0,29	9,95	3,19	3,19	29,88	9,57	1,30	13,22	10,53	-35,03
1,35	77,49	9,58	0,28	9,42	3,02	3,02	29,17	9,57	1,23	11,79	10,23	-36,88
1,40	77,49	9,58	0,26	8,94	2,87	2,87	28,45	9,57	1,16	10,47	9,96	-38,66
1,45	77,49	9,58	0,25	8,55	2,74	2,74	27,76	9,57	1,09	9,24	9,72	-40,42
1,50	77,49	9,58	0,24	8,25	2,65	2,65	27,10	9,57	1,04	8,09	9,49	-42,14
1,55	77,49	9,58	0,23	7,90	2,53	2,53	26,37	9,57	0,98	7,02	9,28	-43,78
1,60	77,49	9,58	0,22	7,60	2,44	2,44	25,67	9,57	0,93	6,02	9,08	-45,37
1,65	77,49	9,58	0,21	7,34	2,35	2,35	24,96	9,57	0,88	5,09	8,89	-46,94
1,70	77,49	9,58	0,21	7,05	2,26	2,26	24,21	9,57	0,83	4,21	8,70	-48,44
1,75	77,49	9,58	0,19	6,77	2,17	2,17	23,47	9,57	0,78	3,39	8,53	-49,87
1,80	77,49	9,58	0,19	6,51	2,09	2,09	22,72	9,57	0,74	2,62	8,37	-51,28
1,85	77,49	9,58	0,18	6,25	2,00	2,00	21,96	9,57	0,69	1,90	8,21	-52,64
1,90	77,49	9,58	0,18	5,98	1,92	1,92	21,17	9,57	0,65	1,23	8,06	-53,97
1,95	77,49	9,58	0,16	5,76	1,85	1,85	20,42	9,57	0,62	0,59	7,92	-55,26

Tabela E.3 – Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de *HPTs* no Cenário Otimista

Tarifa Média	INVESTIMENTO		DESPESA				BENEFÍCIO				BCR	ENPV	TNPV		
	Infraestrutura Construção		Infraestrutura Manutenção	Aquisição	Material Rodante Operação	Manutenção	Econômico Receita	Econômico/Social Valor Residual	Acidentes	Externalidades				Social Externalidades	Tarifa
R\$/km	R\$ · 10 ⁹		R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹
0,05	66,48		7,64	1,23	41,27	13,23	5,38	9,57	4,89	2,97	133,11	24,75	1,350	-114,90	50,82
0,10	66,48		7,64	1,16	39,06	12,52	10,18	9,57	4,64	2,84	123,30	23,59	1,292	-107,11	47,26
0,15	66,48		7,64	1,10	36,96	11,85	14,43	9,57	4,40	2,70	114,05	22,49	1,235	-100,03	43,61
0,20	66,48		7,64	1,04	34,96	11,21	18,17	9,57	4,17	2,57	105,36	21,44	1,179	-93,59	39,95
0,25	66,48		7,64	0,99	33,05	10,60	21,44	9,57	3,95	2,44	97,16	20,45	1,125	-87,74	36,26
0,30	66,48		7,64	0,93	31,28	10,03	24,26	9,57	3,74	2,32	89,48	19,49	1,071	-82,53	32,50
0,35	66,48		7,64	0,88	29,49	9,46	26,66	9,57	3,54	2,20	82,22	18,56	1,019	-77,71	28,82
0,40	66,48		7,64	0,83	27,78	8,91	28,70	9,57	3,35	2,09	75,50	17,69	0,969	-73,37	25,27
0,45	66,48		7,64	0,78	26,17	8,39	30,38	9,57	3,16	1,98	69,24	16,88	0,921	-69,51	21,75
0,50	66,48		7,64	0,74	24,76	7,94	31,77	9,57	2,99	1,88	63,49	16,11	0,874	-66,21	18,25
0,55	66,48		7,64	0,70	23,34	7,48	32,87	9,57	2,82	1,78	58,18	15,39	0,831	-63,19	14,99
0,60	66,48		7,64	0,66	22,04	7,07	33,70	9,57	2,66	1,69	53,02	14,71	0,786	-60,61	11,46
0,65	66,48		7,64	0,63	20,75	6,65	34,29	9,57	2,51	1,60	48,25	14,06	0,744	-58,29	8,14
0,70	66,48		7,64	0,59	19,47	6,24	34,65	9,57	2,37	1,51	43,91	14,78	0,718	-56,20	6,37
0,75	66,48		7,64	0,55	18,42	5,91	34,88	9,57	2,23	1,43	40,00	14,17	0,681	-54,55	3,29
0,80	66,48		7,64	0,52	17,39	5,58	34,94	9,57	2,10	1,35	36,31	13,60	0,645	-53,10	0,27
0,85	66,48		7,64	0,49	16,33	5,24	34,80	9,57	1,98	1,27	33,02	13,07	0,613	-51,81	-2,46
0,90	66,48		7,64	0,47	15,44	4,95	34,59	9,57	1,87	1,20	29,99	12,53	0,581	-50,81	-5,22
0,95	66,48		7,64	0,44	14,57	4,67	34,31	9,57	1,76	1,14	27,21	12,04	0,551	-49,93	-7,77
1,00	66,48		7,64	0,42	13,74	4,41	33,88	9,57	1,66	1,07	24,69	11,60	0,524	-49,23	-10,21
1,05	66,48		7,64	0,39	12,93	4,15	33,31	9,57	1,56	1,01	22,33	11,20	0,499	-48,70	-12,60
1,10	66,48		7,64	0,37	12,15	3,90	32,70	9,57	1,47	0,95	20,17	10,83	0,475	-48,27	-14,85
1,15	66,48		7,64	0,35	11,50	3,69	32,08	9,57	1,39	0,90	18,17	10,50	0,452	-48,01	-17,05
1,20	66,48		7,64	0,33	10,87	3,48	31,44	9,57	1,31	0,85	16,36	11,22	0,443	-47,79	-18,05
1,25	66,48		7,64	0,31	10,34	3,32	30,87	9,57	1,24	0,81	14,71	10,90	0,423	-47,64	-19,99
1,30	66,48		7,64	0,30	9,81	3,15	30,22	9,57	1,17	0,76	13,17	10,59	0,404	-47,58	-21,89
1,35	66,48		7,64	0,28	9,18	2,94	29,49	9,57	1,10	0,72	11,74	10,28	0,386	-47,46	-23,62
1,40	66,48		7,64	0,27	8,70	2,79	28,78	9,57	1,04	0,68	10,43	10,00	0,369	-47,53	-25,37
1,45	66,48		7,64	0,25	8,30	2,66	28,09	9,57	0,98	0,65	9,21	9,75	0,353	-47,68	-27,09
1,50	66,48		7,64	0,24	7,80	2,50	27,33	9,57	0,93	0,61	8,07	9,51	0,339	-47,77	-28,66
1,55	66,48		7,64	0,23	7,48	2,40	26,65	9,57	0,88	0,58	7,01	9,29	0,324	-48,01	-30,25
1,60	66,48		7,64	0,22	7,19	2,30	25,97	9,57	0,83	0,55	6,02	9,09	0,311	-48,28	-31,79
1,65	66,48		7,64	0,21	6,90	2,21	25,27	9,57	0,79	0,52	5,09	8,90	0,298	-48,60	-33,30
1,70	66,48		7,64	0,20	6,61	2,12	24,56	9,57	0,74	0,49	4,21	8,72	0,286	-48,92	-34,75
1,75	66,48		7,64	0,19	6,37	2,04	23,85	9,57	0,70	0,47	3,40	8,56	0,274	-49,29	-36,17
1,80	66,48		7,64	0,19	6,14	1,97	23,15	9,57	0,67	0,44	2,63	8,40	0,263	-49,69	-37,55
1,85	66,48		7,64	0,18	5,91	1,90	22,45	9,57	0,63	0,42	1,91	8,25	0,253	-50,09	-38,88
1,90	66,48		7,64	0,17	5,69	1,83	21,72	9,57	0,60	0,39	1,23	8,10	0,243	-50,52	-40,19
1,95	66,48		7,64	0,17	5,47	1,76	20,99	9,57	0,56	0,37	0,60	7,96	0,234	-50,95	-41,45

Tabela E.4 – Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de *HSTs* no Cenário Conservador

Tarifa Média	INVESTIMENTO		DESPESA				BENEFÍCIO				BCR	ENPV	TNPV	
	Infraestrutura Construção	Infraestrutura Manutenção	Aquisição	Operação	Material Rodante	Manutenção	Econômico Receita	Econômico/Social Valor Residual	Acidentes	Externalidades				Social
R\$/km	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹
0,05	89,16	10,93	1,70	47,39	15,75	8,55	10,08	11,01	14,36	204,53	42,53	1,713	-146,29	126,14
0,10	89,16	10,93	1,60	45,36	15,08	16,30	10,08	10,48	13,74	190,84	40,48	1,638	-135,74	119,82
0,15	89,16	10,93	1,54	43,61	14,50	23,27	10,08	9,97	13,13	177,81	38,45	1,562	-126,37	112,99
0,20	89,16	10,93	1,48	41,79	13,89	29,48	10,08	9,45	12,53	165,14	36,33	1,485	-117,68	105,77
0,25	89,16	10,93	1,43	39,99	13,29	34,92	10,08	8,95	11,93	153,18	34,26	1,411	-109,79	98,53
0,30	89,16	10,93	1,36	38,11	12,67	39,64	10,08	8,48	11,33	141,71	32,37	1,340	-102,51	91,37
0,35	89,16	10,93	1,29	36,18	12,03	43,55	10,08	7,99	10,70	130,65	30,56	1,270	-95,96	83,94
0,40	89,16	10,93	1,21	34,39	11,43	46,79	10,08	7,52	10,11	120,42	28,90	1,203	-90,25	76,69
0,45	89,16	10,93	1,17	33,00	10,97	49,55	10,08	7,10	9,54	110,90	27,35	1,136	-85,60	69,28
0,50	89,16	10,93	1,10	31,45	10,46	51,75	10,08	6,68	9,00	101,92	25,94	1,074	-81,27	62,28
0,55	89,16	10,93	1,06	29,99	9,97	53,40	10,08	6,28	8,48	93,48	25,63	1,020	-77,62	56,26
0,60	89,16	10,93	1,01	28,54	9,49	54,55	10,08	5,90	7,97	85,55	24,25	0,961	-74,48	49,19
0,65	89,16	10,93	0,96	27,54	9,15	55,51	10,08	5,56	7,51	78,34	22,88	0,903	-72,15	42,15
0,70	89,16	10,93	0,92	26,36	8,76	56,16	10,08	5,24	7,08	71,66	21,69	0,850	-69,90	35,77
0,75	89,16	10,93	0,86	24,95	8,29	56,24	10,08	4,91	6,64	65,28	20,49	0,800	-67,87	29,45
0,80	89,16	10,93	0,82	23,38	7,77	55,84	10,08	4,59	6,20	59,29	19,38	0,754	-66,14	23,33
0,85	89,16	10,93	0,79	22,14	7,36	55,30	10,08	4,29	5,80	53,81	18,41	0,709	-65,00	17,31
0,90	89,16	10,93	0,74	20,82	6,92	54,44	10,08	4,01	5,41	48,69	17,51	0,667	-64,04	11,58
0,95	89,16	10,93	0,70	19,73	6,56	53,50	10,08	3,74	5,05	44,01	16,69	0,626	-63,50	5,99
1,00	89,16	10,93	0,67	19,03	6,32	52,60	10,08	3,51	4,73	39,79	15,85	0,586	-63,43	0,44
1,05	89,16	10,93	0,65	18,48	6,14	51,68	10,08	3,29	4,44	35,92	15,85	0,555	-63,61	-4,11
1,10	89,16	10,93	0,61	17,60	5,85	49,95	10,08	3,05	4,12	32,20	15,03	0,519	-64,12	-9,72
1,15	89,16	10,93	0,58	17,08	5,68	48,52	10,08	2,85	3,84	28,88	14,23	0,485	-64,83	-15,02
1,20	89,16	10,93	0,57	16,51	5,49	46,90	10,08	2,65	3,57	25,78	13,55	0,454	-65,68	-20,13
1,25	89,16	10,93	0,55	15,80	5,25	44,97	10,08	2,45	3,29	22,88	12,91	0,424	-66,64	-25,11
1,30	89,16	10,93	0,52	15,29	5,08	43,27	10,08	2,27	3,04	20,28	12,85	0,401	-67,63	-29,18
1,35	89,16	10,93	0,51	14,96	4,97	41,73	10,08	2,12	2,83	17,93	12,37	0,376	-68,72	-33,47
1,40	89,16	10,93	0,50	14,64	4,87	40,19	10,08	1,98	2,64	15,77	11,90	0,353	-69,83	-37,54
1,45	89,16	10,93	0,49	14,44	4,80	38,85	10,08	1,85	2,46	13,81	11,53	0,332	-70,88	-41,23
1,50	89,16	10,93	0,48	14,18	4,71	37,50	10,08	1,73	2,30	12,00	11,50	0,315	-71,89	-44,36
1,55	89,16	10,93	0,46	13,72	4,56	36,03	10,08	1,62	2,14	10,33	11,12	0,297	-72,71	-47,50
1,60	89,16	10,93	0,44	13,33	4,43	34,66	10,08	1,51	2,00	8,80	11,07	0,283	-73,55	-50,17
1,65	89,16	10,93	0,43	13,03	4,33	33,47	10,08	1,42	1,88	7,40	10,78	0,268	-74,34	-52,86
1,70	89,16	10,93	0,42	12,56	4,18	32,13	10,08	1,33	1,76	6,09	10,48	0,254	-75,03	-55,38
1,75	89,16	10,93	0,41	12,12	4,03	30,85	10,08	1,24	1,64	4,87	10,20	0,240	-75,72	-57,75
1,80	89,16	10,93	0,40	11,73	3,90	29,61	10,08	1,16	1,53	3,75	9,95	0,228	-76,42	-60,03
1,85	89,16	10,93	0,39	11,40	3,79	28,44	10,08	1,09	1,43	2,71	9,72	0,216	-77,15	-62,19
1,90	89,16	10,93	0,37	11,20	3,72	27,41	10,08	1,03	1,35	1,74	9,53	0,206	-77,89	-64,24
1,95	89,16	10,93	0,37	11,01	3,66	26,39	10,08	0,96	1,26	0,84	9,35	0,196	-78,65	-66,22

Tabela E.5 – Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de *HSTs* no Cenário Intermediário

Tarifa Média	INVESTIMENTO		DESPESA		BENEFÍCIO				BCR	ENPV	TNPV
	Infraestrutura Construção	Infraestrutura Manutenção	Aquisição	Material Rodante Operação	Manutenção	Econômico Receita	Econômico/Social Valor Residual	Social Externalidades			
R\$/km	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹
0,05	82,15	9,66	1,82	50,59	16,82	9,17	10,08	13,39	218,42	1,853	146,49
0,10	82,15	9,66	1,74	48,06	15,98	17,47	10,08	12,81	203,78	1,779	140,22
0,15	82,15	9,66	1,66	45,73	15,20	24,92	10,08	12,24	189,84	1,704	133,66
0,20	82,15	9,66	1,59	43,67	14,52	31,57	10,08	11,68	176,47	1,627	126,66
0,25	82,15	9,66	1,51	41,69	13,86	37,45	10,08	11,13	163,86	1,552	119,67
0,30	82,15	9,66	1,44	39,88	13,26	42,61	10,08	10,60	151,83	1,476	112,22
0,35	82,15	9,66	1,37	37,92	12,60	47,07	10,08	10,07	140,35	1,403	104,94
0,40	82,15	9,66	1,32	36,31	12,07	50,88	10,08	9,56	129,56	1,329	97,42
0,45	82,15	9,66	1,26	34,43	11,44	53,81	10,08	9,02	119,06	1,258	89,71
0,50	82,15	9,66	1,17	32,49	10,80	56,06	10,08	8,49	109,25	1,192	82,23
0,55	82,15	9,66	1,12	30,91	10,27	57,81	10,08	7,99	100,21	1,134	75,84
0,60	82,15	9,66	1,07	29,59	9,84	59,21	10,08	7,53	91,87	1,070	68,46
0,65	82,15	9,66	1,02	28,34	9,42	60,17	10,08	7,09	84,02	1,008	61,21
0,70	82,15	9,66	0,97	26,60	8,84	60,44	10,08	6,63	76,50	0,951	54,14
0,75	82,15	9,66	0,91	25,59	8,51	60,83	10,08	6,25	69,89	0,894	47,39
0,80	82,15	9,66	0,88	24,65	8,19	60,93	10,08	5,89	63,75	0,840	40,90
0,85	82,15	9,66	0,82	23,13	7,69	60,44	10,08	5,52	57,88	0,793	34,85
0,90	82,15	9,66	0,78	21,84	7,26	59,65	10,08	5,16	52,45	0,746	28,73
0,95	82,15	9,66	0,74	20,42	6,79	58,49	10,08	4,81	47,39	0,703	22,89
1,00	82,15	9,66	0,71	19,30	6,42	57,32	10,08	4,50	42,78	0,661	17,22
1,05	82,15	9,66	0,66	18,25	6,07	56,01	10,08	4,20	38,53	0,628	12,56
1,10	82,15	9,66	0,63	17,56	5,84	54,85	10,08	3,94	34,71	0,590	7,36
1,15	82,15	9,66	0,62	16,99	5,65	53,65	10,08	3,69	31,20	0,553	2,26
1,20	82,15	9,66	0,58	16,28	5,41	51,95	10,08	3,44	27,90	0,518	-3,00
1,25	82,15	9,66	0,54	15,65	5,20	50,16	10,08	3,20	24,86	0,486	-8,05
1,30	82,15	9,66	0,53	15,25	5,07	48,57	10,08	2,99	22,11	0,454	-12,91
1,35	82,15	9,66	0,51	14,51	4,82	46,34	10,08	2,75	19,45	0,430	-17,28
1,40	82,15	9,66	0,50	13,97	4,64	44,39	10,08	2,54	17,06	0,403	-21,84
1,45	82,15	9,66	0,48	13,60	4,52	42,64	10,08	2,36	14,91	0,378	-26,04
1,50	82,15	9,66	0,47	13,27	4,41	40,94	10,08	2,20	12,94	0,359	-29,60
1,55	82,15	9,66	0,45	13,04	4,33	39,43	10,08	2,05	11,14	0,337	-33,25
1,60	82,15	9,66	0,44	12,87	4,28	38,04	10,08	1,92	9,50	0,320	-36,33
1,65	82,15	9,66	0,43	12,49	4,15	36,55	10,08	1,79	7,96	0,302	-39,42
1,70	82,15	9,66	0,42	12,08	4,02	35,07	10,08	1,67	6,55	0,286	-42,32
1,75	82,15	9,66	0,40	11,75	3,91	33,76	10,08	1,57	5,25	0,271	-44,92
1,80	82,15	9,66	0,39	11,45	3,81	32,54	10,08	1,47	4,05	0,256	-47,38
1,85	82,15	9,66	0,38	11,03	3,67	31,21	10,08	1,37	2,92	0,243	-49,69
1,90	82,15	9,66	0,37	10,68	3,55	29,96	10,08	1,29	1,88	0,231	-51,88
1,95	82,15	9,66	0,36	10,29	3,42	28,70	10,08	1,20	0,91	0,219	-53,98

Tabela E.6 – Resultados da análise socioeconômica da rede ferroviária para operação de *HSTs* no Cenário Otimista

Tarifa Média	INVESTIMENTO		DESPESA			BENEFÍCIO				BCR	ENPV	TNPV
	Infraestrutura Construção	Infraestrutura Manutenção	Aquisição	Operação	Material Rodante	Econômico Receita	Econômico/Social Valor Residual	Social Externalidades	Tarifa	Tempo		
R\$/km	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹	R\$ · 10 ⁹
0,05	70,30	7,67	1,83	48,70	16,19	8,96	10,08	9,05	211,47	45,65	1,989	152,07
0,10	70,30	7,67	1,76	46,88	15,58	17,12	10,08	8,63	197,98	43,59	1,908	146,29
0,15	70,30	7,67	1,66	44,65	14,84	24,46	10,08	8,21	184,77	41,43	1,833	140,43
0,20	70,30	7,67	1,60	42,82	14,23	31,04	10,08	7,80	171,94	39,32	1,751	133,68
0,25	70,30	7,67	1,53	40,77	13,55	36,90	10,08	7,43	159,67	37,39	1,676	127,31
0,30	70,30	7,67	1,46	38,76	12,88	41,99	10,08	7,06	148,03	35,52	1,601	120,81
0,35	70,30	7,67	1,39	36,59	12,16	46,35	10,08	6,68	136,81	33,73	1,530	114,29
0,40	70,30	7,67	1,31	34,79	11,56	50,09	10,08	6,33	126,31	31,85	1,456	107,33
0,45	70,30	7,67	1,25	33,29	11,07	53,26	10,08	5,99	116,46	30,06	1,379	100,16
0,50	70,30	7,67	1,19	31,46	10,46	55,81	10,08	5,66	107,08	28,46	1,311	93,47
0,55	70,30	7,67	1,13	30,02	9,98	57,89	10,08	5,35	98,36	26,97	1,241	86,61
0,60	70,30	7,67	1,06	28,31	9,41	59,17	10,08	5,03	89,98	26,61	1,185	80,74
0,65	70,30	7,67	1,00	26,59	8,84	59,92	10,08	4,71	82,23	25,18	1,123	73,94
0,70	70,30	7,67	0,96	25,40	8,44	60,44	10,08	4,43	75,12	23,96	1,059	67,11
0,75	70,30	7,67	0,90	24,04	7,99	60,47	10,08	4,15	68,39	22,77	1,000	60,45
0,80	70,30	7,67	0,85	22,93	7,62	60,39	10,08	3,90	62,29	22,64	0,951	55,07
0,85	70,30	7,67	0,81	21,95	7,30	60,23	10,08	3,67	56,77	20,50	0,887	48,07
0,90	70,30	7,67	0,79	21,10	7,01	59,84	10,08	3,45	51,63	19,53	0,835	42,25
0,95	70,30	7,67	0,73	19,75	6,57	58,97	10,08	3,23	46,72	18,58	0,789	36,86
1,00	70,30	7,67	0,70	18,68	6,21	57,94	10,08	3,03	42,22	17,68	0,744	31,40
1,05	70,30	7,67	0,66	17,29	5,75	56,45	10,08	2,82	37,98	16,85	0,703	26,25
1,10	70,30	7,67	0,64	16,32	5,42	55,13	10,08	2,64	34,17	16,85	0,670	22,01
1,15	70,30	7,67	0,58	15,61	5,19	53,85	10,08	2,48	30,70	16,12	0,631	17,16
1,20	70,30	7,67	0,56	14,91	4,96	52,48	10,08	2,32	27,50	15,47	0,594	12,52
1,25	70,30	7,67	0,55	14,34	4,77	51,13	10,08	2,18	24,58	14,88	0,559	8,11
1,30	70,30	7,67	0,52	13,74	4,57	49,57	10,08	2,04	21,85	14,17	0,525	3,61
1,35	70,30	7,67	0,48	13,18	4,38	47,73	10,08	1,90	19,33	14,10	0,499	-0,36
1,40	70,30	7,67	0,47	12,78	4,25	46,05	10,08	1,78	17,03	13,55	0,469	-4,64
1,45	70,30	7,67	0,45	12,29	4,08	44,17	10,08	1,66	14,89	12,92	0,440	-8,91
1,50	70,30	7,67	0,44	11,67	3,88	41,99	10,08	1,53	12,87	12,79	0,418	-12,71
1,55	70,30	7,67	0,41	11,28	3,75	40,16	10,08	1,42	11,05	12,30	0,393	-16,55
1,60	70,30	7,67	0,41	10,99	3,65	38,51	10,08	1,32	9,40	12,20	0,373	-19,78
1,65	70,30	7,67	0,39	10,75	3,58	36,98	10,08	1,23	7,89	11,82	0,352	-23,08
1,70	70,30	7,67	0,38	10,58	3,52	35,58	10,08	1,15	6,49	11,48	0,332	-26,17
1,75	70,30	7,67	0,38	10,38	3,45	34,26	10,08	1,08	5,20	11,18	0,314	-28,97
1,80	70,30	7,67	0,37	9,97	3,32	32,79	10,08	1,01	4,00	10,86	0,298	-31,57
1,85	70,30	7,67	0,35	9,62	3,20	31,48	10,08	0,95	2,89	10,60	0,283	-33,91
1,90	70,30	7,67	0,34	9,42	3,13	30,38	10,08	0,89	1,86	10,39	0,268	-36,10
1,95	70,30	7,67	0,33	9,09	3,02	29,16	10,08	0,84	0,90	10,16	0,255	-38,18