

GILSON KENJI WATANABE

GUSTAVO MAKOTO FUJII

8,0
(outo)

hfm

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DO SISTEMA
METROVIÁRIO DE SÃO PAULO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecatrônica

Orientador:
Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi

São Paulo

2002

Aos nossos pais e familiares, cuja
dedicação e apoio sempre nos estimulou,
conferindo-nos os alicerces para quem
somos hoje.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA
ENGENHARIA MECÂNICA/NAVAL DA ESCOLA POLITÉCNICA (EPMN) – USP.

Watanabe, Gilson Kenji

Modelagem, simulação e análise do sistema metroviário de São Paulo, por
G. K. Watanabe e G. M. Fujii. São Paulo, 2002.

230 p. + apêndice.

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas
Mecânicos.

1. Modelagem Matemática 2. Redes de Petri 3. Sistemas Discretos 4. I.
Fujii, Gustavo Makoto II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. III. t.

Agradecimentos

Aos nossos pais, familiares e namoradas por sua grande compreensão e incentivo em todos os momentos de nossa árdua jornada.

Aos professores da Escola Politécnica, em especial ao Prof. Dr. Paulo Eigi Miyagi,, que nos conduziram ao longo de todos os nossos anos de curso e que nos auxiliaram na formação das bases para a nossa formação como engenheiros e como pessoas.

Aos nossos colaboradores, em especial a Fabrício Junqueira e Gladys Baptista, pelo incentivo e horas dipendidas em nosso auxílio.

A todos os nossos colegas e companheiros de turma, que durante os longos anos de curso, constituíram nossa segunda família.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS.....	XIV
RESUMO.....	XIX
ABSTRACT	XX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO	4
1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. SISTEMAS.....	6
2.1.1. <i>Sistemas a Eventos Discretos (SED)</i>	7
2.2. MODELO E MODELAGEM	8
2.3. SIMULAÇÃO	13
2.3.1. <i>Simulação de Sistemas a Eventos Discretos</i>	15
2.4. REDES DE PETRI	17
3. METODOLOGIA	26
4. ESTUDO DE CASO: SISTEMA METROVIÁRIO DE SÃO PAULO.....	31
4.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E PLANEJAMENTO GERAL	31
4.2. LEVANTAMENTO DE DADOS.....	34
4.2.1. <i>Linha Azul</i>	43
4.2.2. <i>Linha Verde</i>	47
4.2.3. <i>Linha Vermelha</i>	51
4.2.4. <i>Interconexão entre Linhas:</i>	55
4.3. CONCEPÇÃO DOS MODELOS	58
4.3.1. <i>Modelagem em HPSim</i>	58
4.3.2. <i>Modelagem em ProModel</i>	76

4.4.	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS.....	90
4.4.1.	<i>Verificação e Validação dos Modelos em HPSim.....</i>	90
4.4.2.	<i>Verificação e Validação dos Modelos em ProModel</i>	119
5.	ANÁLISE.....	135
5.1.	ANÁLISE COM MODELOS EM HPSIM.....	135
5.1.1.	<i>Caso 1: Aumento do Número de Trens em Circulação</i>	135
5.1.2.	<i>Caso 2: Aumento de Tempo de Percurso entre Estações</i>	152
5.1.3.	<i>Caso 3: Redução do Tempo de Percurso entre Estações</i>	169
5.2.	ANÁLISE COM MODELOS EM PROMODEL.....	185
5.2.1.	<i>Caso 1: Aumento da Capacidade dos Trens</i>	185
5.2.2.	<i>Caso 2: Aumento de Tempo de Percurso entre Estações</i>	193
5.2.3.	<i>Caso 3: Redução do Tempo de Percurso entre Estações</i>	201
6.	CONCLUSÕES	211
	ANEXOS A – PONTE ORCA	213
	ANEXO B – FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	214
	B.1. HPSIM	214
	B.2. PROMODEL	216
	ANEXO C – TEORIA DE “BAGS”	224
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	229
	APÊNDICE A	

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Malha metroviária de São Paulo	1
Figura 1.2 – Aumento da frota de veículos e do congestionamento [V. França, 2002]....	2
Figura 2.1 – Exemplo de representação de uma estrutura de rede de Petri.....	18
Figura 2.2 – Extensão da função “entrada” e “saída” do exemplo	19
Figura 2.3 – Representação gráfica da estrutura de Redes de Petri.....	20
Figura 2.4 – Representação gráfica do exemplo apresentado nas Figura 2.1 e Figura 2.2	21
Figura 2.5 – Exemplo de “disparo” de uma “transição”	21
Figura 2.6 – Exemplo de “Paralelismo”	22
Figura 2.7 – Exemplo de “Conflito”	23
Figura 2.8 – “Capacidade” de lugares.....	23
Figura 2.9 – Exemplos de “peso” de arcos.....	24
Figura 2.10 – Representação gráfica de “arcos habilitadores”	24
Figura 2.11 – Representação gráfica de “arcos inibidores”	24
Figura 3.1 – Procedimento para simulação apresentado em Bennett [1995]	26
Figura 3.2 – Procedimento para análise de sistemas por simulação apresentado em Banks, et al. [1996]	28
Figura 4.1 – Lógica do deslocamento de trens entre estações.....	33
Figura 4.2 – Demanda Manhã – Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi.....	44
Figura 4.3 – Demanda Manhã – Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara	44
Figura 4.4 – Demanda Manhã – Linha Azul – Total	45
Figura 4.5 – Demanda Tarde – Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi.....	46
Figura 4.6 – Demanda Tarde – Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara	46

Figura 4.7 – Demanda Tarde – Linha Azul - Total	47
Figura 4.8 – Demanda Manhã – Linha Verde – Ana Rosa / Vila Madalena.....	48
Figura 4.9 – Demanda Manhã – Linha Verde – Vila Madalena / Ana Rosa.....	48
Figura 4.10 – Demanda Manhã – Linha Verde – Total	49
Figura 4.11 – Demanda Tarde – Linha Verde – Ana Rosa / Vila Madalena	50
Figura 4.12 – Demanda Tarde – Linha Verde: Vila Madalena / Ana Rosa	50
Figura 4.13 – Demanda Tarde – Linha Verde – Total	51
Figura 4.14 – Demanda Manhã – Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda	52
Figura 4.15 – Demanda Manhã – Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera	52
Figura 4.16 – Demanda Manhã – Linha Vermelha - Total	53
Figura 4.17 – Demanda Tarde – Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda	54
Figura 4.18 – Demanda Tarde – Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera	54
Figura 4.19 – Demanda Tarde – Linha Vermelha - Total	55
Figura 4.20 – Modelo inicial entre duas estações consecutivas	58
Figura 4.21 – Modelo físico entre duas estações consecutivas	59
Figura 4.22 – Arcos inibidores para manutenção da lógica de funcionamento.....	60
Figura 4.23 – “Unidade de monitoramento de parada”	60
Figura 4.24 – Interação da “unidade de monitoramento de parada”	61
Figura 4.25 – Junção para troca de sentido de circulação de trens nas estações de extremidade.....	62
Figura 4.26 – Modelo de entrada e embarque de usuários em uma estação genérica	63

Figura 4.27 – Interação entre modelo de entrada e embarque e unidade de monitoramento	64
Figura 4.28 – Modelo de saída e desembarque de usuários em uma estação genérica...	65
Figura 4.29 – Interação entre modelo de saída e desembarque com unidade de monitoramento	66
Figura 4.30 – Modelo de entrada e embarque de usuários em uma estação de extremidade.....	67
Figura 4.31 – Modelo de saída e desembarque de usuários em uma estação de extremidade.....	67
Figura 4.32 – Modelo de embarque para as estações Ana Rosa e Paraíso.....	68
Figura 4.33 – Modelo de desembarque para as estações Ana Rosa e Paraíso.....	69
Figura 4.34 – Modelo de embarque para a estação Sé.....	71
Figura 4.35 – Modelo de desembarque para a estação Sé.....	72
Figura 4.36 – Modelo final entre duas estações genéricas	74
Figura 4.37 – Modelo do sistema metroviário de São Paulo em HPSim	75
Figura 4.38 – Definição das “Locations”	77
Figura 4.39 – Definição das “Entities”	78
Figura 4.40 – Definição dos “Attributes”.....	78
Figura 4.41 – Definição das “Path Networks”	79
Figura 4.42 – Definição do processamento de deslocamento do trem de estação – linha	81
Figura 4.43 – Definição do processamento de deslocamento do trem de linha - estação	82
Figura 4.44 – Definição do “Processing” de chegada de passageiros na estação.....	82
Figura 4.45 – Definição dos “Arrivals” do sistema.	83

Figura 4.46 – Definição das variáveis relacionadas à cada linha do Metrô.	84
Figura 4.47 – Definição das variáveis relacionadas à passageiros em cada estação	86
Figura 4.48 – Definição das variáveis relacionadas ao total de passageiros em cada estação	87
Figura 4.49 – Definição das variáveis relacionadas ao número de passageiros em cada trem.....	88
Figura 4.50 – Layout da Malha Metroviária em ProModel	89
Figura 4.51 – Layout – Linha Verde.....	90
Figura 4.52 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Jabaquara/Tucuruvi (Manhã).....	93
Figura 4.53 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Tucuruvi/Jabaquara (Manhã).....	93
Figura 4.54 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Azul (Manhã) .	94
Figura 4.55 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Ana Rosa/Vila Madalena (Manhã).....	98
Figura 4.56 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Vila Madalena/Ana Rosa (Manhã)	98
Figura 4.57 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Verde (Manhã)	99
Figura 4.58 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Corinthians-Itaquera/Barra Funda (Manhã)	102
Figura 4.59 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Barra Funda/Corinthians-Itaquera (Manhã)	102
Figura 4.60 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Vermelha (Manhã)	103
Figura 4.61 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Jabaquara/Tucuruvi (Tarde).....	107

Figura 4.62 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Tucuruvi/Jabaquara (Tarde).....	107
Figura 4.63 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Azul (Tarde) .	108
Figura 4.64 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Ana Rosa/Vila Madalena (Tarde).....	112
Figura 4.65 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Vila Madalena/Ana Rosa (Tarde).....	112
Figura 4.66 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Verde (Tarde)	113
Figura 4.67 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Corinthians-Itaquera/Barra Funda (Tarde)	116
Figura 4.68 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Barra Funda/Corinthians-Itaquera (Tarde)	116
Figura 4.69 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Vermelha (Tarde)	117
Figura 4.70 – Demanda Manhã - Linha Azul	121
Figura 4.71 – Demanda Manhã - Linha Vermelha	122
Figura 4.72 – Demanda Manhã - Linha Verde	122
Figura 4.73 – Total passageiros no Metrô – Manhã – Linha Azul	125
Figura 4.74 – Total passageiros no Metrô – Manhã – Linha Vermelha	125
Figura 4.75 – Total passageiros no Metrô – Manhã – Linha Verde	126
Figura 4.76 – Demanda Tarde - Linha Azul.....	128
Figura 4.77 – Demanda Tarde - Linha Vermelha.....	128
Figura 4.78 – Demanda Tarde - Linha Verde.....	129
Figura 4.79 – Total passageiros no trem – Tarde – Linha Azul	132
Figura 4.80 – Total passageiros no trem – Tarde – Linha Vermelha	132

Figura 4.81 – Total passageiros no trem – Tarde – Linha Verde	133
Figura 5.1 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Manhã)	136
Figura 5.2 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Manhã)	136
Figura 5.3 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã)	137
Figura 5.4 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã)	137
Figura 5.5 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)	138
Figura 5.6 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Barra Fundada / Corinthians-Itaquera (Manhã)	138
Figura 5.7 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Azul (Manhã)	139
Figura 5.8 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Verde (Manhã)	139
Figura 5.9 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Vermelha (Manhã)	140
Figura 5.10 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Tarde)	144
Figura 5.11 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Tarde)	145
Figura 5.12 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)	145
Figura 5.13 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)	146

Figura 5.14 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)	146
Figura 5.15 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Barra Fundas / Corinthians-Itaquera (Tarde).....	147
Figura 5.16 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Azul (Tarde).....	147
Figura 5.17 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Verde (Tarde).....	148
Figura 5.18 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Vermelha (Tarde).....	148
Figura 5.19 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Manhã).....	153
Figura 5.20 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Manhã).....	153
Figura 5.21 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã).....	153
Figura 5.22 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã).....	154
Figura 5.23 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)	154
Figura 5.24 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Manhã)	155
Figura 5.25 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Azul (Manhã)	156
Figura 5.26 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Verde (Manhã)	156

Figura 5.27 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Vermelha (Manhã)	157
Figura 5.28 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Tarde).....	161
Figura 5.29 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Tarde).....	162
Figura 5.30 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)	162
Figura 5.31 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)	163
Figura 5.32 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)	163
Figura 5.33 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Tarde)	164
Figura 5.34 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Azul (Tarde)	164
Figura 5.35 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Verde (Tarde).....	165
Figura 5.36 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Vermelha (Tarde).....	165
Figura 5.37 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Manhã).....	169
Figura 5.38 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Manhã).....	170
Figura 5.39 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã).....	170

Figura 5.40 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã).....	171
Figura 5.41 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)	171
Figura 5.42 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Manhã)	172
Figura 5.43 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Azul (Manhã)	172
Figura 5.44 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Verde (Manhã)	173
Figura 5.45 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Vermelha (Manhã)	173
Figura 5.46 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Tarde).....	177
Figura 5.47 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Tarde).....	178
Figura 5.48 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)	178
Figura 5.49 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)	179
Figura 5.50 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)	179
Figura 5.51 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Tarde)	180
Figura 5.52 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Azul (Tarde).....	180

Figura 5.53 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Verde (Tarde)	181
Figura 5.54 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Vermelha (Tarde)	181
Figura 5.55 – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Azul	186
Figura 5.56 – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Vermelha	187
Figura 5.57 – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Verde	187
Figura 5.58 – Total de passageiros – Aumento da Capacidade dos trens –Linha Azul	190
Figura 5.59 – Total de passageiros – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Vermelha	191
Figura 5.60 – Total de passageiro – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Verde	191
Figura 5.61 – Aumento do tempo entre estações – Linha Azul	194
Figura 5.62 – Aumento do tempo entre estações – Linha Vermelha	195
Figura 5.63 – Aumento do tempo entre estações – Linha Verde	195
Figura 5.64 – Total de passageiros – Aumento do intervalo entre trens –Linha Azul .	198
Figura 5.65 – Total de passageiros – Aumento do intervalo entre trens – Linha Vermelha	199
Figura 5.66 – Total de passageiro – Aumento do intervalo entre trens – Linha Verde	199
Figura 5.67 – Diminuição do tempo entre estações – Linha Azul	203
Figura 5.68 – Diminuição do tempo entre estações – Linha Vermelha	203
Figura 5.69 – Diminuição do tempo entre estações – Linha Verde	204
Figura 5.70 – Total de passageiros – Diminuição do intervalo entre trens –Linha Azul	207
Figura 5.71 – Total de passageiros – Diminuição do intervalo entre trens – Linha Vermelha	208

Figura 5.72 – Total de passageiro – Diminuição do intervalo entre trens – Linha Verde	208
Figura B.1 – Diagrama de modelagem em ProModel [Src-Asia, 2002]	222
Figura C.1 – Exemplos de "bags"	224

Lista de Tabelas

Tabela 1-1: Demonstrativo dos benefícios gerados pelo sistema metroviário [Metrô, 2002].....	3
Tabela 4-1: Dados obtidos frente à Companhia do Metropolitano de São Paulo.....	35
Tabela 4-2: Linha 1 (Azul) - Horário de funcionamento	36
Tabela 4-3: Linha 2 (Verde) - Horário de funcionamento	36
Tabela 4-4: Linha 3 (Vermelha) - Horário de funcionamento	37
Tabela 4-5: Linha 1 (Azul) - Capacidade de passageiros/hora (nos horários de pico)....	38
Tabela 4-6: Linha 2 (Verde) - Capacidade de passageiros/hora (nos horários de pico) .	38
Tabela 4-7: Linha 3 (Vermelha) - Capacidade de passageiros/hora (nos horários de pico)	39
Tabela 4-8: Dados gerais.....	39
Tabela 4-9: Demanda de passageiros da Linha 1 (Azul) – Jabaquara / Tucuruvi	40
Tabela 4-10: Demanda de passageiros da Linha 1 (Azul) – Tucuruvi / Jabaquara	41
Tabela 4-11: Demanda de passageiros da Linha 2 (Verde) – Ana Rosa / Vila Madalena	41
Tabela 4-12: Demanda de passageiros da Linha 2 (Verde) – Vila Madalena / Ana Rosa	42
Tabela 4-13: Demanda de passageiros da Linha 3 (Vermelha) – Corinthians-Itaquera / Barra Funda.....	42
Tabela 4-14: Demanda de passageiros da Linha 3 (Vermelha) – Barra Funda / Corinthians-Itaquera.....	43
Tabela 4-15: Dados comparativos da Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi (Manhã).....	91
Tabela 4-16: Dados comparativos da Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara (Manhã).....	92
Tabela 4-17: Dados comparativos totais da Linha Azul (Manhã).....	95

Tabela 4-18: Dados comparativos da Linha Verde – Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã)	96
Tabela 4-19: Dados comparativos da Linha Verde – Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã)	97
Tabela 4-20: Dados comparativos totais da Linha Verde (Manhã)	99
Tabela 4-21: Dados comparativos da Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)	100
Tabela 4-22: Dados comparativos da Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Manhã)	101
Tabela 4-23: Dados comparativos totais da Linha Vermelha (Manhã)	104
Tabela 4-24: Dados comparativos da Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi (Tarde)	105
Tabela 4-25: Dados comparativos da Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara (Tarde)	106
Tabela 4-26: Dados comparativos totais da Linha Azul (Tarde)	109
Tabela 4-27: Dados comparativos da Linha Vermelha – Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)	110
Tabela 4-28: Dados comparativos da Linha Verde – Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)	111
Tabela 4-29: Dados comparativos totais da Linha Verde (Tarde)	113
Tabela 4-30: Dados comparativos da Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)	114
Tabela 4-31: Dados comparativos da Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Tarde)	115
Tabela 4-32: Dados comparativos totais da Linha Vermelha (Tarde)	118
Tabela 4-33: Validação do Modelo – Manhã – Linha Azul	123
Tabela 4-34: Validação do Modelo – Manhã – Linha Vermelha	124
Tabela 4-35: Validação do Modelo – Manhã – Linha Verde	124

Tabela 4-36: Validação do Modelo – Tarde – Linha Azul	130
Tabela 4-37: Validação do Modelo – Tarde – Linha Vermelha.....	131
Tabela 4-38: Validação do Modelo – Tarde – Linha Verde.....	131
Tabela 5-1: Dados para estudo de aumento em 20% do número de trens em horário de pico	135
Tabela 5-2: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Azul (Manhã)	141
Tabela 5-3: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Verde (Manhã)	142
Tabela 5-4: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Vermelha (Manhã)	143
Tabela 5-5: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Azul (Tarde)	149
Tabela 5-6: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Verde (Tarde)	150
Tabela 5-7: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Vermelha (Tarde)	151
Tabela 5-8: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Azul (Manhã)	157
Tabela 5-9: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Verde (Manhã)	158
Tabela 5-10: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha (Manhã)	159
Tabela 5-11: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Azul (Tarde).....	166
Tabela 5-12: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Verde (Tarde).....	167

Tabela 5-13: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha (Tarde).....	168
Tabela 5-14: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Azul (Manhã).....	174
Tabela 5-15: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Verde (Manhã)	175
Tabela 5-16: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha (Manhã)	176
Tabela 5-17: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Azul (Tarde).....	182
Tabela 5-18: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Verde (Tarde).....	183
Tabela 5-19: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha (Tarde).....	184
Tabela 5-20: Aumento da Capacidade - Linha Azul	188
Tabela 5-21: Aumento da Capacidade - Linha Vermelha.....	189
Tabela 5-22: Aumento da Capacidade - Linha Verde.....	189
Tabela 5-23: Resultado do aumento da capacidade dos trens	192
Tabela 5-24: Aumento do Tempo – Linha Azul.....	196
Tabela 5-25: Aumento do Tempo – Linha Vermelha.....	197
Tabela 5-26: Aumento do Tempo – Linha Verde.....	197
Tabela 5-27: Resultado do aumento do intervalo de tempo entre estações, nos trens..	200
Tabela 5-28: Diminuição do Tempo – Linha Azul.....	205
Tabela 5-29: Diminuição do Tempo – Linha Vermelha	206
Tabela 5-30: Diminuição do Tempo – Linha Verde.....	206

Tabela 5-31: Resultado da diminuição do intervalo de tempo entre estações, nos trens	209
Tabela B-1: Configurações do Sistema para ProModel	217

Resumo

Este trabalho aborda o tráfego de trens metroviários em três das linhas atualmente em funcionamento (Linhas Azul, Verde e Vermelha), bem como o fluxo de passageiros nas suas estações.

O sistema metroviário é estudado e avaliado com o auxílio de ferramentas de simulação baseadas em redes de Petri (HPSim) e teoria de filas (ProModel), onde os modelos concebidos são verificados e validados de acordo com os dados referentes à operação do sistema real.

Nestes modelos, são estudadas propostas de melhoria operacional variando-se alguns de seus parâmetros. Observou-se que as variações implementadas podem melhorar a qualidade dos serviços prestados, como, por exemplo, o número de passageiros por trem.

Este trabalho visa contribuir com o estudo e propostas de melhorias do sistema metroviário de São Paulo através de sua modelagem, validação dos modelos criados e condução de experimentos com diferentes estratégias para a melhoria da qualidade dos serviços prestados.

Abstract

This project currently approaches the traffic of subway trains in three of the lines in functioning (Lines Blue, Green and Red), as well as the flow of passengers in its stations.

The subway system is studied and evaluated with the aid of tools of simulation based in Petri nets (HPSim) and theory of queues (ProModel), where the conceived models are verified and validated in accordance with the referring data to the operation of the real system.

In these models, proposals of operational improvement varying some of its parameters are studied. It was observed that the implemented variations can improve the quality of the given services, as, for example, the number of passengers for train.

This project aims at to contribute with the study and proposals of improvements of the subway system of São Paulo through its modeling, validation of the models bred and conduction of experiments with different strategies for the improvement of the quality of the given services.

1. Introdução

Este trabalho visa pesquisar e analisar as condições atuais do sistema metroviário do estado de São Paulo. Desta forma, é realizada uma análise, através de técnicas de simulação, da dinâmica envolvida neste sistema.

De acordo com Pereira [2001], o sistema metroviário de São Paulo (Metrô), desempenha um importante papel no transporte coletivo. Atualmente, segundo dados da própria companhia, este sistema abrange uma extensão de cerca de 50 km, com 46 estações, disponibilizando, em sua frota, 109 trens em circulação, distribuídos nas três principais linhas em funcionamento (vide Figura 1.1):

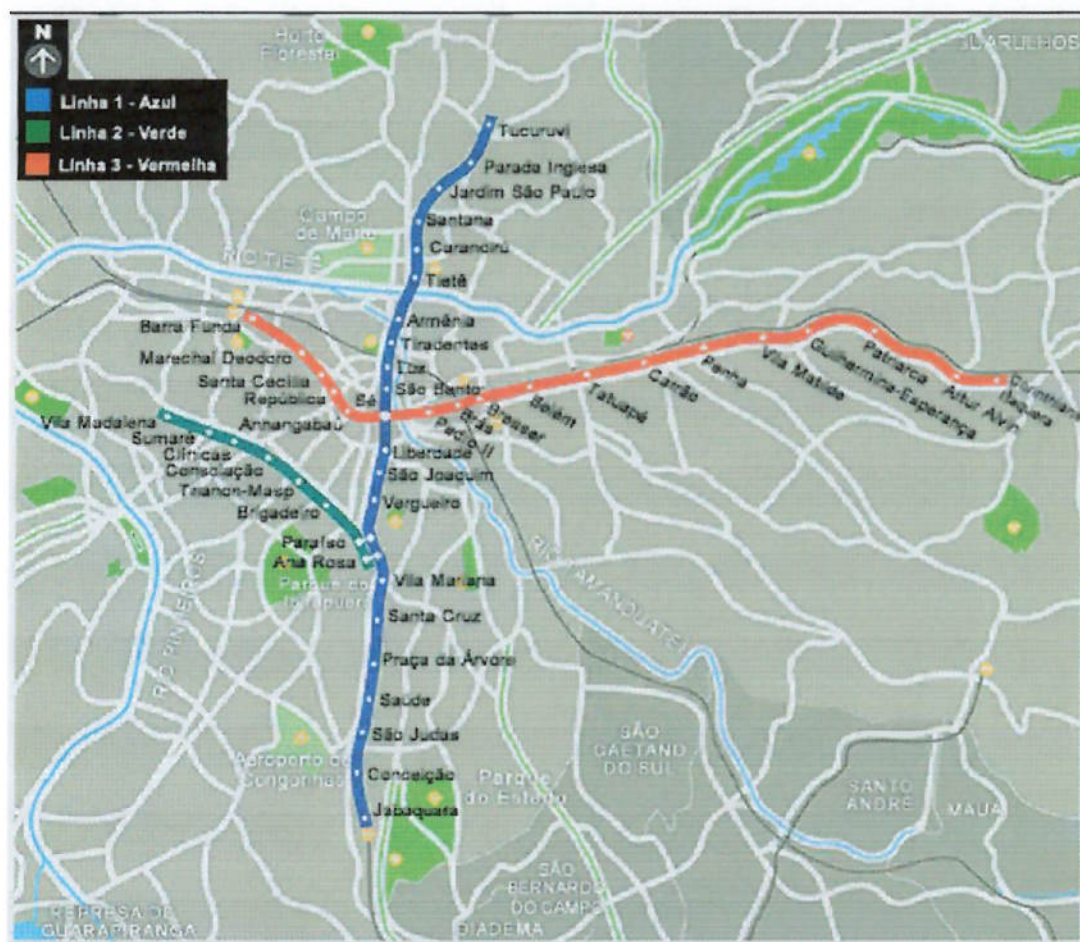


Figura 1.1 – Malha metroviária de São Paulo

- Linha Azul, que liga a Zona Norte à Zona Sul (da estação Tucuruvi à estação Jabaquara),
- Linha Vermelha que liga a Zona Leste à Oeste (da estação Corinthians-Itaquera à estação Barra Funda),
- Linha Verde, na região da Avenida Paulista (da estação Ana Rosa à estação Vila Madalena).

Segundo Carlos Zarattini, ex-secretário municipal de transportes (gestão de 2000) [Pereira, 2001], com o crescimento da cidade de São Paulo, o número de pessoas se locomovendo, e, portanto, o número de carros que são licenciados diariamente, aumentou sensivelmente.

Ele ainda destaca que, um dos principais impactos da ausência de um sistema de transporte público bem estruturado na cidade, é o aumento do uso individual do automóvel, que desde 1997 passou de 4,6 milhões para 5,3 milhões de automóveis só na grande São Paulo (25% do total de veículos espalhados pelo país), com o conseqüente aumento dos congestionamentos diários (vide Figura 1.2).

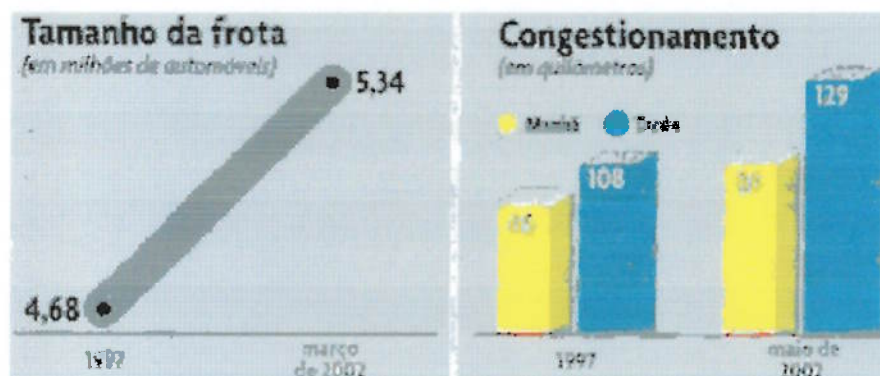


Figura 1.2 – Aumento da frota de veículos e do congestionamento [V. França, 2002]

A Tabela 1-1 apresenta os dados de uma pesquisa realizada pela Secretaria municipal de Transportes de São Paulo (SMT-SP), sobre os benefícios que o sistema metroviário gera à sociedade.

Tabela 1-1: Demonstrativo dos benefícios gerados pelo sistema metroviário¹ [Metrô, 2002]

	Unidade	2000		1999	
		Quantidade	Valor	Quantidade	Valor
		Mil	R\$ Mil	Mil	R\$ Mil
<i>Redução da emissão de poluentes</i>	Kg/Ano	16.571	755.594	16.829	724.077
<i>Redução do consumo de combustível</i>	Litro/Ano	416.789	264.265	432.110	203.041
<i>Redução do custo operacional do sistema ônibus e automóvel</i>	Km/Ano	419.984	621.236	426.508	764.059
<i>Redução do custo do tempo de viagem</i>	HV*/Ano	361.409	1.454.012	355.178	1.301.343
<i>* Jornada para o trabalho</i>		229.965	639.301	226.000	572.533
<i>* Negócios</i>		56.127	605.328	55.159	541.295
<i>* Outros</i>		75.317	209.383	74.019	187.515
<i>Redução do número de acidentes</i>	Vítimas totais/Ano	1,26	21.138	1,21	19.178
<i>* Gastos hospitalares + assistenciais</i>			7.624		6.917
<i>* Perda de produção</i>			13.514		12.261
TOTAL			3.116.245		3.011.698

Os dados comprovam que o Metrô é meio de transporte muito utilizado, atendendo cerca de 1,7 milhões de usuários diariamente, segundo dados da própria companhia, de forma segura e confiável. Mais ainda, estudos realizados pelo Metrô indicam que devido aos serviços prestados, o número de carros e ônibus que circulando nas ruas diminui, contribuindo para uma cidade com menos congestionamento e poluição.

¹ Esta metodologia baseia-se em estudos de viabilidade de projetos similares e é aceita por instituições financeiras nacionais e estrangeiras, tais como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES e Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – BIRD.

Segundo informações da SMT-SP [SMTSP, 2002], promovendo-se a melhoria dos serviços de transporte prestados, estes se tornam mais atraentes à população, promovendo o aumento do número de usuários diários e, portanto, contribuindo para a redução dos congestionamentos da cidade.

Em parte, os problemas do transporte são causados pelo fato de grande parte da população urbana apresentar os mesmos horários de trabalho (início da jornada de trabalho, entre 7:00h e 9:00h, e o seu encerramento, entre 17:00h e 19:00h). Isto contribui para o acúmulo de passageiros em determinados horários, chamados de horários de pico, período de tempo no qual a demanda de usuários eleva-se acintosamente, gerando, portanto, os maiores problemas.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é modelar e analisar o funcionamento da malha metroviária da cidade de São Paulo, incluindo suas três principais linhas em operação atualmente, observando e analisando a influência de suas variáveis, no comportamento do sistema metroviário como um todo. Assim, pretende-se contribuir para o estudo de como a variação de certos parâmetros do sistema influenciam no tempo gasto para transportar um passageiro de sua estação de origem até sua estação de destino.

Para isto, as variáveis do sistema que são observadas e analisadas são:

- (1) intervalo de tempo entre trens subseqüentes;
- (2) intervalo de tempo que um trem permanece na estação;
- (3) número de passageiros/estação nos horários de pico;
- (4) o modo como as três linhas que estão operando no momento se interligam.

Posteriormente este estudo poderá ser utilizado como base para uma análise integrada do sistema de transportes públicos da cidade de São Paulo, podendo-se citar: as novas linhas do Metrô (seja em operação, seja em construção), a malha ferroviária (CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos) e os terminais de ônibus.

Vale ressaltar que este trabalho tem como foco principal apenas os horários de maior movimento (horários de pico), analisando-se os efeitos da conseqüente superlotação, uma vez que estes horários apresentam demanda de usuários muito elevada em relação ao restante do horário de funcionamento do Metrô e, conseqüentemente, revela as piores condições de serviços prestados.

1.2. Estrutura do trabalho

O desenvolvimento deste trabalho está dividido, nas seguintes partes, a serem detalhadas a seguir:

O capítulo 2 apresenta as definições, métodos e ferramentas consideradas neste trabalho.

O capítulo 3 apresenta os procedimentos considerados no desenvolvimento deste trabalho, desde a criação dos modelos do sistema em estudo, passando pela análise dos dados pertinentes, até a simulação e análise dos resultados.

No capítulo 4, um estudo de caso é proposto, incluindo a definição do problema a ser modelado, os dados necessários e os modelos finais do sistema, para as ferramentas de modelagem utilizadas.

O capítulo 5 apresenta a análise dos dados obtidos na simulação dos modelos desenvolvidos no capítulo 4, referentes ao estudo de caso proposto, com a utilização das ferramentas HPSim e ProModel.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas através da análise dos dados pertinentes à simulação dos modelos, incluindo a comparação dos resultados decorrentes das diferentes ferramentas utilizadas.

Informações adicionais e teorias que complementam este trabalho estão apresentadas em Anexos. Nesta parte, incluem-se as definições e características das ferramentas de modelagem e análise utilizadas neste trabalho (HPSim e ProModel).

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Sistemas

Um sistema é definido como um grupo de objetos, partes ou componentes que são unidos segundo uma interação regular ou uma relação de interdependência para a realização de um certo propósito [Banks, et al., 1996]. Os sistemas, segundo esta definição, são compostos por: *entidades*, *atributos*, *atividades*, *estados* e *eventos*. *Entidades* são os objetos de interesse do sistema, que requerem representação explícita nos modelos. *Atributos* são as propriedades das *entidades*. *Atividades* representam ações, transformações ou processamentos com duração específica de tempo, que são iniciados e concluídos pela ocorrência de *eventos*, cuja duração pode ser constante ou seguir uma distribuição estatística. *Estado* de um sistema é definido como o conjunto de variáveis necessárias para descrever o sistema em qualquer instante de tempo. Já *eventos* são ocorrências instantâneas que podem alterar o *estado* dos sistemas.

Esta definição também é adotada por Bennett [1995], que ressalta também a importância de se delimitar os sistemas em estudo pela idéia de fronteiras, separando-os do restante do universo, ou ambiente do sistema, mas ainda assim interagindo com o mesmo, uma vez que os sistemas são constantemente afetados por mudanças ocorridas fora dele.

Além disto, segundo a definição seguida por Cellier [1991], sistemas podem ser “controlados” e “observados”, interagindo-se com o meio exterior (ambiente do sistema). Estas interações recaem em duas categorias distintas: variáveis que pertencem ao ambiente do sistema e que influenciam o seu comportamento, chamadas *entradas* do sistema; e variáveis do próprio sistema e que influenciam o comportamento do ambiente, chamadas de *saídas* do sistema. É possível a atribuição de valores a pelo menos algumas das *entradas* do sistema, além da observação do comportamento do mesmo, através da análise das respectivas *saídas*. Neste contexto, Cellier [1991] também define um sistema como uma fonte potencial de dados.

Os sistemas podem ser classificados em discretos e contínuos. Os sistemas discretos são aqueles em que as variáveis de estado mudam somente em um conjunto de pontos discretos no tempo, enquanto que nos sistemas contínuos, as variáveis de estado mudam constantemente durante o tempo. Poucos sistemas, na prática, são totalmente discretos ou contínuos, mas desde que um tipo de mudança predomine no sistema, é possível classificar o sistema entre discreto e contínuo [Law, Kelton, 1991].

Neste trabalho é adotada uma abordagem de sistemas a eventos discretos, tendo em vista que o objeto de estudo (sistema metroviário de São Paulo) pode ser caracterizado por estados discretos, cujas mudanças são definidas pela ocorrência de eventos considerados instantâneos. Na realidade, o sistema abordado possui variáveis tipicamente contínuas, mas uma aproximação para considera-las discretas pode ser realizada, de forma a tornar sua análise mais simples, através de conceitos e ferramentas de simulação de sistemas a eventos discretos.

2.1.1. Sistemas a Eventos Discretos (SED)

Sistemas a Eventos Discretos (SED) são sistemas caracterizados por uma dinâmica definida pela ocorrência assíncrona de eventos que geram mudanças de estados discretos [Miyagi, 1996]. Os *eventos* ocorrem de modo instantâneo e assincronamente, quando então o estado do modelo se modifica, permanecendo constante até a ocorrência de outro evento.

Desta forma, o objeto de controle de SED apresenta estados discretos e eventos instantâneos. O controle empregado é qualitativo, envolvendo um número finito de informações, ditas informações discretas e a estrutura de controle não precisa ser necessariamente em malha fechada, isto é, com utilização de realimentação. No caso de controle em malha aberta, não há realimentação de informações para uma compensação de erros.

Os SEDs possuem um conjunto discreto de estados que, ao contrário de sistemas físicos, utilizam como modelos, valores simbólicos ao invés de valores reais. As relações entre transições de estado e eventos normalmente não podem ser descritas por

equações diferenciais ou de diferenças, como a maioria dos sistemas físicos [Kumar, Garg, 1995].

Numa abstração lógica ou qualitativa, o comportamento de um sistema a eventos discretos (SED) é descrito por um conjunto de todas as seqüências de estados possíveis. Deste modo, um sistema a eventos discretos (SED) pode ser chamado de determinístico se a ocorrência de um evento em um estado corrente implica em um próximo estado unicamente determinado [Kumar, Garg, 1995].

Pode-se então dizer que os sistemas a eventos discretos são modelados de modo que suas variáveis de estado mudam de valor, em instantes determinados do tempo, quando ocorrem os eventos, e cujos valores seguintes podem ser calculados diretamente a partir dos valores anteriores, independentemente do intervalo de tempo entre dois estado subseqüentes [Miyagi, 1996].

2.2. Modelo e Modelagem

Segundo Seila [1995], um modelo é uma abstração e representação simplificada de um sistema. O modelo representa os componentes mais importantes do sistema e a forma como eles interagem.

Portanto, um modelo deve conter apenas as características estritamente necessárias para capturar a essência do sistema, dentro dos propósitos para o qual foi concebido, ou, em outras palavras, não se deve prender a detalhes desnecessários.

Modelos podem ser classificados como sendo físicos ou matemáticos. Os primeiros são réplicas físicas construídas para propósitos específicos. Já um modelo matemático utiliza uma notação simbólica e relações matemáticas para representar um sistema. Um modelo de simulação é um tipo particular de modelo matemático de um sistema [Banks, et al., 1996].

Sob esta ótica, modelos podem ainda ser classificados como instantâneos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos, e discretos ou contínuos. Os modelos instantâneos representam sistemas que não dependem de ocorrências passadas. Já

modelos de simulação dinâmicos representam sistemas que se comportam em função dos eventos presentes e passados.

Modelos que não contêm variáveis aleatórias são classificados como determinísticos. Estes modelos apresentam um conjunto conhecido de entradas, as quais resultarão em um conjunto único de saídas. Por outro lado, modelos estocásticos possuem uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, que resultam em saídas aleatórias. Assim, as saídas de um modelo estocástico devem ser tratadas como estimativas estatísticas das características reais de um sistema.

Portanto, um modelo estocástico é um modelo cujo comportamento não pode ser predito com valores fixos, mas que é sujeito a aleatoriedades [Bennett, 1995]. A maioria dos modelos aproximados usa o paradigma do “*entity-attribute-set*” (conjunto de atributos da entidade), onde um sistema é considerado como sendo composto por entidades, as quais possuem atributos que são itens de informação a respeito da entidade.

Finalmente, os modelos contínuos são caracterizados pelo fato de que, em um intervalo finito de tempo, suas variáveis de estado mudam seus valores continuamente, isto é, suas características devem ser observadas a todo instante de tempo. Estes tipos de modelos são representados normalmente por equações diferenciais. Já os modelos discretos têm suas variáveis de estado alteradas somente em intervalos de tempo determinados, com a ocorrência de eventos. Este tipo de modelo também pode ser uma discretização dos modelos contínuos [Cellier, 1991].

Modelos discretos e contínuos são definidos, portanto, de acordo com as mesmas considerações que definem se um sistema é contínuo ou a eventos discretos [Banks, et al., 1996], definidos no item 2.1. Contudo, modelos de simulação discreta não são usados apenas para modelar sistemas a eventos discretos, nem modelos de simulação contínua são exclusivos para modelar sistemas contínuos. Modelos de simulação são, de fato, muito úteis para a análise em conjunto de fenômenos discretos e contínuos. A escolha de qual deles utilizar é função das características do sistema e do objetivo do estudo.

A concepção destes modelos (ou modelagem) envolve o processo de organização do conhecimento sobre um dado sistema [Cellier, 1991]. Isto é, no início, o conhecimento sobre um sistema é completamente desestruturado. Pelo entendimento do que são causas e do que são efeitos, através de observações da ordem tanto espacial como temporal, este conhecimento reunido é organizado e estruturado.

Shannon [1975] fornece uma visão mais filosófica de “arte da modelagem”, em que a “arte” é realçada pela habilidade de abstrair as características essenciais do problema, selecionar e modificar a admissão de hipóteses básicas que caracterizam o sistema, e então elaborar e enriquecer a abstração até a obtenção de resultados aproximados adequados. Portanto, parte-se de um modelo simples e realiza-se sucessivos aprimoramentos, aumentando sua complexidade.

Entretanto, a complexidade do modelo não deve exceder àquela requerida para o alcance do propósito para o qual é realizada a modelagem, que somente acarretaria em elevação dos custos. No desenvolvimento de modelos, somente a essência do sistema real deve ser considerada [Banks, et al., 1996].

Para o processo de modelagem, Bennett [1995] indica a seguinte sequência:

- Análise do sistema a ser modelado e definição dos objetivos a alcançar com a simulação;
- Definição do modelo;
- Coleta dos dados pertinentes;
- Construção, verificação e validação o modelo;
- Análise dos resultados obtidos.

Esta sequência de execução também é válida para a modelagem de sistemas complexos (sistema metroviário de São Paulo, por exemplo) visando a simulação por eventos discretos, que envolve os elementos construtivos básicos como: *entidades*, *atributos*, *atividades*, *estados* e *eventos*. Neste tipo de simulação, um modelo complexo pode ser concebido em termos de seus *estados*, das *entidades* que fluem através do sistema (que podem representar também os recursos do sistema) e das *atividades* e

eventos que causam a mudança do estado do sistema. Nesta modelagem, considera-se principalmente a dinâmica e a natureza estocástica (relação entre tempo e elementos aleatórios) dos sistemas [Banks, et al., 1996].

Existem três abordagens de modelagem correntes em evidência, sendo as duas primeiras mais populares, especialmente na América do Norte, enquanto a terceira tem encontrado maior aceitação na Europa. As diferenças entre cada método de abordagem recaem no modo em que cada modelo é ativado e mantido em operação em cada caso [Bennett, 1995]. Estas abordagens, segundo o autor, são:

- Modelos Orientados a *Entidades* (Interação de Processos):

Esta abordagem enfatiza as *entidades* entrando no ambiente do modelo. Preocupa-se principalmente em seguir seus progressos ao longo de todo o modelo, registrando todas as mudanças, atrasos, esperas e tempos de trabalho relacionados a estas *entidades*, até que elas deixem os limites do modelo. Funções estatísticas estão garantidas, dentre outras coisas, para o tempo médio de espera em todas as filas, para o número de entidades processadas pelo modelo, e para a utilização das facilidades envolvidas no processamento das transações.

- Modelagem Baseada em *Eventos*:

Este tipo de modelagem evolve a dependência do comportamento do modelo em função de *eventos* que ocorrem durante a execução da dinâmica da simulação. *Entidades* entram no ambiente do sistema, e movem-se para pontos específicos pré-determinados. Os *eventos* do modelo são os meios pelos quais o movimento das entidades é efetuado de um ponto para outro. Quando o instante para a ocorrência de um *evento* é alcançado, duas ações devem ser satisfeitas. Primeiramente, o *evento* deve ser processado, que significa que todas as ações listadas para serem efetuadas neste instante de tempo são imediatamente executadas. Em segundo, os instantes de ocorrência dos *eventos* são os únicos pontos nos quais mudanças de *estado* ocorrem, assim, o novo estado indica quais serão os próximos *eventos* que deverão ocorrer. Desta

forma, a sequência interativa de *eventos* define o comportamento dinâmico do modelo.

A Modelagem Baseada em *Eventos* é relativamente fácil de ser assimilada e aplicada, como um conceito, mas é também considerada muito limitada para a modelagem de sistemas complexos, uma vez que não apresenta flexibilidade suficiente para identificar *eventos* e *estados* de diferentes complexidades.

- Ciclos de Atividades:

A última das três abordagens para modelagem de SED a ser considerada é o modo de operação baseado em atividades ou discriminação de atividades. Este método é centrado nas atividades, definidas como um estado ativo das *entidades*, limitado por dois *eventos*, um anterior e outro posterior à atividade. Estes são *eventos* de início de atividade e *eventos* de fim de atividade. Isto implica que as atividades não podem ocorrer a menos que todas as *entidades* requeridas estejam disponíveis. Além disso, também implica que as *entidades* envolvidas em uma atividade não podem ser liberadas até que a atividade cesse. A cada ocorrência dos *eventos*, as atividades são verificadas para identificar se alguma pode ser iniciada. Com a ocorrência de um *evento* de início de atividade, uma alteração de *estado* ocorre nas *entidades* associadas, de inativa para ativa. Entretanto, na ocorrência de *eventos* de fim de atividade, a alteração de *estado* se dá de ativa para inativa.

Neste trabalho serão considerados modelos discretos, dinâmicos e estocásticos, que, em função das características operacionais do sistema metroviário de São Paulo, se apresentam como potencialmente adequados para sua análise, sob uma abordagem de modelos orientada a *entidades*.

2.3. Simulação

Simulação pode ser descrita como a “arte” pela qual pode-se verificar o comportamento de sistemas reais ou hipotéticos, com o auxílio do computador. Ela pode ser descrita também, como uma técnica ou um conjunto de técnicas pelas quais se analisa do comportamento de um sistema, real ou hipotético [Bennett, 1995].

A simulação é ainda definida como uma imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real, ao longo do tempo [Banks, et al., 1996]. Esta envolve a geração de uma “história artificial” de um sistema, e a observação desta “história artificial” para determinar interferências considerando as características de operação do sistema real.

Pode ser também entendida como a realização de experimentos em um modelo, [Cellier, 1991]. Segundo este autor, experimentos visam extrair dados de um sistema pela imposição de diferentes entradas no mesmo. Neste ponto, ressalta-se a importância do sistema ser “controlável” e “observável” (conceitos apresentados no item 2.1 referente a sistemas) para a realização destes experimentos.

O comportamento de um sistema e sua evolução no tempo são estudados pelo desenvolvimento de modelos de simulação. Este modelo geralmente toma a forma de um conjunto de admissões de hipóteses considerando a operação do sistema. Estas admissões de hipóteses são expressas em relações matemáticas, lógicas e simbólicas entre as *entidades*, ou objetos de interesse, do sistema. Assim, alterações potenciais no sistema podem ser primeiro simuladas para poder predizer seus impactos sobre o desempenho do sistema [Banks, et al., 1996].

Entretanto, segundo Cellier [1991], a simulação é a única técnica disponível, além da experimentação dos próprios sistemas reais, para a análise do comportamento arbitrário dos sistemas. Técnicas analíticas são evidentemente úteis, mas requerem suposições de um conjunto de simplificações antes de se tornarem aplicáveis, suposições que nem sempre podem ser justificadas, e mesmo quando podem, esta justificativa só poderia ser verificada por experimentações ou simulações. Em outras palavras, simulação nunca é utilizada sozinha, mas em conjunto com técnicas analíticas.

Assim, segundo Bennett [1995], a simulação é uma das mais poderosas ferramentas de análise disponível para projeto e operação de processos ou sistemas. O processo de simulação antes da implantação do sistema real é muito importante, pois permite a aceleração do efetivo funcionamento do sistema no tempo, prevenindo erros que podem ocorrer quando da implantação de um sistema real e poupando recursos financeiros, pois dispensa a construção de protótipos para testes.

Permite ainda, durante o desenvolvimento do projeto de uma nova planta, prever gargalos, definir o melhor arranjo físico e até determinar um melhor índice de produtividade dos funcionários. Também pode ser útil em qualquer uma das fases do ciclo de vida de um sistema: desde a fase de análise do problema e definição de requisitos, até as fases de projeto, justificação, implementação e operação.

As técnicas de simulação permitem inferências sobre atividades nos sistemas tais como: identificação de problemas, utilização da capacidade instalada, níveis de inventário, lógica de controle, comparação com o desempenho de outros sistemas, refinamento de projeto, integração, alternativas de seqüenciamento, inicialização de equipamentos, treinamento dos operadores, etc. Devido a sua grande versatilidade e flexibilidade, a simulação é largamente utilizada em operações técnicas e atividades de pesquisa. Algumas das muitas áreas de aplicação da simulação são: sistemas de computação, sistemas de manufatura, negócios, entidades governamentais, ecologia e meio-ambiente, sociedade e comportamento, biociências, etc [Bennett, 1995].

Além disto, a simulação de modelos pode ser utilizada tanto como uma ferramenta de análise para prever o efeito de mudanças em sistemas já existentes, mas também como uma ferramenta de projeto, para prever o desempenho de novos sistemas sob um conjunto variado de circunstâncias [Banks, et al., 1996].

2.3.1. Simulação de Sistemas a Eventos Discretos

A simulação de sistemas a eventos discretos é própria para a análise de sistemas no qual o *estado* (discreto) das variáveis muda apenas com a ocorrência de eventos (considerados instantâneos) [Banks, et al., 1996]. Os modelos de simulação, neste caso, são analisados por métodos numéricos e empregam procedimentos computacionais para “executar” modelos matemáticos, ao contrário dos métodos analíticos, que empregam o raciocínio dedutivo/matemático para resolver um modelo.

Deste modo, modelos de simulação discreta são executados com base nas suposições assumidas para o modelo de SEDs. Resultados e observações são colhidos para serem analisados e estimados para medir o desempenho do sistema real. Como modelos do mundo real para simulação são complexos e há grande quantidade de informações a serem manipuladas, utiliza-se computadores para a execução da simulação.

As ferramentas de simulação discreta desenvolvidas por engenheiros e projetistas para estudo dos mais diversos sistemas apresentam uma evolução diretamente ligada com a tecnologia de suporte (hardware e software) disponíveis no momento de sua implementação, com a atual tendência de simuladores inteligentes e interativos com interface gráfica [Bennett, 1995].

No desenvolvimento de um modelo para simulação a eventos discretos, o modelador deve adotar uma “visão do mundo” para orientar o seu desenvolvimento. Neste contexto, destacam-se duas: a visão do agendamento de *eventos* e a baseada no fluxo de *entidades* [Banks, et al., 1996].

A abordagem de agendamento de eventos é a mais freqüentemente utilizada, onde se focaliza os eventos e em seus efeitos nos estados do sistema, utilizando uma variável de contagem de tempo. Em um determinado instante da simulação, após a ocorrência do *evento* correspondente e atualização do estado do sistema, o “clock” do simulador é incrementado para o tempo do próximo *evento* na FEL (lista de eventos futuros).

Por outro lado, a abordagem baseada no fluxo de *entidades* usa um incremento fixo de tempo e regras específicas para decidir se uma *atividade* pode ou não iniciar em um certo ponto do tempo de simulação. A implementação desta abordagem em um pacote de simulação é geralmente invisível ao modelador: *eventos* são gerados e agendados em uma FEL, *eventos* são colocados nas filas sempre que ocorre um atraso, suspendendo temporariamente a evolução de um processo enquanto outros processos continuam a sua evolução.

Já na abordagem de fluxo de *eventos*, concentra-se nas *atividades* sobre as *entidades* de um modelo e nas condições, simples ou complexas, que permitem o início das *atividades*. Em cada avanço do “clock”, as condições de cada *atividade* são verificadas e se estão satisfeitas (condições são verdadeiras), a *atividade* correspondente é iniciada.

A abordagem baseada no fluxo de *entidades* facilita o desenvolvimento de modelos modulares, que são de mais fácil manutenção por sua maior simplicidade de compreensão. Entretanto, admite-se que o procedimento repetitivo de determinar quando uma *atividade* pode iniciar despende mais tempo. Assim, a abordagem pura de fluxo de *entidades* tem sido modificada (conceitualmente, tem aumentado sua complexidade) para um procedimento dividido em etapas, que combinam algumas das características do agendamento de *eventos* com fluxo de *entidades*, para permitir a evolução do “clock” e evitar as verificações desnecessárias de certas condições, mas mantendo as principais vantagens da abordagem de fluxo de *entidades*.

Na modelagem realizada neste trabalho, a abordagem baseada no fluxo de *entidades* é adotada, dividindo o modelo em módulos menores, contendo sua própria lógica para o início de *atividades* específicas, independentemente da contagem geral do “clock”. Neste caso, a cada avanço do “clock”, as condições são verificadas para a execução ou não de determinada *atividade*.

2.4. Redes de Petri

A rede de Petri é uma ferramenta para o estudo de SEDs. A análise de uma rede de Petri pode revelar importantes informações sobre a estrutura e o comportamento dinâmico do sistema modelado. Estas informações podem então ser usadas para avaliar o sistema modelado e sugerir melhorias ou alterações. O desenvolvimento da teoria das redes de Petri é baseado na aplicação destas na modelagem de SEDs [Peterson, 1981].

Peterson [1981] apresenta uma visão matemática em que as redes de Petri são compostas por quatro partes: um conjunto de *lugares* (P), um conjunto de *transições* (T), uma função *entrada* (I), e uma função *saída* (O). As funções de *entrada* e *saída* relacionam os *lugares* às *transições*. A função *entrada* (I) é um mapeamento entre uma transição t_j e um conjunto de *lugares* $I_{(t_j)}$, conhecidos como os *lugares entrada* da *transição*. A função *saída* (O) é o mapeamento na transição t_j e uma coleção de *lugares* $O_{(t_j)}$, conhecidos como os *lugares saída* da *transição*.

Neste contexto, uma estrutura de rede de Petri (C) é definida por:

$$C = (P, T, I, O)$$

Considera-se:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ um conjunto finito de *lugares*, com $n \geq 0$;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ um conjunto finito de *transições*, com $m \geq 0$;

$I : T \rightarrow P^\infty$ uma função *entrada*;

$O : T \rightarrow P^\infty$ uma função *saída*.

Um *lugar* p_i é um *lugar entrada* de uma *transição* t_j se $p_i \in I_{(t_j)}$. Um *lugar* p_i é um *lugar saída* se $p_i \in O_{(t_j)}$. As entradas e as saídas de uma *transição* são “bags” de *lugares*. “Bag” é uma generalização do conceito de conjunto, que permite múltiplas ocorrências de um elemento deste “bag”. O uso de “bags”, ao invés de conjuntos, para as entradas e saídas de uma *transição* permite que um *lugar* seja uma entrada múltipla ou uma saída múltipla de uma *transição*. A multiplicidade de um *lugar entrada* p_i para

uma *transição* t_j é o número de ocorrências do *lugar* no “bag” de entrada da *transição*, $\#(p_i, I_{(t_j)})$. Similarmente, a multiplicidade de um *lugar saída* p_i para uma *transição* t_j é o número de ocorrências do *lugar* no “bag” de saída da *transição*, $\#(p_i, O_{(t_j)})$. Se as funções de entrada e saída fossem conjuntos (ao invés de “bags”), então a multiplicidade de cada *lugar* seria ou zero ou um.

As funções de entrada e saída podem ser estendidas para mapear *lugares* nos “bags” das *transições*. Define-se uma *transição* t_j como sendo uma entrada de um *lugar* p_i se p_i é uma saída de t_j . Uma *transição* t_j é uma saída do *lugar* p_i se p_i é uma entrada de t_j . Portanto:

$$I : P \rightarrow T^\omega$$

$$O : P \rightarrow T^\omega$$

de tal forma que: $\#(t_j, I_{(p_i)}) = \#(p_i, O_{(t_j)})$

$$\#(t_j, O_{(p_i)}) = \#(p_i, I_{(t_j)})$$

As Figura 2.1 e Figura 2.2 apresentam um exemplo da representação de uma estrutura de rede de Petri e a extensão das funções *entrada* e *saída*:

$$C = (P, T, I, O)$$

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$$

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$$

$$I_{(t_1)} = \{p_1\}$$

$$O_{(t_1)} = \{p_2, p_3\}$$

$$I_{(t_2)} = \{p_2, p_3\}$$

$$O_{(t_2)} = \{p_5\}$$

$$I_{(t_3)} = \{p_3\}$$

$$O_{(t_3)} = \{p_4\}$$

$$I_{(t_4)} = \{p_4, p_5\}$$

$$O_{(t_4)} = \{p_1\}$$

Figura 2.1 – Exemplo de representação de uma estrutura de rede de Petri

$$\begin{array}{ll}
 I_{(p_1)} = \{t_4\} & O_{(p_1)} = \{t_1\} \\
 I_{(p_2)} = \{t_1\} & O_{(p_2)} = \{t_2\} \\
 I_{(p_3)} = \{t_1\} & O_{(p_3)} = \{t_2, t_3\} \\
 I_{(p_4)} = \{t_3\} & O_{(p_4)} = \{t_4\} \\
 I_{(p_5)} = \{t_2\} & O_{(p_5)} = \{t_4\}
 \end{array}$$

Figura 2.2 – Extensão da função “entrada” e “saída” do exemplo

Existe ainda mais um conceito primitivo, como *lugar* e *transição*, a *marca*. Uma marcação (μ) é a atribuição de símbolos (*marcas*) aos *lugares* de uma rede de Petri, representando assim um *estado* do sistema. O número e a posição das *marcas* mudam durante a execução/simulação da rede de Petri. Na realidade, elas são utilizadas para definir esta execução [Peterson, 1981].

Uma marcação μ de uma rede de Petri $C = (P, T, I, O)$ é uma função que relaciona um conjunto de *lugares* P a inteiros não-negativos $/N$, $\mu: P \rightarrow /N$. Uma marcação (μ) pode também ser definida como um vetor $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$, onde $n = |P|$ e cada $\mu_i \in /N$, $i = 1, 2, \dots, n$. O vetor μ confere a cada *lugar* p_i , em uma rede de Petri, o número de *marcas* neste *lugar*. O número de *marcas* no *lugar* p_i é μ_i , $i = 1, 2, \dots, n$. As definições de uma marcação como uma função ou um vetor são relacionadas por $\mu_{(p_i)} = \mu_i$. Uma rede de Petri marcada $M = (C, \mu)$ é uma estrutura de rede de Petri $C = (P, T, I, O)$ e uma marcação μ , que pode também ser escrita como $M = (P, T, I, O, \mu)$.

Apesar da maioria dos trabalhos teóricos em redes de Petri serem baseados na sua concepção matemática, exposta anteriormente, representações gráficas das estruturas de redes de Petri são muito mais úteis neste trabalho. Os grafos de redes de Petri são as representações de suas estruturas como multi-grafos direcionados e bipartidos, e são equivalentes ao tratamento matemático apresentado anteriormente [Peterson, 1981].

Segundo Bruni, et al. [2001], grafos de redes de Petri são uma maneira efetiva de se representar os sistemas a eventos discretos (SEDs). Esta ferramenta possui dois

componentes básicos: os componentes passivos, representados por círculos, que são chamados de *lugares*; e os componentes ativos, representados por retângulos, que são chamados de *transições*. Além disto, as *marcas* são representadas por pontos no interior dos círculos que representam os lugares na representação gráfica das redes de Petri [Peterson, 1981] (vide Figura 2.3).

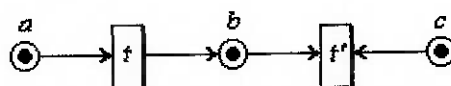


Figura 2.3 – Representação gráfica da estrutura de Redes de Petri

Os arcos orientados conectam os *lugares* e as *transições* (nós do grafo), sendo alguns destes arcos orientados de *lugares* para *transições* e outros de *transições* para *lugares* [Peterson, 1981]. Um arco orientado de um *lugar* p_i para uma *transição* t_j define o *lugar* como sendo uma entrada da *transição*. Entradas múltiplas para uma *transição* são indicadas por arcos múltiplos dos lugares entrada para a *transição*. Um *lugar saída* é indicado por um arco da *transição* para o *lugar*, assim como múltiplas saídas por arcos múltiplos.

Uma rede de Petri é um multi-grafo desde que permita múltiplos arcos de um nó do grafo para outro. Além disto, como os arcos são orientados, esta é um multi-grafo orientado. Uma vez que os arcos podem ser partidos em dois grupos (*lugares* ou *transições*), isto é, são orientados de um elemento de um grupo (*lugares* ou *transições*) para um elemento do outro grupo (*transições* ou *lugares*), esta rede de Petri é um multi-grafo direcionado e bipartido.

Na Figura 2.4 é apresentada a representação gráfica equivalente da rede de Petri matemática das Figura 2.1 e Figura 2.2, ilustrando os elementos deste tipo de representação, bem como a equivalência entre ambas as representações.

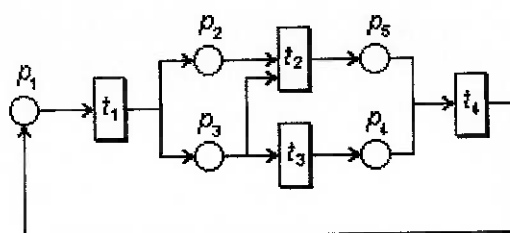


Figura 2.4 – Representação gráfica do exemplo apresentado nas Figura 2.1 e Figura 2.2

A execução de uma rede de Petri é controlada pelo número e pela distribuição das *marcas* nesta rede. As *marcas* residem nos *lugares* e controlam a execução das *transições* da rede. A execução se dá através de *disparo* de *transições*, que remove as *marcas* de seus *lugares* de entrada e cria novas *marcas* que são distribuídas para seus *lugares* de saída [Peterson, 1981]. Entretanto, uma *transição* somente será *disparada* se ela estiver *habilitada*, isto é, cada uma de suas entradas tem pelo menos o mesmo número de *marcas* que o de arcos orientados de *lugares* para a *transição* em questão, ou seja, quando suas “pré-condições” estão satisfeitas. Outra condição para o *disparo* desta *transição* é a de que os seus *lugares* de saída não estejam marcados, ou suas “pós-condições” estejam não satisfeitas. O número de *marcas* criadas a partir do *disparo* de uma *transição* é o mesmo do número de arcos orientados da *transição* para os *lugares* de saída, cada um destes recebendo uma *marca*. A Figura 2.5 apresenta um exemplo de disparo de transição.

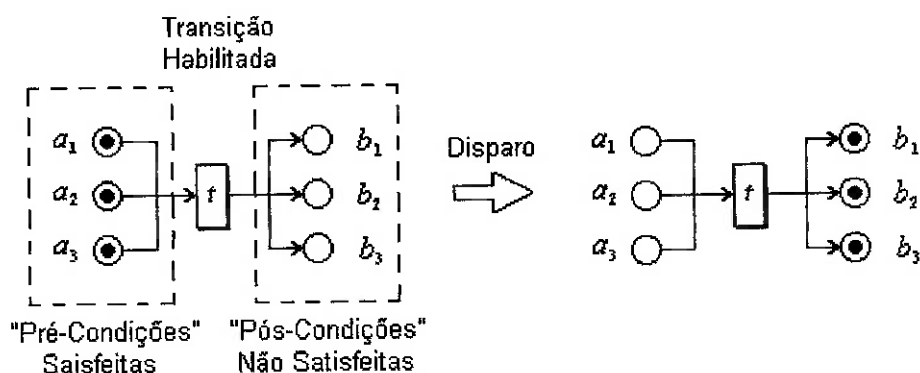


Figura 2.5 – Exemplo de “disparo” de uma “transição”

No exemplo apresentado, observa-se que todos os *lugares* de entrada estão marcados, assim como todos os *lugares* de saída não estão. Estas são as condições para que um *disparo* ocorra, como indicado.

O *disparo* de uma *transição* provoca a alteração da marcação μ de uma rede de Petri para uma marcação μ' . Esta marcação pode ser definida matematicamente por:

$$\mu'_{(p_i)} = \mu_{(p_i)} - \#(p_i, I_{(t_j)}) + \#(p_i, O_{(t_j)})$$

O *disparo* de *transições* pode continuar desde que exista pelo menos uma *transição habilitada*. Quando não existem mais *transições habilitadas*, a execução pára.

Nas redes de Petri, dois *eventos habilitados* e que não interagem entre si podem ocorrer independentemente, dado o paralelismo (ou concorrência) possibilitado por elas [Peterson, 1981]. No grafo, não há necessidade de sincronização de *eventos*, a menos que ela seja inerente ao sistema a ser modelado. Em uma abordagem assíncrona, a evolução da rede de Petri não é controlada pelo tempo, mas é considerada como uma sequência de *eventos* discretos.

Na Figura 2.6 é apresentado um exemplo de “paralelismo”, em que ambas as *transições* podem ser *disparadas* em qualquer ordem.

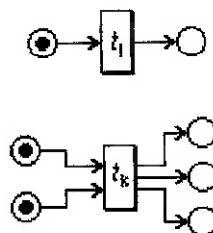


Figura 2.6 – Exemplo de “Paralelismo”

Uma outra situação, em que a simultaneidade interfere na evolução do sistema, está ilustrada na Figura 2.7. Nesta situação, as duas *transições habilitadas* estão em “conflito”.

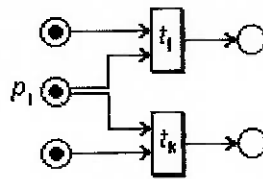


Figura 2.7 – Exemplo de “Conflito”

Apenas uma das *transições* pode *disparar*, tendo em vista que, no *disparo*, é removida a *marca* do *lugar* de entrada em comum, desabilitando a outra *transição*. Neste caso, a simultaneidade deve ser tratada definindo-se *eventos* para ocorrência não-simultânea [Peterson, 1981].

Existe uma propriedade dos *lugares* associada ao número de *marcas* em seus interiores, a *capacidade* (C). A *capacidade* de um *lugar* é definida por um número próximo ao *lugar* a que se refere e indica o número máximo de *marcas* que podem se alojar dentro do *lugar* correspondente (Figura 2.8).

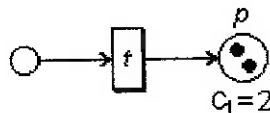


Figura 2.8 – “Capacidade” de lugares

No exemplo da Figura 2.8, o *lugar* p tem *capacidade* igual a 2, que indica que até duas *marcas* podem ser encontradas em seu interior.

Os arcos também possuem um atributo associado ao número de *marcas*, o *peso*. O *peso* é representado por um número (n) encontrado próximo ao arco a que se refere e indica o número de *marcas* distribuído de *lugares* para *transições* ou *transições* para *lugares* por meio deste arco. Este atributo é exemplificado na Figura 2.9:

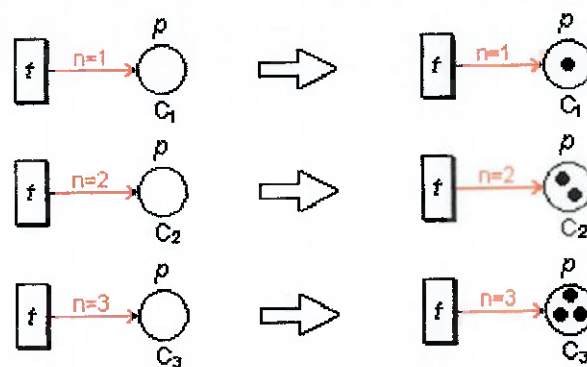


Figura 2.9 – Exemplos de “peso” de arcos

Além disto, os arcos podem ser ainda de dois outros tipos distintos: *arcos habilitadores* e *arcos inibidores*. Os *arcos habilitadores* permitem a execução de *disparo* da *transição* ao qual se refere, desde que todas as outras condições para sua execução estejam satisfeitas. Já os *arcos inibidores* impedem a execução do *disparo* da *transição* ao qual se refere, mesmo que todas as demais condições estejam satisfeitas. Estes arcos estão orientados de *lugares* para *transições*, sendo os primeiros representados por um arco e ponto cheio (Figura 2.10); e os últimos por um arco e ponto vazado (Figura 2.11).

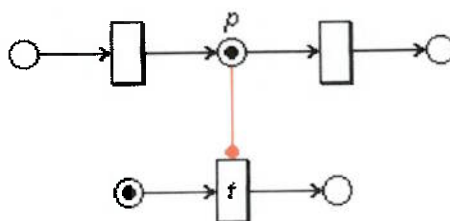


Figura 2.10 – Representação gráfica de “arcos habilitadores”

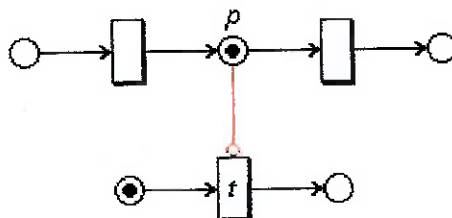


Figura 2.11 – Representação gráfica de “arcos inibidores”

No exemplo apresentado na Figura 2.10, o *disparo* da *transição t* somente ocorrerá se a mesma estiver habilitada, pela presença de uma *marca* no *lugar p*. Já no exemplo da Figura 2.11, o *disparo* da *transição t* somente ocorrerá se, e somente se, a *inibição* deixar de ser válida (saída da *marca* do *lugar p*).

O estudo das redes de Petri tem se desenvolvido em duas direções: na teoria das redes de Petri aplicadas e na teoria das redes de Petri puras [Peterson, 1981]. A teoria das redes de Petri aplicadas preocupa-se principalmente em aplicar as redes de Petri na modelagem de sistemas, sua análise e a percepção resultante do sistema modelado. Já a teoria de redes de Petri puras é o estudo das redes para o desenvolvimento de ferramentas básicas, técnicas e conceitos necessários para a aplicação das mesmas.

A aplicação prática das redes de Petri para o desenvolvimento e análise de sistemas pode ser alcançada de muitos modos. Em uma primeira abordagem, as redes de Petri são consideradas como ferramenta de análise auxiliar: técnicas convencionais de projeto são utilizadas para especificar o sistema, que então é modelado como uma rede de Petri e analisado. Numa segunda abordagem, todo o projeto e a especificação do processo são desenvolvidos em termos de redes de Petri.

3. Metodologia

A execução da simulação deve ser guiada desde a concepção do modelo do sistema em estudo, através do estudo dos objetivos e dos dados pertinentes disponíveis, até sua simulação propriamente dita e posterior análise.

Como uma primeira abordagem, é apresentado o procedimento de Bennett [1995] utilizado para execução de simulação a partir da implementação do modelo até o ponto onde os resultados da simulação são obtidos. Tal procedimento segue os passos apresentados na Figura 3.1:

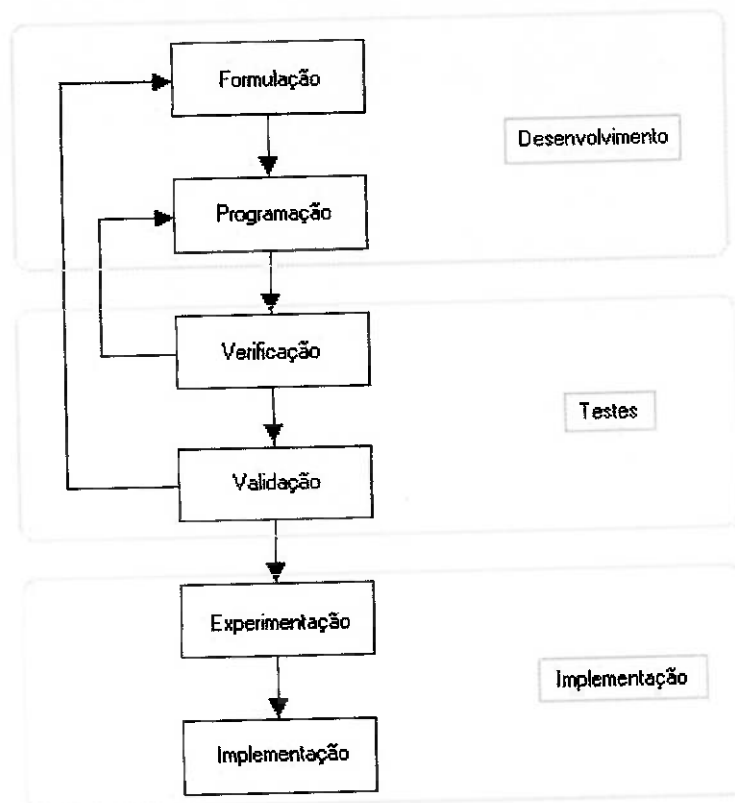


Figura 3.1 – Procedimento para simulação apresentado em Bennett [1995]

A implementação de um projeto de simulação baseado no diagrama apresentado envolve a execução de vários experimentos de simulação. Os estágios de um projeto de simulação são:

- **Desenvolvimento do Modelo:** O primeiro passo para a construção do modelo, até então, abstrato inicia-se com a especificação do comportamento do sistema real a ser modelado. Esta será formulada de modo que defina as hipóteses assumidas a respeito do funcionamento do sistema. O modelo formulado deve, então, ser editado em termos da ferramenta computacional disponível, isto é, deve-se programar o simulador, permitindo o início da série de testes com o modelo;
- **Teste do Modelo:** O comportamento do modelo é verificado sob condições específicas, assegurando uma execução compatível com o esperado, segundo as hipóteses assumidas. A verificação visa principalmente confirmar o comportamento desejado do modelo, relevando em princípio se o modelo representa um sistema real. O modelo passa, então, pela validação, uma série de verificações que determinam quão próximo este emula o sistema real;
- **Análise do Modelo:** Simulação dos modelos desenvolvidos, onde o comportamento do sistema real é analisado através de experimentos nos modelos. Segue uma etapa de teste de novas propostas, onde o modelo passa por reformulações para avaliar os requisitos do sistema real.

Além deste procedimento, é apresentado também o procedimento de Banks, et al. [1996]. Discussões dos passos e abordagens similares podem ser encontradas em outros trabalhos [Shannon, 1975; Gordon, 1969; Law & Kelton, 1991]. Este procedimento é apresentado na Figura 3.2:

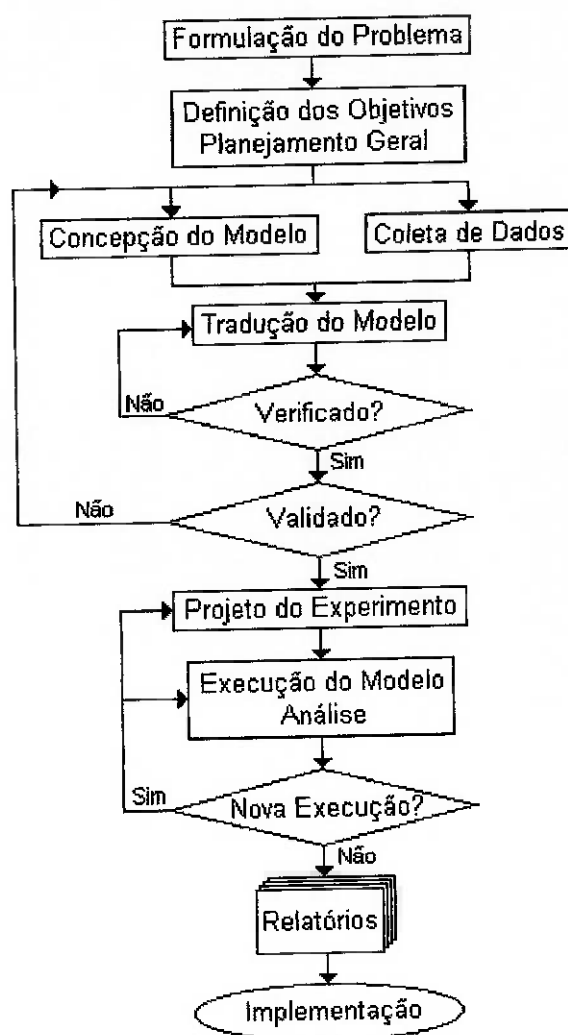


Figura 3.2 – Procedimento para análise de sistemas por simulação apresentado em Banks, et al. [1996]

Os passos para a implementação de modelos de acordo com o procedimento de Banks, et al. [1996] são:

- **Formulação do Problema:** Todo estudo deve ser iniciado com a definição do problema. Há ocasiões, no entanto, em que os problemas devem ser reformulados com o progresso dos estudos;
- **Definição dos Objetivos e Planejamento Geral:** Os objetivos indicam as questões a serem respondidas na simulação. O planejamento geral deve incluir uma declaração dos sistemas alternativos a serem considerados, e um método para avaliar a eficácia destas alternativas;

- **Concepção do Modelo:** Abstração das características principais do problema, seleção e modificação das hipóteses básicas que caracterizam o sistema, e enriquecimento e elaboração do modelo até a obtenção de resultados de aproximação úteis. Neste ponto, apenas a essência do sistema real é necessária;
- **Coleta de Dados:** Há um constante inter-relacionamento entre a construção do modelo e a coleta dos dados de entrada necessários [Shannon, 1975]. Como a complexidade do modelo varia, os dados requeridos também variam;
- **Tradução do Modelo:** Como a maioria dos sistemas do mundo real resulta em modelos que requerem grande tratamento de informações, o modelo deve ser traduzido para um formato computacional adequado;
- **Verificação:** Verificação do programa de computador preparado para a simulação do modelo. Se os parâmetros de entrada e a estrutura lógica do modelo estão corretamente representados, esta etapa é completada;
- **Validação:** é a determinação de que um modelo é uma representação precisa do sistema real. A validação é obtida pela calibração do modelo, um processo iterativo de comparação entre o comportamento do modelo e do sistema real, e pela implementação de melhorias no modelo. Este procedimento é repetido até a obtenção de precisão aceitável do modelo;
- **Projeto do Experimento:** As alternativas a serem simuladas devem ser determinadas. Para cada projeto de sistema que é simulado, decisões devem ser tomadas a respeito das variáveis de inicialização, da duração da execução da simulação e do número de repetições que devem ser feitas;
- **Execução do Modelo e Análise:** Execução do modelo, e subsequente análise, são utilizados para estimar medidas de desempenho do sistema projetado, que está sendo simulado;
- **Nova Execução:** Baseado nas análises das execuções completadas, determina-se se execuções adicionais são necessárias e que procedimento estes experimentos adicionais devem seguir;

- **Relatórios:** Existem dois tipos de documentação: do programa e do experimento. A documentação do programa (modelo de simulação) é imprescindível quando o programa é utilizado novamente, e é fundamental para a confiança no modelo de modo que se possa tomar decisões baseadas na análise dos dados gerados. Mais ainda, pode-se alterar parâmetros do modelo, visto que os relatórios dos experimentos fornecem a “história” do projeto de simulação. Já os relatórios de progresso explicitam a cronologia do trabalho realizado e das decisões tomadas. Os resultados das análises devem ser apresentados de forma clara e concisa em um relatório final, permitindo consulta da formulação final, dos critérios pelos quais alternativas de sistemas foram comparadas, dos resultados dos experimentos e da solução recomendada;
- **Implementação:** O sucesso da fase de implementação depende de como foram conduzidos os passos anteriores, assim como do processo de modelagem e simulação.

Este trabalho utiliza o procedimento de Banks, et al. [1996] previamente apresentado. Este procedimento é adotado por representar uma abordagem mais detalhada que o procedimento apresentado em Bennett [1995]. Além disto, cada etapa deste procedimento é claramente especificada, tornando esta abordagem mais simples e imediata de ser aplicada, sem depender de análises subjetivas para sua aplicação.

As ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho são o HPSim, software baseado em redes de Petri, e o ProModel, software baseado em teoria de filas.

Com o HPSim, explorando as características das redes de Petri, visa-se estudar a dinâmica de movimentação dos trens do sistema metroviário ao longo das três linhas em estudo neste trabalho.

Com o ProModel, que é baseado num modelo de filas, visa-se estudar a dinâmica de movimentação de usuários dentro das estações, desde sua entrada e embarque até seu desembarque e saída das mesmas.

4. Estudo de Caso: Sistema Metroviário de São Paulo

4.1. Formulação do Problema e Planejamento Geral

A operação do sistema metroviário pode ser explicada, basicamente, pela maneira como um trem atua entre duas estações consecutivas:

Primeiramente, um trem que se aproxima de uma estação, que até então permanecia livre, reduz sua velocidade e adentra a estação, parando junto às plataformas de embarque e desembarque. O trem abre as portas de seus vagões para a entrada de passageiros presentes na plataforma de embarque e saída dos passageiros que pretendem desembarcar nesta estação, pela plataforma de desembarque. O mesmo mantém suas portas abertas por um tempo predeterminado, de acordo com a capacidade e demanda de cada estação. O controle deste tempo é realizado por um centro de controle externo, o Centro de Controle Operacional do Metrô (CCO), também responsável pelo controle de tráfego de trens.

Transcorrido o tempo de embarque e desembarque, o trem emite um sinal que alerta aos usuários sobre o fechamento de suas portas. Após o fechamento completo das portas, o trem recebe a permissão do CCO para que deixe a estação e siga para a próxima estação, permanecendo no total um tempo aproximado de 20 segundos na estação. O trem deixa a estação aumentando sua velocidade gradualmente, até que a velocidade de cruzeiro seja atingida.

O CCO deve, então, coordenar o tráfego de trens entre as estações consecutivas, devendo comandar o aumento ou redução de velocidade dos trens, e até mesmo uma eventual parada, em momentos de excesso de trens em linha, para evitar acidentes. Os trens devem manter velocidades médias controladas para cumprir o trajeto entre estações em tempo médio de dois minutos: 30 km/h para linha 1 (Azul), 32 km/h para linha 2 (Verde) e 40 km/h para linha 3 (Vermelha). Em condições normais de operação, os trens percorrem todo o seu trajeto com velocidade praticamente constante até a estação consecutiva, sem interrupções.

A operação dos trens do sistema metroviário se dá nos dois sentidos de cada uma das três linhas abordadas neste trabalho (azul, verde e vermelha), coordenada pelo CCO. Nas extremidades de cada uma das linhas, os trens devem efetuar a inversão no sentido de linha, na qual os trens provenientes de um sentido da linha têm seu sentido alterado, para poder, então, percorrer a linha em sentido oposto.

Desta forma, a fim de se obter o menor tempo de deslocamento entre duas estações consecutivas, e, assim, conseguir reduzir o tempo de deslocamento de um usuário entre sua estação de origem e estação de destino, os fatores que influenciam neste tempo e que, portanto, devem ser monitorados são:

- Capacidade máxima de cada trem;
- Chegada de passageiros/minuto na estação. Este número influencia na fila de entrada de passageiros no trem, nos horários de pico;
- Número de passageiros que já estão no trem, quando este chega na estação;
- Número de passageiro que saem do trem, liberando espaço para novos passageiros;
- Número de passageiros que entram no trem, ou que conseguem entrar no trem, por estação/minuto. Este número está relacionado com o número de passageiros que estão no trem, que saem do trem, e sua capacidade máxima;
- Tempo de deslocamento do trem entre duas estações consecutivas;
- Tempo de parada dos trens em cada estação;
- Distúrbios, dentre os quais serão considerados inicialmente apenas os casos:
 - Atraso no fechamento das portas, devido a um imprevisto aleatório;
 - Problemas na linha, que impedem o trem de prosseguir.

Esta operação é descrita no fluxograma da Figura 4.1.

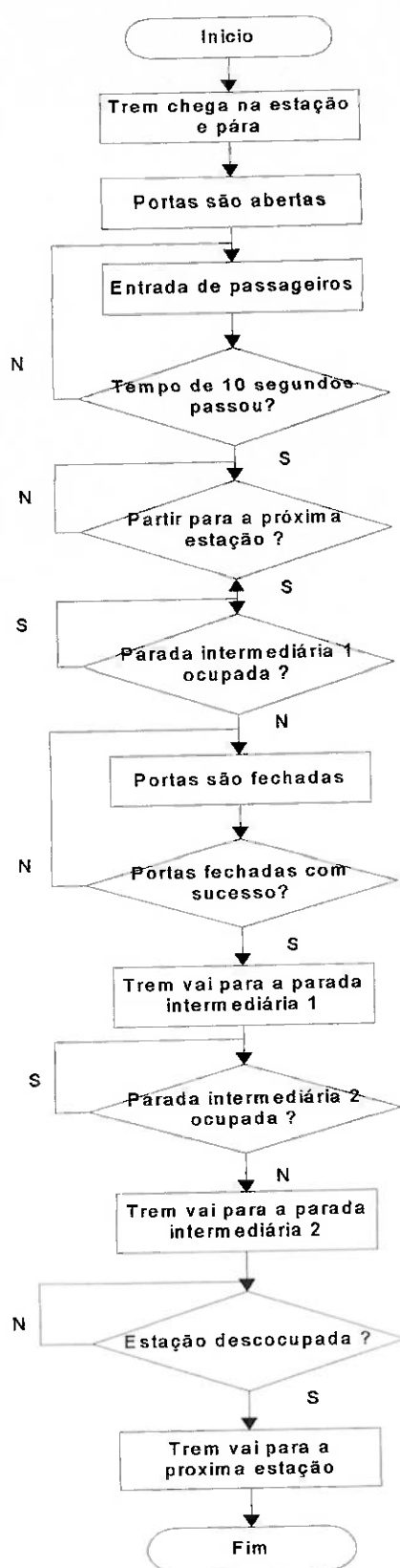


Figura 4.1 – Lógica do deslocamento de trens entre estações

A partir desta lógica de deslocamento entre duas estações consecutivas, pode-se verificar a influência que cada uma das variáveis descritas tem sobre o tempo total de deslocamento de um passageiro entre sua estação de origem e sua estação de destino.

Evidentemente, esta operação típica deve ser considerada para cada trecho do sistema metroviário, assim como as interfaces entre as linhas devem ser consideradas.

Algumas hipóteses simplificadoras são consideradas: no percurso entre duas estações consecutivas, o número máximo de trens é de dois; os trens são distribuídos aleatoriamente ao longo das Linhas, no início da simulação; e são desconsideradas as operações especiais implantadas pelo CCO do Metrô em horários de pico, como a passagem de trens vazios na estação Sé para amenizar os problemas de superlotação de suas plataformas.

4.2. Levantamento de Dados

A seguir estão alguns dados gerais sobre as três linhas em funcionamento atualmente do Metrô, dados estes apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Dados obtidos frente à Companhia do Metropolitano de São Paulo

Linhas	Linha Azul (L1)	Linha Verde (L2)	Linha Vermelha (L3)	Rede
Início da Operação Comercial	1974	1991	1979	-
Extensão atual das linhas (Km)	20,2	7,0	22,0	49,2
Estações	23	8	18	46 ²
Estações de transferência	3	2	1	3
Estações de integração com ferrovia	1	1 ³	4	6
Estações com terminais urbanos	8	1	9	18
Estações com terminais rodoviários	2	0	1	3
Número de carros da frota ⁴	306	0 ⁵	348	654
Carros utilizados nas horas de pico	270	66 ⁵	252	588
Intervalo mínimo entre trens (seg.)	108	158	101	-
Velocidade máxima (Km/h)	87	75	87	-
Velocidade comercial (Km/h)	30	32	40	-
Entrada de passageiros (milhões/ano) ⁶	214	46	244	503
Entrada de passageiros/Km de linha (milhões) ⁶	16,1	11,4	14,1	10,2

Para uma modelagem mais precisa do sistema, também é necessário conhecer o horário de funcionamento de todas as estações do metrô, desde a abertura até seu fechamento. Desta forma os horários de funcionamento de todas as estações estão apresentadas nas Tabela 4-2, Tabela 4-3 e Tabela 4-4, para as linhas Azul, Verde e Vermelha, respectivamente.

² As estações de transferência foram computadas nas duas linhas que atendem - Sé (L1 e L3), Ana Rosa (L1 e L2) e Paraíso (L1 e L2) - porém uma só vez no total da rede.

³ Integração realizada através da Ponte Orca.

⁴ Cada trem possui formação fixa de 6 carros.

⁵ A Linha 2-Verde opera com 66 carros da frota da Linha 3-Vermelha.

⁶ Dados relativos ao ano de 2001.

Tabela 4-2: Linha 1 (Azul) - Horário de funcionamento

Estação	Horário de Abertura	Horário de Fechamento
Jabaquara	4h40	00h13
Conceição	4h40	00h15
São Judas	4h40	00h17
Saúde	4h40	00h19
Praça da Árvore	4h40	00h21
Santa Cruz	4h40	00h23
Vila Mariana	4h40	00h25
Ana Rosa	4h40	00h27
Paraíso	4h40	00h26
Vergueiro	4h40	00h31
São Joaquim	4h40	00h33
Liberdade	4h40	00h35
Sé	4h40	00h29
São Bento	4h40	00h32
Luz	4h40	00h30
Tiradentes	4h40	00h28
Armênia	4h40	00h26
Tietê	4h40	00h24
Carandiru	4h40	00h22
Santana	4h40	00h20
Jardim São Paulo	4h40	00h18
Parada Inglesa	4h40	00h16
Tucuruvi	4h40	00h14

Tabela 4-3: Linha 2 (Verde) - Horário de funcionamento

Estação	Horário de Abertura	Horário de Fechamento
Ana Rosa	4h40	00h27
Paraíso	4h40	00h26
Brigadeiro	4h40	00h24
Trianon-Masp	4h40	00h22
Consolação	4h40	00h20
Clínicas	4h40	00h18
Sumaré	4h40	00h16
Vila Madalena	4h40	00h14

Tabela 4-4: Linha 3 (Vermelha) - Horário de funcionamento

Estação	Horário de Abertura	Horário de Fechamento
Corinthians-Itaquera	4h40	00h19
Artur Alvin	4h40	00h21
Patriarca	4h40	00h23
Guilhermina-Esperança	4h40	00h25
Vila Matilde	4h40	00h27
Penha	4h40	00h29
Carrão	4h40	00h31
Tatuapé	4h40	00h33
Belém	4h40	00h35
Bresser	4h40	00h35
Brás	4h40	00h33
Pedro II	4h40	00h31
Sé	4h40	00h29
Anhangabaú	4h40	00h27
República	4h40	00h25
Santa Cecília	4h40	00h23
Marechal Deodoro	4h40	00h21
Barra Funda	4h40	00h19

Os usuários podem passar de uma linha para outra nas estações Paraíso (Azul-Verde), Sé (Vermelha-Azul) e Ana Rosa (Azul-Verde) somente até as 24:00 horas.

Outro dado importante para a modelagem do sistema é a capacidade de absorção de passageiros por estação, por hora, nos horários de pico. Assim, estes dados estão apresentados nas Tabela 4-5, Tabela 4-6 e Tabela 4-7 a seguir, para as linhas Azul, Verde e Vermelha, respectivamente.

Um dado adicional a estas tabelas é a existência ou não de terminais de ônibus urbanos e rodoviários em cada estação, tendo em vista que a existência de terminais de ônibus urbanos implica em uma maior movimentação de passageiros advindos de regiões fora do alcance do Metrô, e de terminais rodoviários implica em picos de utilização da estação em vésperas e finais de feriados.

Tabela 4-5: Linha 1 (Azul) - Capacidade de passageiros/hora (nos horários de pico)

Estação	Capacidade de passageiros/hora	Terminal de Ônibus Urbano	Terminal Rodoviário
Jabaquara	20.000	X	X
Conceição	20.000		
São Judas	20.000		
Saúde	20.000		
Praça da Árvore	20.000		
Santa Cruz	20.000	X	
Vila Mariana	40.000	X	
Ana Rosa	40.000	X	
Paraíso	40.000		
Vergueiro	20.000		
São Joaquim	20.000		
Liberdade	20.000		
Sé	100.000		
São Bento	40.000		
Luz	40.000		
Tiradentes	20.000		
Armênia	20.000	X	
Tiete	20.000		X
Carandiru	20.000		
Santana	20.000	X	
Jardim São Paulo	20.000		
Parada Inglesa	20.000	X	
Tucuruvi	30.000	X	

Tabela 4-6: Linha 2 (Verde) - Capacidade de passageiros/hora (nos horários de pico)

Estação	Capacidade de passageiros/hora/pico	Terminal de Ônibus Urbano	Terminal Rodoviário
Ana Rosa	40.000	X	
Paraíso	40.000		
Brigadeiro	20.000		
Trianon-Masp	20.000		
Consolação	20.000		
Clínicas	20.000		
Sumaré	20.000		
Vila Madalena	20.000		

Tabela 4-7: Linha 3 (Vermelha) - Capacidade de passageiros/hora (nos horários de pico)

Estação	Capacidade de passageiros/hora/pico	Terminal de Ônibus Urbano	Terminal Rodoviário
Corinthians-Itaquera	60.000	X	
Artur Alvin	20.000	X	
Patriarca	20.000	X	
Guilhermina-Esperança	20.000		
Vila Matilde	20.000	X	
Penha	20.000	X	
Carrão	20.000	X	
Tatuapé	60.000	X	
Belém	20.000	X	
Bresser	20.000		
Brás	60.000		
Pedro II	20.000		
Sé	100.000		
Anhangabaú	20.000		
República	80.000		
Santa Cecília	20.000		
Marechal Deodoro	20.000		
Barra Funda	60.000	X	X

Os dados a seguir, na Tabela 4-8, foram obtidos junto à Coordenadoria de Tecnologia e Ações Institucionais da Companhia Metropolitana de São Paulo.

Tabela 4-8: Dados gerais

	Linha 1 – Azul	Linha 2- Verde	Linha 3 - Vermelha
Velocidade média dos trens	30 Km/h	32 Km/h	40 Km/h
Distância média entre estações	900 metros	1000 metros	1300 metros

Outras informações gerais são apresentadas:

- Tempo médio de percurso entre estações: 2 minutos;
- Tempo médio de permanência dos trens nas estações: 20 segundos;
- Tempo para troca de sentido de circulação de trens: 90 segundos;
- Capacidade máxima de passageiros em um carro do trem: 300 pessoas;
- Número de carros em uma composição do Metrô: 6 carros.

Nas Tabela 4-9 a Tabela 4-14 a seguir, tem-se o número de passageiros nos horários de pico da manhã e da tarde e no horário de menor demanda, para as três linhas em circulação atualmente, considerando-se os dois sentidos de cada linha.

Tabela 4-9: Demanda de passageiros da Linha 1 (Azul) – Jabaquara / Tucuruvi

	Demanda - Manhã			Demanda - Vale			Demanda - Tarde		
	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total
<i>Jabaquara</i>	10.512	0	10.512	2.204	0	2.204	3.544	0	3.544
<i>Conceição</i>	3.966	43	14.435	1.620	38	3.786	4.527	46	8.025
<i>São Judas</i>	2.104	237	16.302	954	90	4.650	1.994	106	9.913
<i>Saúde</i>	3.300	731	18.871	1.148	146	5.652	2.237	278	11.872
<i>Praça da Árvore</i>	1.433	601	19.703	1.039	194	6.497	2.173	214	13.831
<i>Santa Cruz</i>	2.773	1.691	20.785	2.735	337	8.895	4.753	652	17.932
<i>Vila Mariana</i>	1.733	1.337	21.181	1.415	334	9.976	3.636	706	20.862
<i>Ana Rosa</i>	858	1.852	20.187	1.120	629	10.467	2.994	620	23.236
<i>Paraiso</i>	3.184	6.337	17.034	5.360	2.322	13.505	20.476	2.378	41.334
<i>Vergueiro</i>	513	1.124	16.423	1.218	499	14.224	2.883	815	43.402
<i>São Joaquim</i>	673	2.396	14.700	989	502	14.711	2.638	2.312	43.728
<i>Liberdade</i>	279	645	14.334	829	443	15.097	1.805	876	44.657
<i>Sé</i>	12.858	8.814	18.378	4.599	9.840	9.856	6.598	31.800	19.455
<i>São Bento</i>	174	3.887	14.665	1.199	2.500	8.555	4.194	1.046	22.603
<i>Luz</i>	162	1.731	13.096	491	1.249	7.797	2.118	724	23.997
<i>Tiradentes</i>	75	2.438	10.733	139	475	7.461	921	870	24.048
<i>Armênia</i>	116	3.319	7.530	163	1.507	6.117	551	4.629	19.970
<i>Tiete</i>	242	2.178	5.594	161	1.682	4.596	2.114	3.156	18.928
<i>Carandiru</i>	18	934	4.678	19	589	4.026	105	2.062	16.971
<i>Santana</i>	45	2.586	2.137	14	2.186	1.854	278	7.191	10.058
<i>Jardim São Paulo</i>	21	467	1.691	9	263	1.600	65	1.069	9.054
<i>Parada Inglesa</i>	15	352	1.354	6	264	1.342	17	1.270	7.801
<i>Tucuruvi</i>	0	1.354	0	0	1.342	0	0	7.801	0

Tabela 4-10: Demanda de passageiros da Linha 1 (Azul) – Tucuruvi / Jabaquara

	Demanda - Manhã			Demanda - Vale			Demanda - Tarde		
	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total
<i>Tucuruvi</i>	9.124	0	9.124	1.247	25	1.247	1.512	0	1.512
<i>Parada Inglesa</i>	2.101	42	11.183	416	5	1.658	567	12	2.068
<i>Jardim São Paulo</i>	1.379	23	12.539	355	25	1.988	591	23	2.635
<i>Santana</i>	7.599	254	19.885	2.523	94	4.416	3.822	152	6.305
<i>Carandiru</i>	790	117	20.558	516	30	4.902	1.127	52	7.379
<i>Tiete</i>	3.714	296	23.976	1.506	94	6.314	474	320	7.533
<i>Armênia</i>	1.712	1.046	24.641	1.212	232	7.294	2.517	607	9.443
<i>Tiradentes</i>	885	1.549	23.978	689	98	7.885	2.835	101	12.178
<i>Luz</i>	442	1.100	23.320	1.412	335	8.961	3.302	220	15.259
<i>São Bento</i>	490	1.650	22.160	2.887	921	10.927	9.706	451	24.515
<i>Sé</i>	37.339	7.029	52.471	8.726	5.154	14.499	10.129	14.175	20.469
<i>Liberdade</i>	313	1.298	51.485	711	587	14.624	1.167	719	20.917
<i>São Joaquim</i>	511	4.987	47.009	703	1.150	14.178	1.030	2.347	19.600
<i>Vergueiro</i>	371	3.659	43.721	652	1.314	13.516	901	1.113	19.389
<i>Paraiso</i>	765	19.073	25.413	1.000	5.521	8.995	2.659	5.194	16.853
<i>Ana Rosa</i>	1.143	4.891	21.664	1.765	1.151	9.610	6.077	1.270	21.660
<i>Vila Mariana</i>	103	4.514	17.254	268	1.468	8.410	488	3.660	18.488
<i>Santa Cruz</i>	91	7.012	10.333	321	2.098	6.634	1.807	3.254	17.041
<i>Praça da Árvore</i>	351	1.357	9.326	161	820	5.974	971	1.577	16.435
<i>Saúde</i>	8	1.954	7.380	60	1.227	4.807	143	3.024	13.554
<i>São Judas</i>	52	2.022	5.410	25	852	3.980	78	2.035	11.597
<i>Conceição</i>	30	1.602	3.837	42	1.067	2.955	93	2.756	8.934
<i>Jabaquara</i>	0	3.837	0	0	2.955	0	0	8.934	0

Tabela 4-11: Demanda de passageiros da Linha 2 (Verde) – Ana Rosa / Vila Madalena

	Demanda - Manhã			Demanda - Vale			Demanda - Tarde		
	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total
<i>Ana Rosa</i>	5.796	0	5.796	1.977	0	1.977	2.009	0	2.009
<i>Paraiso</i>	16.659	0	22.455	5.274	0	7.251	5.096	0	7.105
<i>Brigadeiro</i>	266	5.155	17.566	650	2.006	5.895	909	1.379	6.636
<i>Trianon-Masp</i>	128	3.703	13.991	237	1.635	4.497	621	1.474	5.782
<i>Consolação</i>	82	5.936	8.137	197	2.234	2.460	627	2.502	3.907
<i>Clínicas</i>	9	5.426	2.720	26	1.426	1.060	6	1.387	2.526
<i>Sumaré</i>	0	1.000	1.720	197	305	952	11	539	1.998
<i>Vila Madalena</i>	0	1.720	0	0	760	192	0	1.998	0

Tabela 4-12: Demanda de passageiros da Linha 2 (Verde) – Vila Madalena / Ana Rosa

	Demanda - Manhã			Demanda - Vale			Demanda - Tarde		
	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total
<i>Vila Madalena</i>	1.851	0	1.851	967	0	967	2.855	0	2.855
<i>Sumaré</i>	444	26	2.270	343	18	1.292	1.397	9	4.243
<i>Clínicas</i>	1.343	124	3.489	1.547	30	2.809	3.246	30	7.459
<i>Consolação</i>	970	328	4.131	2.116	167	4.758	8.577	305	15.731
<i>Trianon-Masp</i>	628	310	4.449	1.711	259	6.209	7.175	557	22.349
<i>Brigadeiro</i>	674	345	4.778	1.319	627	6.901	4.995	856	26.488
<i>Paraiso</i>	0	3.240	1.538	0	4.888	2.013	0	17.706	8.782
<i>Ana Rosa</i>	0	1.538	0	0	2.013	0	0	8.782	0

Tabela 4-13: Demanda de passageiros da Linha 3 (Vermelha) – Corinthians-Itaquera / Barra Funda

	Demanda - Manhã			Demanda - Vale			Demanda - Tarde		
	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total
<i>Corinthians-Itaquera</i>	16.804	0	16.804	1.723	0	1.723	2.124	0	2.124
<i>Artur Alvin</i>	14.384	65	31.123	1.623	64	3.282	2.295	94	4.325
<i>Patriarca</i>	5.550	119	36.554	580	79	3.783	1.115	127	5.313
<i>Guilhermina-Esperança</i>	3.967	141	40.380	508	60	4.230	795	158	5.950
<i>Vila Matilde</i>	3.929	86	44.222	836	63	5.002	1.152	119	6.983
<i>Penha</i>	5.140	595	48.767	992	122	5.873	1.316	418	7.881
<i>Carrão</i>	5.441	1.650	52.558	1.270	242	6.901	2.323	687	9.517
<i>Tatuapé</i>	5.012	1.601	55.969	1.859	618	8.142	2.622	928	11.211
<i>Belém</i>	3.407	1.892	57.485	1.261	347	9.055	2.516	664	13.063
<i>Bresser</i>	969	2.364	56.089	853	269	9.638	2.464	1.258	14.269
<i>Brás</i>	14.705	1.392	69.402	2.108	639	11.107	2.811	3.381	13.699
<i>Pedro II</i>	1.019	846	69.575	466	92	11.481	1.174	215	14.658
<i>Sé</i>	8.793	42.959	35.409	6.563	6.520	11.523	15.101	7.421	22.337
<i>Anhangabaú</i>	573	8.533	27.448	725	2.045	10.203	2.174	1.594	22.918
<i>República</i>	240	7.338	20.350	742	3.241	7.704	1.691	1.930	22.679
<i>Santa Cecília</i>	118	3.881	16.586	207	847	7.064	685	892	22.472
<i>Marechal Deodoro</i>	140	3.849	12.878	248	1.707	5.606	736	2.529	20.680
<i>Barra Funda</i>	0	12.878	0	0	5.606	0	0	20.680	0

Tabela 4-14: Demanda de passageiros da Linha 3 (Vermelha) – Barra Funda / Corinthians-Itaquera

	Demanda - Manhã			Demanda - Vale			Demanda - Tarde		
	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total	Entrada	Saída	Total
<i>Barra Funda</i>	25.104	0	25.104	5.379	0	5.379	10.258	0	10.258
<i>Marechal Deodoro</i>	1.800	2.217	24.688	1.824	249	6.954	3.201	358	13.102
<i>Santa Cecília</i>	1.086	1.129	24.645	1.688	151	8.491	2.320	106	15.315
<i>República</i>	756	1.645	23.756	3.642	676	11.457	7.201	255	22.261
<i>Anhangabaú</i>	1.343	1.934	23.166	3.383	647	14.194	8.238	291	30.208
<i>Sé</i>	5.620	13.807	14.979	8.871	6.479	16.585	37.424	6.015	61.616
<i>Pedro II</i>	281	841	14.420	228	246	16.567	1.158	393	62.381
<i>Brás</i>	5.552	2.210	17.763	653	3.369	13.852	2.702	13.445	51.637
<i>Bresser</i>	251	5.825	12.189	309	952	13.209	1.864	4.188	49.314
<i>Belém</i>	329	2.398	10.120	393	1.468	12.135	1.624	4.146	46.791
<i>Tatuapé</i>	288	2.113	8.295	623	2.564	10.194	2.238	5.708	43.322
<i>Carrão</i>	247	3.099	5.442	294	1.885	8.603	1.149	5.814	38.656
<i>Penha</i>	180	1.344	4.279	115	1.380	7.338	416	5.228	33.844
<i>Vila Matilde</i>	67	787	3.560	73	1.082	6.329	256	3.877	30.223
<i>Guilhermina-Esperança</i>	77	547	3.090	48	755	5.622	129	3.491	26.860
<i>Patriarca</i>	54	647	2.497	41	909	4.754	177	3.947	23.090
<i>Artur Alvin</i>	0	1.488	1.009	28	2.826	1.956	93	14.600	8.583
<i>Corinthians-Itaquera</i>	0	1.009	0	0	1.956	0	0	8.583	0

A partir dos dados obtidos, pode-se obter os gráficos da demanda por estação nos horários de pico da manhã e da tarde, e no horário de vale, quando se tem a menor demanda do dia. Assim, pode-se comparar a demanda total de cada estação com sua capacidade, verificando o excesso de demanda em determinadas estações nos horários de pico.

4.2.1. Linha Azul

- Período da Manhã:

As Figura 4.2 e Figura 4.3 demonstram a demanda de passageiros nos dois sentidos da linha. Na Figura 4.4, tem-se a demanda total de cada estação comparada com sua respectiva capacidade. Em todas as figuras, “entrada” e “saída” representam os

totais de embarque e desembarque, respectivamente. O “volume transportado” é o total de passageiros transportados no trem e o “total” a quantidade de passageiros que circulam pelas plataformas da estação (total de embarques e desembarques). Todos os valores são relativos ao período de uma hora do horário de pico.

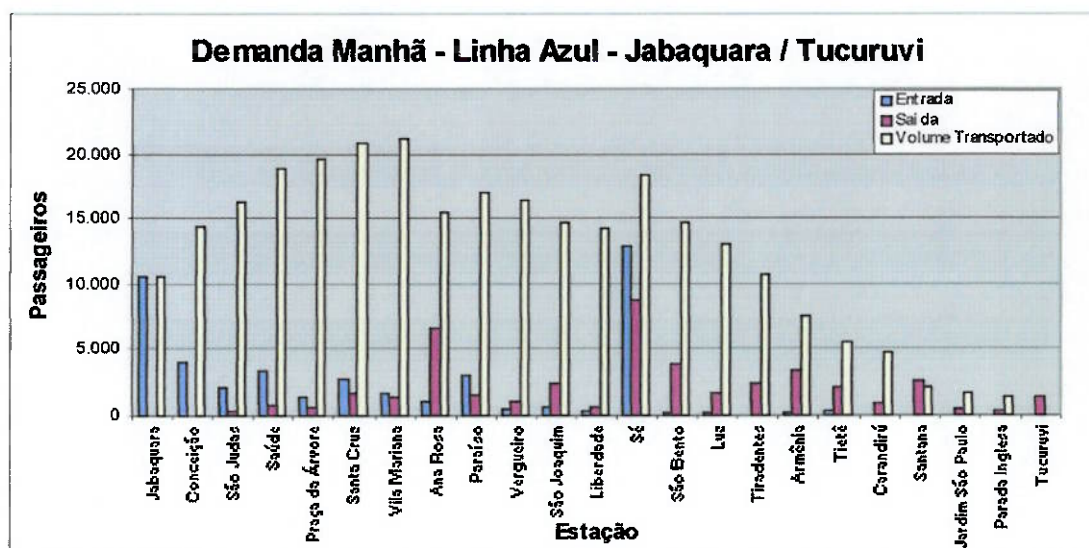


Figura 4.2 – Demanda Manhã – Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi

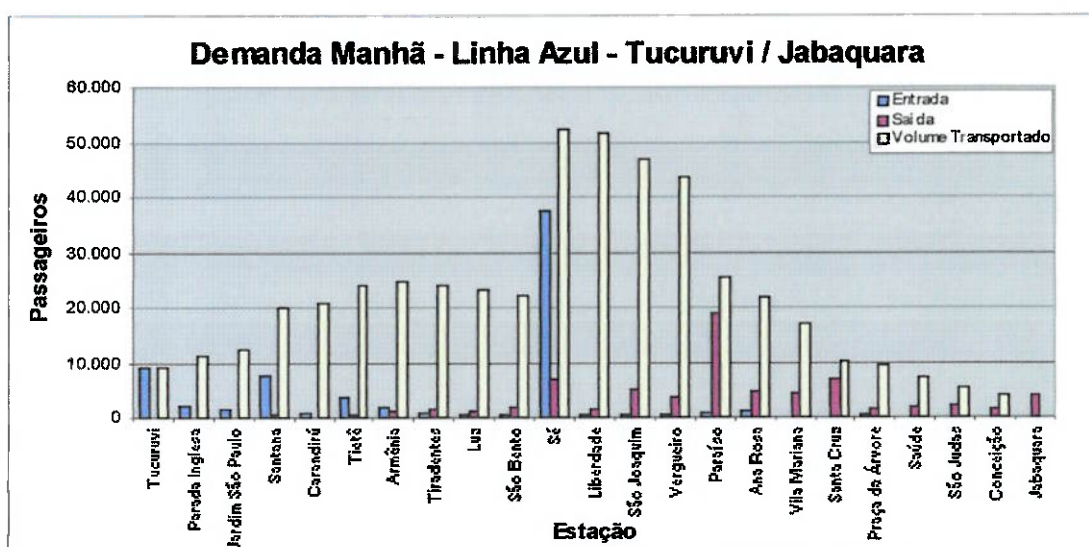


Figura 4.3 – Demanda Manhã – Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara

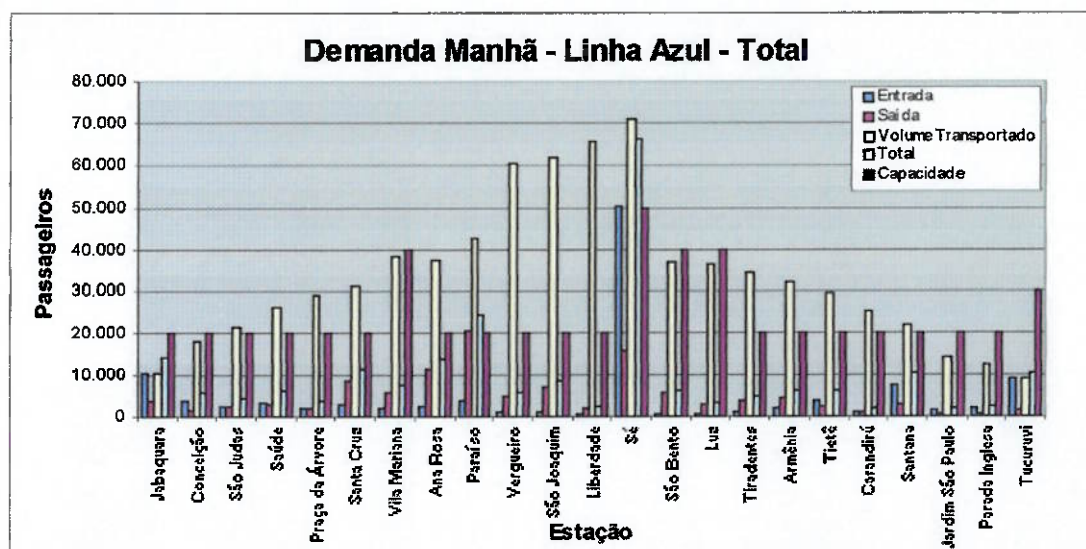


Figura 4.4 – Demanda Manhã – Linha Azul – Total

A partir do gráfico da Figura 4.4, pode-se observar que algumas estações apresentam uma demanda total de passageiros superior à sua capacidade total. Esta situação ocorre em quase todas as estações, expressando a superlotação destas, sendo elas:

- São Judas, Saúde, Praça da Árvore, Santa Cruz, Ana Rosa, Paraíso, Vergueiro, São Joaquim, Liberdade, Sé, Tiradentes, Armênia, Tietê, Carandiru e Santana.

- Período da Tarde:

As Figura 4.5 e Figura 4.6 demonstram a demanda de passageiros nos dois sentidos da linha. Na Figura 4.7, tem-se a demanda total de cada estação comparada com sua respectiva capacidade. Em todas as figuras, “entrada” e “saída” representam os totais de embarque e desembarque, respectivamente. O “volume transportado” é o total de passageiros transportados no trem e o “total” a quantidade de passageiros que circulam pelas plataformas da estação (total de embarques e desembarques). Todos os valores são relativos ao período de uma hora do horário de pico.

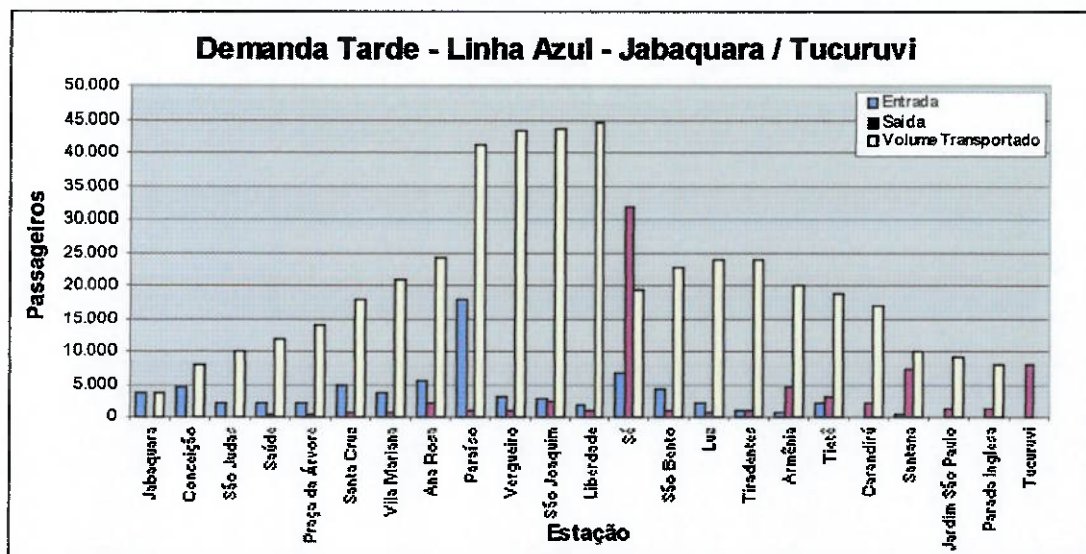


Figura 4.5 – Demanda Tarde – Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi

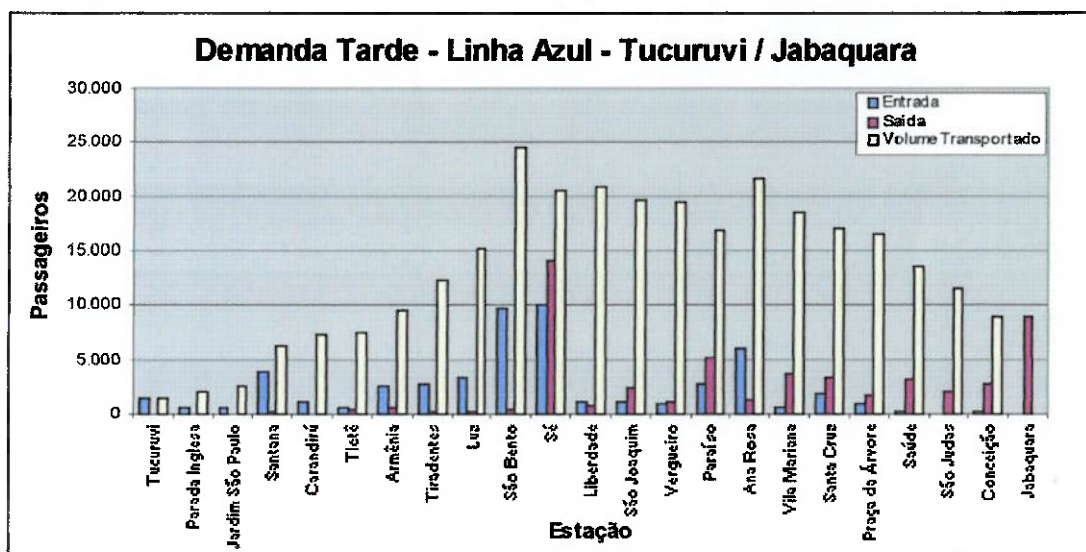


Figura 4.6 – Demanda Tarde – Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara

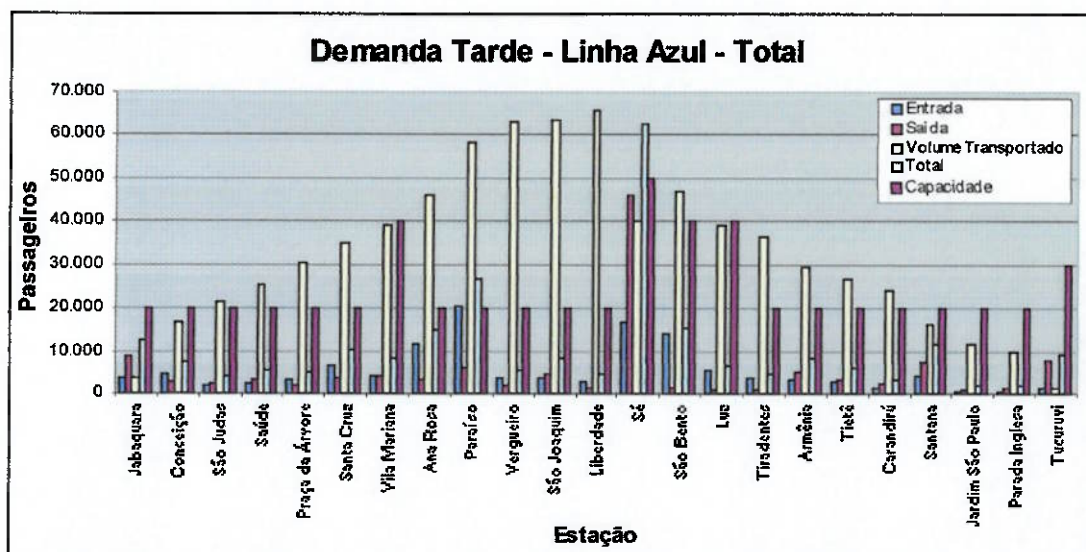


Figura 4.7 – Demanda Tarde – Linha Azul - Total

Observa-se o mesmo fato que ocorreu no período da manhã, quando várias estações apresentaram uma demanda de passageiros muito superior à capacidade total da estação. Neste caso, isto ocorreu nas seguintes estações:

- São Judas, Saúde, Praça da Árvore, Santa Cruz, Ana Rosa, Paraíso, Vergueiro, São Joaquim, Liberdade, Sé, Luz, Tiradentes, Armênia, Tietê e Carandiru.

4.2.2. Linha Verde

• Período da Manhã:

As Figura 4.8 e Figura 4.9 demonstram a demanda de passageiros nos dois sentidos da linha. Na Figura 4.10, tem-se a demanda total de cada estação comparada com sua respectiva capacidade. Em todas as figuras, “entrada” e “saída” representam os totais de embarque e desembarque, respectivamente. O “volume transportado” é o total de passageiros transportados no trem e o “total” a quantidade de passageiros que circulam pelas plataformas da estação (total de embarques e desembarques). Todos os valores são relativos ao período de uma hora do horário de pico.

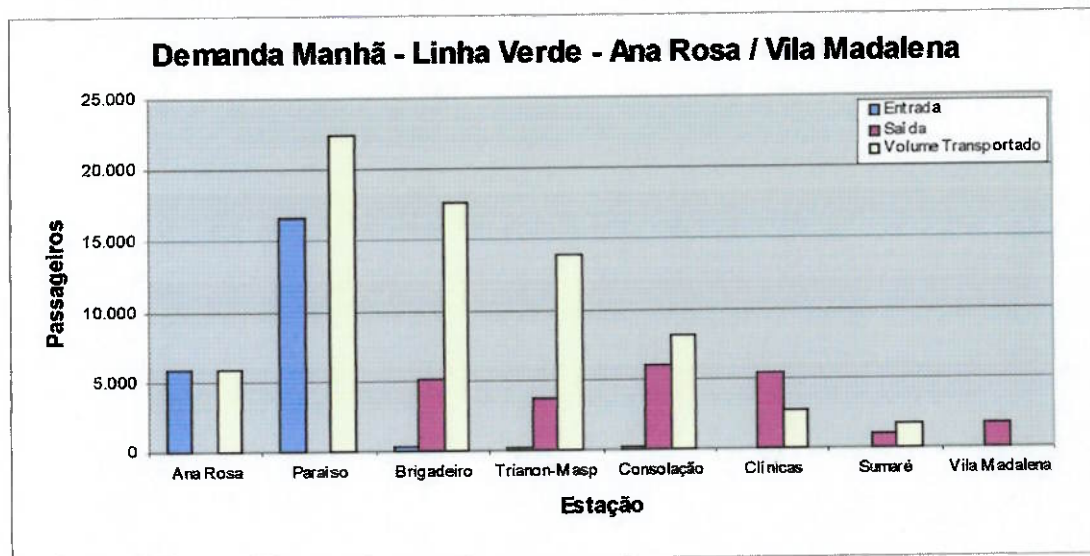


Figura 4.8 – Demanda Manhã – Linha Verde – Ana Rosa / Vila Madalena

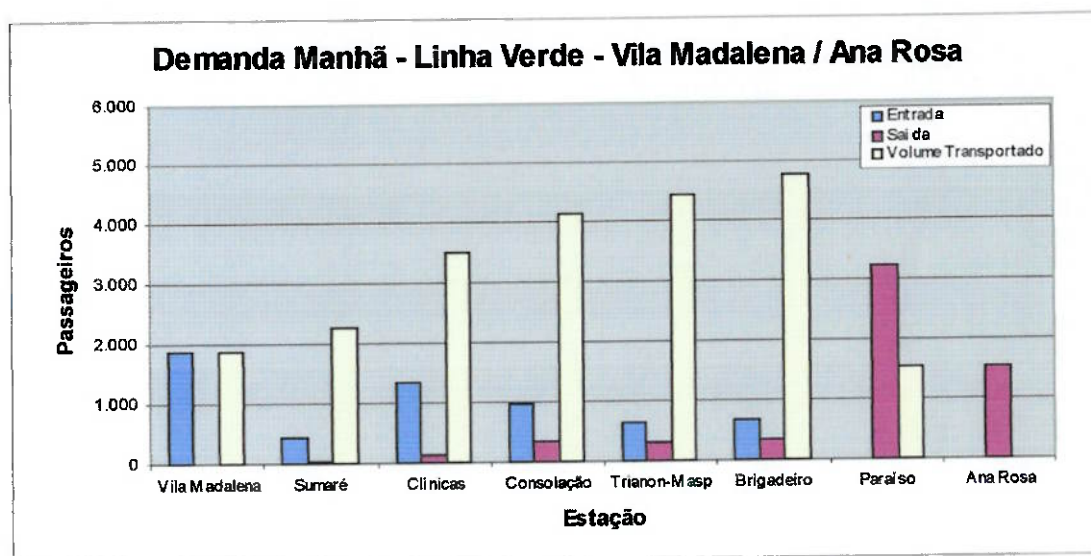


Figura 4.9 – Demanda Manhã – Linha Verde – Vila Madalena / Ana Rosa

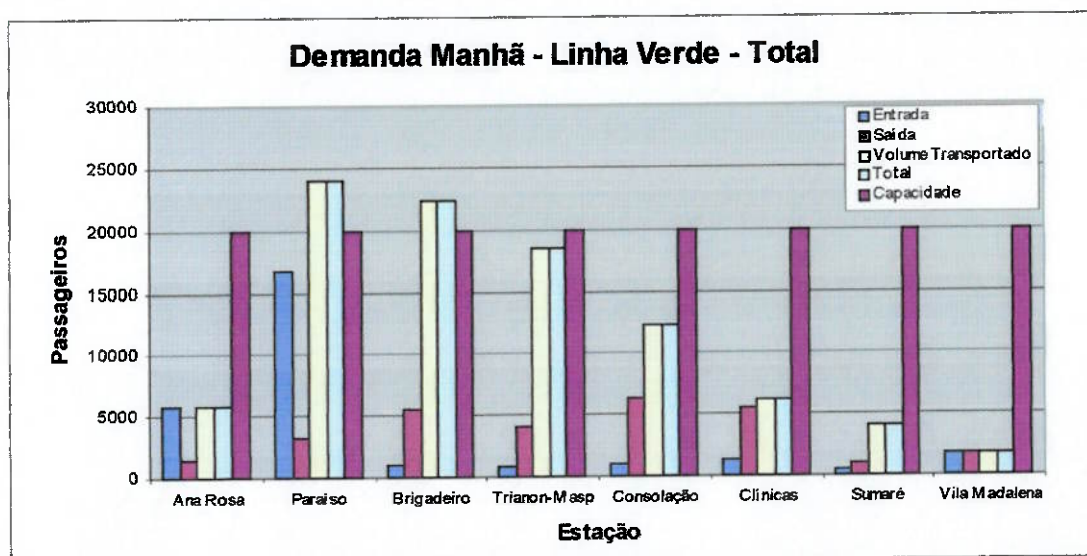


Figura 4.10 – Demanda Manhã – Linha Verde – Total

A partir do gráfico da Figura 4.10, pode-se observar que no período da manhã, apenas a capacidade total das estações Paraíso e Brigadeiro são ultrapassadas, indicando que esta linha do Metrô não apresenta aparentemente grandes lotações neste período.

- Período da Tarde:

As Figura 4.11 e Figura 4.12 demonstram a demanda de passageiros nos dois sentidos da linha. Na Figura 4.13, tem-se a demanda total de cada estação comparada com sua respectiva capacidade. Em todas as figuras, “entrada” e “saída” representam os totais de embarque e desembarque, respectivamente. O “volume transportado” é o total de passageiros transportados no trem e o “total” a quantidade de passageiros que circulam pelas plataformas da estação (total de embarques e desembarques). Todos os valores são relativos ao período de uma hora do horário de pico.

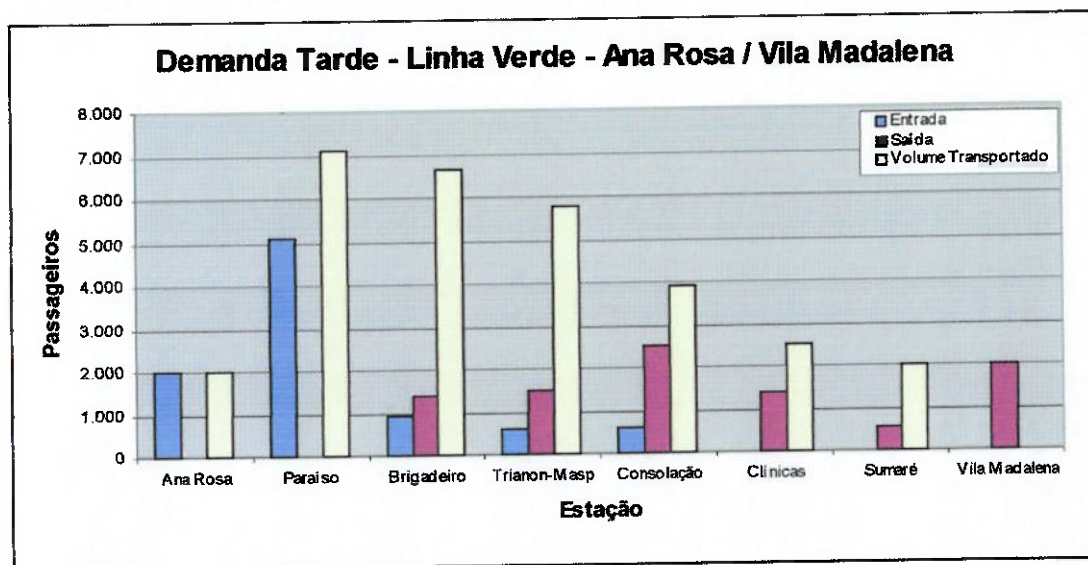


Figura 4.11 – Demanda Tarde – Linha Verde – Ana Rosa / Vila Madalena

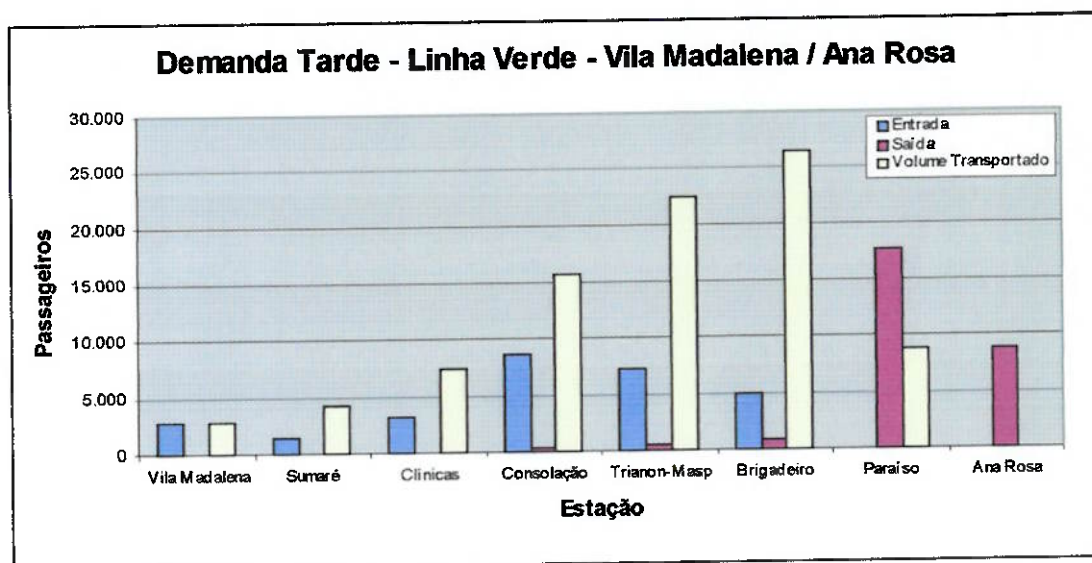


Figura 4.12 – Demanda Tarde – Linha Verde: Vila Madalena / Ana Rosa

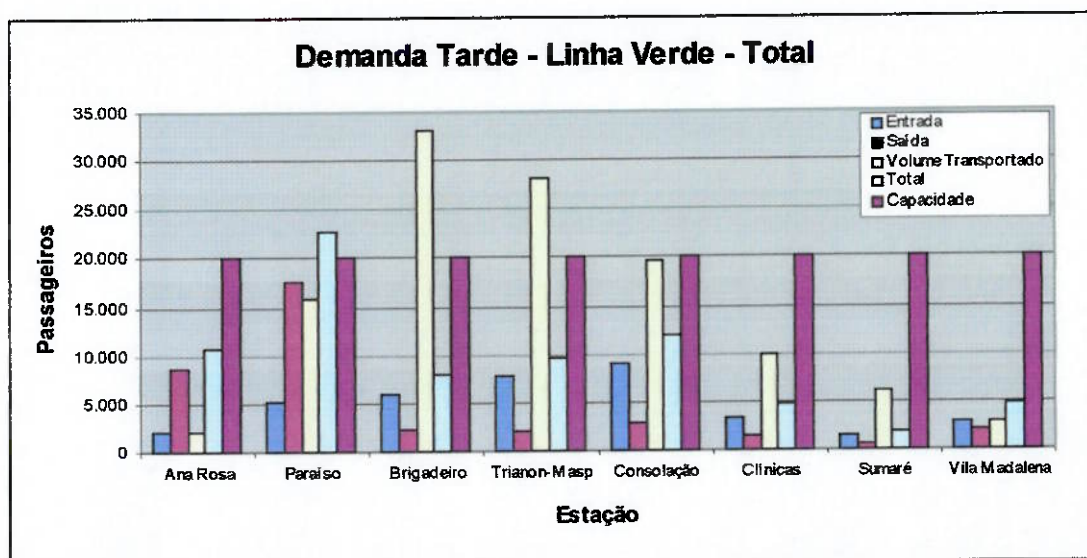


Figura 4.13 – Demanda Tarde – Linha Verde – Total

A partir do gráfico da Figura 4.13, pode-se observar que no período da tarde, a capacidade total das estações Paraíso, Brigadeiro e Trianon-Masp é ultrapassada, e a quantidade total de passageiros na estação Consolação está no limite, indicando que no período da tarde, esta linha do Metrô apresenta um movimento maior do que no período da manhã.

4.2.3. Linha Vermelha

- Período da Manhã:

As Figura 4.14 e Figura 4.15 demonstram a demanda de passageiros nos dois sentidos da linha. Na Figura 4.16, tem-se a demanda total de cada estação comparada com sua respectiva capacidade. Em todas as figuras, “entrada” e “saída” representam os totais de embarque e desembarque, respectivamente. O “volume transportado” é o total de passageiros transportados no trem e o “total” a quantidade de passageiros que circulam pelas plataformas da estação (total de embarques e desembarques). Todos os valores são relativos ao período de uma hora do horário de pico.

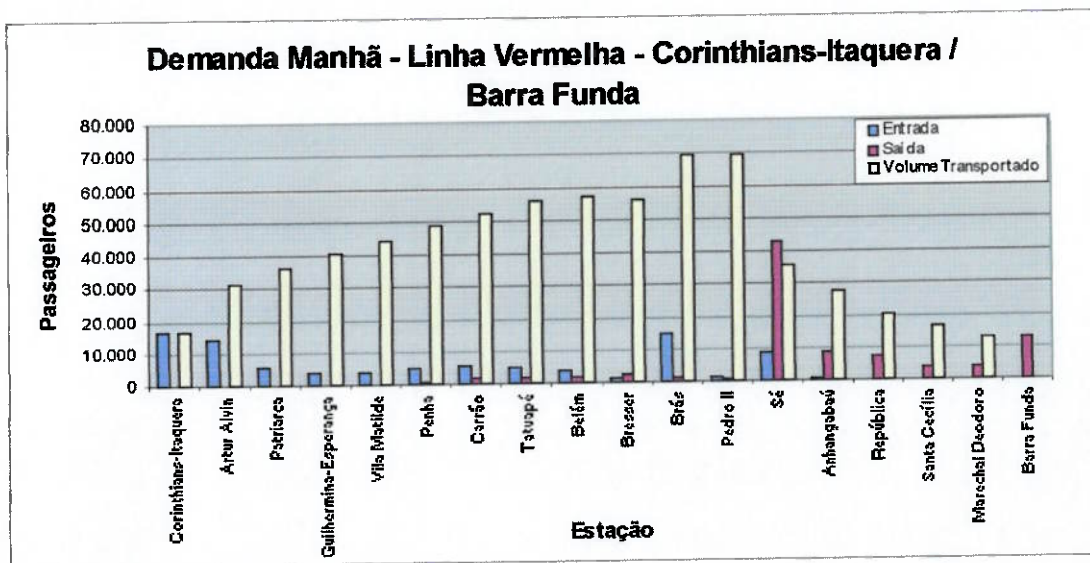


Figura 4.14 – Demanda Manhã – Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda

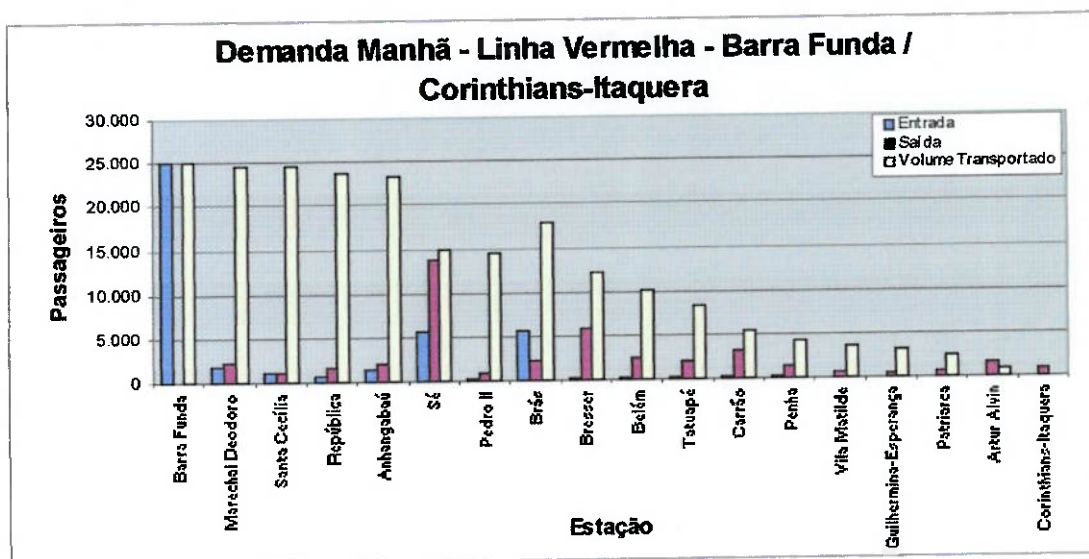


Figura 4.15 – Demanda Manhã – Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera

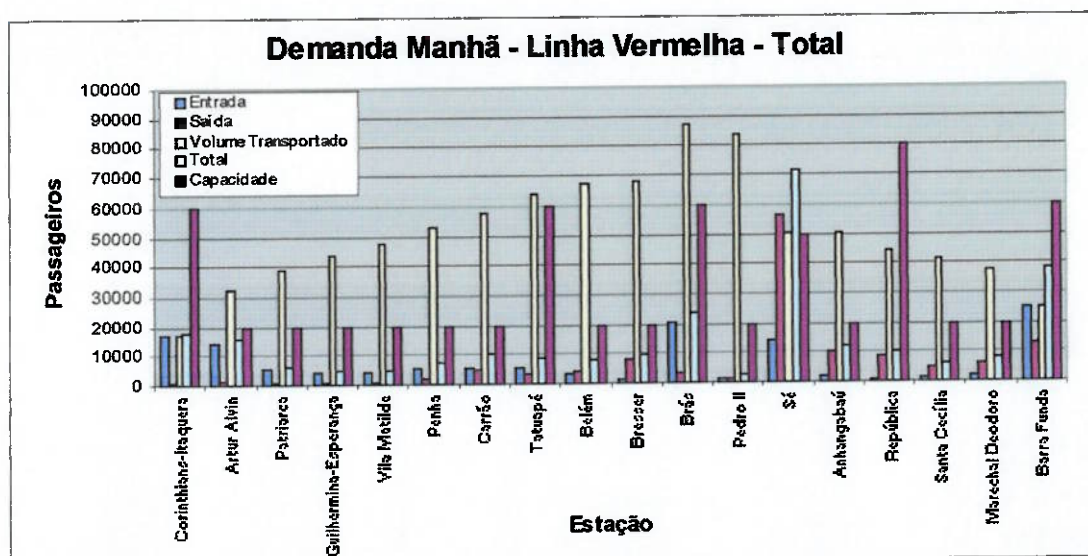


Figura 4.16 – Demanda Manhã – Linha Vermelha - Total

A partir do gráfico da Figura 4.16, pode-se observar que no período da manhã, esta linha do Metrô apresenta excesso de demanda de passageiros (superlotação), visto que a quantidade total de passageiros na estação supera em quase todas as estações as suas capacidades máximas.

De fato, esta situação não ocorre apenas nas estações Corinthians-Itaquera, República e Barra Funda.

- Período da Tarde:

As Figura 4.17 e Figura 4.18 demonstram a demanda de passageiros nos dois sentidos da linha. Na Figura 4.19, tem-se a demanda total de cada estação comparada com sua respectiva capacidade. Em todas as figuras, “entrada” e “saída” representam os totais de embarque e desembarque, respectivamente. O “volume transportado” é o total de passageiros transportados no trem e o “total” a quantidade de passageiros que circulam pelas plataformas da estação (total de embarques e desembarques). Todos os valores são relativos ao período de uma hora do horário de pico.

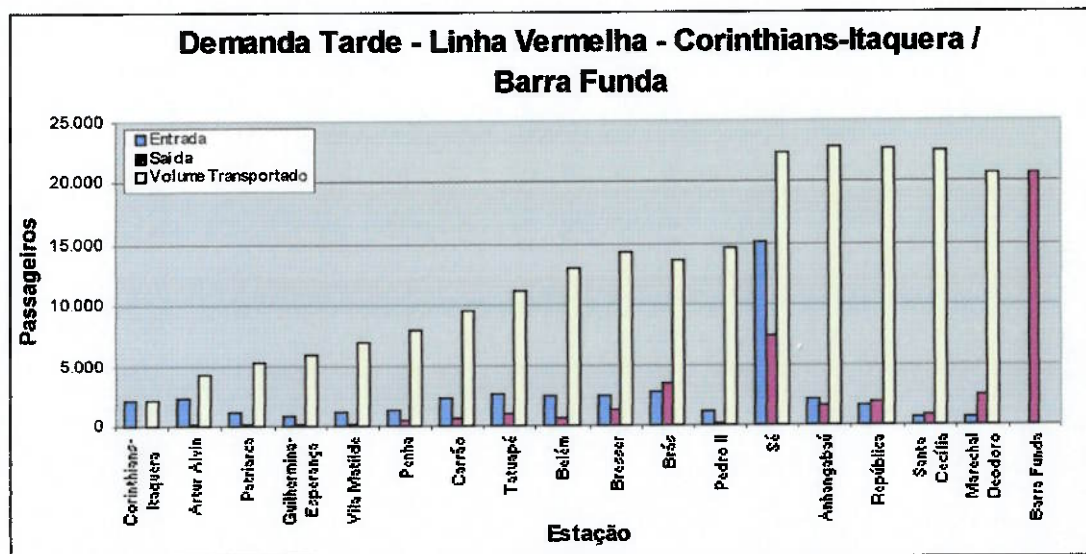


Figura 4.17 – Demanda Tarde – Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda

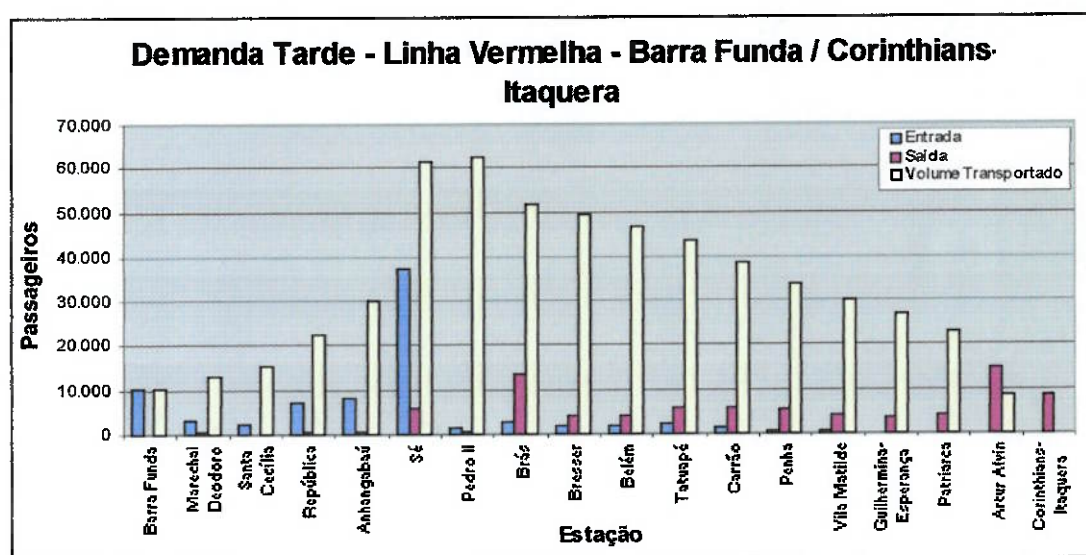


Figura 4.18 – Demanda Tarde – Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera

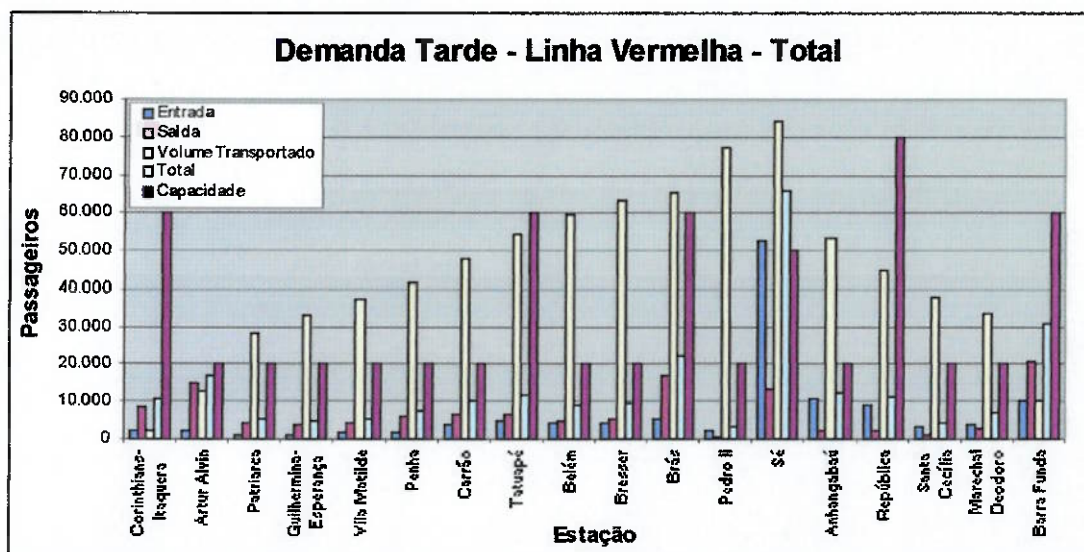


Figura 4.19 – Demanda Tarde – Linha Vermelha - Total

A partir do gráfico da Figura 4.19, pode-se observar que no período da tarde, esta linha do Metrô apresenta também um excesso de demanda de passageiros (superlotação), visto que a quantidade total de passageiros supera em quase todas as estações as suas capacidades máximas.

De fato, esta situação não ocorre apenas nas estações Corinthians-Itaquera, Arthur Alvin, Tatuapé, República e Barra Funda.

4.2.4. Interconexão entre Linhas:

- Estação Sé:

Através da estação Sé do Metrô, os usuários podem fazer a interconexão entre as linhas Azul e Vermelha. Desta forma, comparando-se a capacidade total com a quantidade total de passageiros nesta estação, das duas linhas, tem-se os seguintes números referentes à quantidade de passageiros em uma hora do horário de pico:

- Manhã:

- Capacidade Total: 100.000
- Total de usuários: 121.237

- Usuários da linha Azul: 70.849
- Usuários da linha Vermelha: 50.388

▪ Tarde:

- Capacidade Total: 100.000
- Total de usuários: 123.878
- Usuários da linha Azul: 39.924
- Usuários da linha Vermelha: 83.954

Pode-se verificar que tanto no período da manhã, quanto no período da tarde a quantidade total de passageiros é superior à capacidade total da estação Sé.

• Estação Paraíso:

Através da estação Paraíso do Metrô, os usuários podem fazer a interconexão entre as linhas Azul e Verde. Desta forma, comparando-se a capacidade total com a quantidade total de passageiros nesta estação, das duas linhas, tem-se os seguintes números referentes à quantidade de passageiros em uma hora do horário de pico:

▪ Manhã:

- Capacidade Total: 40.000
- Total de usuários: 66.440
- Usuários da linha Azul: 42.447
- Usuários da linha Verde: 23.993

▪ Tarde:

- Capacidade Total: 40.000
- Total de usuários: 74.074
- Usuários da linha Azul: 58.187
- Usuários da linha Verde: 15.887

Pode-se verificar que tanto no período da manhã, quanto no período da tarde a quantidade total de passageiros é superior à capacidade total da estação Paraíso. Mais ainda, observa-se que a capacidade total da estação já é superada somente com a quantidade total de passageiros na linha Azul.

- Estação Ana Rosa:

Através da estação Ana Rosa do Metrô, os usuários podem fazer a interconexão entre as linhas Azul e Verde. Desta forma, comparando-se a capacidade total com a quantidade total de passageiros nesta estação, das duas linhas, tem-se os seguintes números referentes à quantidade de passageiros em uma hora do horário de pico:

- Manhã:

- Capacidade Total: 40.000
- Total de usuários: 47.647
- Usuários da linha Azul: 41.851
- Usuários da linha Verde: 5.796

- Tarde:

- Capacidade Total: 40.000
- Total de usuários: 46.905
- Usuários da linha Azul: 44.896
- Usuários da linha Verde: 2.009

Pode-se verificar que tanto no período da manhã, quanto no período da tarde a quantidade total de passageiros é superior à capacidade total da estação Ana Rosa. Mais ainda, observa-se que a capacidade total da estação já é superada somente com a quantidade total de passageiros na linha Azul.

4.3. Concepção dos Modelos

4.3.1. Modelagem em HPSim

A modelagem do sistema metroviário em HPSim (redes de Petri) pode ser dividida em duas etapas: a modelagem da malha física, incluindo as estações, linhas de percurso e todo procedimento de controle envolvido; e a modelagem do trânsito dos usuários nas estações, que envolve desde sua entrada ou saída da estação até seu embarque e desembarque dos trens. Além disto, esta modelagem parte de modelos simples e passam por sucessivas implementações, elevando-se o grau de detalhamento, até que o modelo alcance o grau de complexidade suficiente para que o mesmo represente adequadamente o sistema modelado.

A modelagem da malha física envolve o estudo comportamental dos trens nas estações e no percurso entre estações, assim como os tempos envolvidos em cada operação. Seguindo a abordagem realizada na descrição do sistema, a modelagem do arranjo físico baseia-se em um modelo de trajeto entre duas estações consecutivas, para posteriores implementações, que permitirão a expansão deste modelo para formar toda uma linha do sistema metroviário. Inicialmente, definem-se as estações como *lugares*, assim como o percurso de trens entre duas estações consecutivas (Figura 4.20).

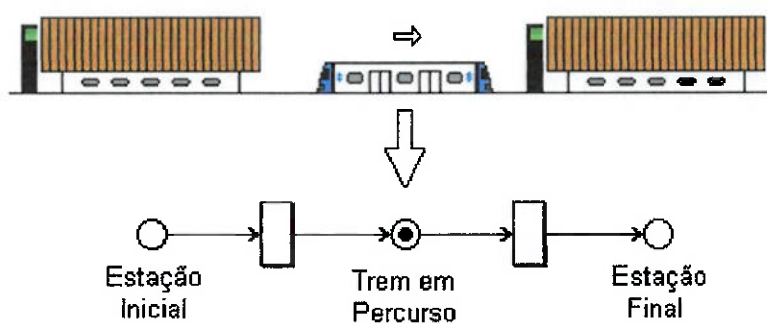


Figura 4.20 – Modelo inicial entre duas estações consecutivas

Nesta representação, a marcação representa a localização do trem na via e seu sentido de locomoção é dado pela orientação dos arcos. Entretanto, este modelo inicial não permite que um segundo trem parta de uma estação se o primeiro trem ainda estiver em percurso, o que não ocorre na realidade. Neste trabalho, considera-se que no

percurso entre duas estações consecutivas podem existir até dois trens. Outra situação a considerar é a de que nas operações em horário de pico, pode haver espera de trens na via, enquanto um trem encontra-se na estação imediatamente à frente. O modelo a seguir apresentado comporta dois trens em espera na via, que corresponde à limitação imposta pela consideração de dois trens no percurso entre estações consecutivas (Figura 4.21):

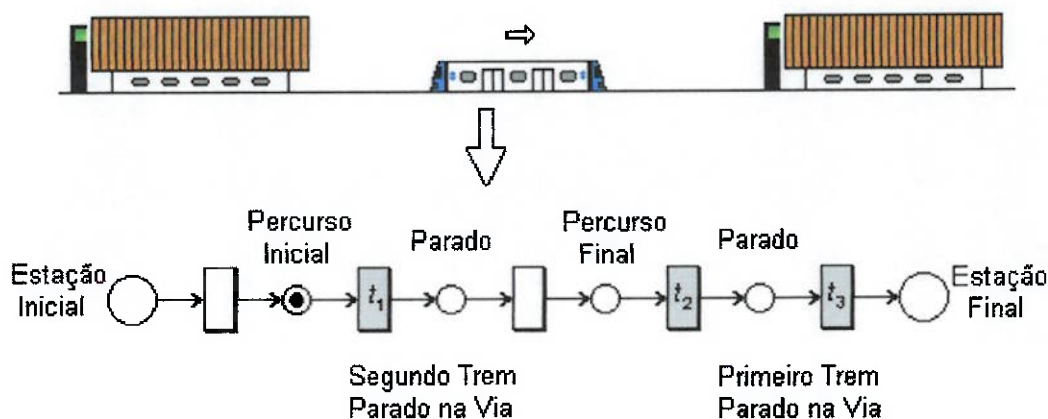


Figura 4.21 – Modelo físico entre duas estações consecutivas

No modelo da Figura 4.21, existem dois *lugares* correspondentes a trens em percurso (inicial e final), além de mais dois para trens em espera na via. Os *lugares* de percurso inicial representam a primeira metade do trajeto entre as estações, bem como os de percurso final, a segunda metade. Já os *lugares* de espera correspondem a eventuais esperas de trens nas linhas.

Ainda a respeito deste modelo, o tempo de percurso é definido pela temporização das *transições* que sucedem os *lugares* de percurso: t_1 e t_2 . Mais uma transição temporizada é utilizada para garantir a segurança de operação dos trens ao adentrar uma estação, dada por t_3 , que representa o intervalo de tempo que um trem deve esperar após a saída de outro trem da estação seguinte. O tempo de segurança considerado da *transição* temporizada t_3 é de 10 segundos, para todas as linhas em estudo. Os tempos de percurso correspondem à metade do tempo total de percurso entre estações consecutivas, subtraído o tempo de segurança.

Entretanto, este modelo não garante o controle do número de trens na via, pois não impõe restrições quanto ao início de percurso de cada trem que entra na via. Para garantir que apenas dois trens estejam na via entre duas estações consecutivas, uma série de inter-relacionamentos são estabelecidos, por meio de *arcos inibidores* de *transição*, de modo que a lógica de operação seja mantida. Um novo modelo é apresentado (Figura 4.22):

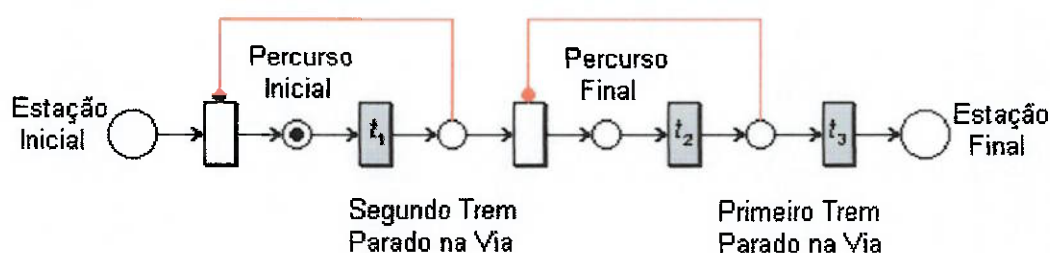


Figura 4.22 – Arcos inibidores para manutenção da lógica de funcionamento

Os *arco inibidor*, representado no *HPSim* como um traço e um ponto (associado a uma *transição* inibida), que parte do *lugar* correspondente ao segundo trem parado na via impede que um novo trem inicie seu percurso a partir da estação inicial quando já existe trem parado na metade inicial do percurso (*percurso inicial*), assim como o *arco inibidor* que parte do *lugar* correspondente ao primeiro trem parado na via inibe o início de percurso final do trajeto, quando um primeiro trem encontra-se em espera na metade final de percurso. A ação de t_3 é garantida pela própria definição de disparo de redes de Petri, isto é, a temporização só é iniciada quando a *marca* correspondente ao trem deixar o *lugar* correspondente à estação final, não necessitando de *arco inibidor*.

O tempo de parada nas estações é definido por uma “unidade de monitoramento”, externa ao modelo de tráfego de trens, apresentado na Figura 4.23:

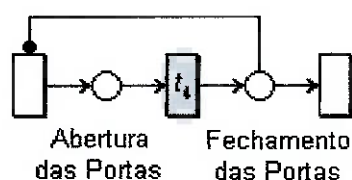


Figura 4.23 – “Unidade de monitoramento de parada”

Nesta unidade, a abertura e o fechamento das portas de um trem, em determinada estação, são monitorados pelo CCO, que define o tempo de permanência do trem na mesma. Este tempo é estabelecido por uma *transição* temporizada (t_4), que mantém a marca no *lugar* correspondente a abertura de portas por 10 segundos. Estas “unidades de monitoramento de parada” interagem com o modelo apresentado na Figura 4.22 por meio de *arcos habilitadores* (representados por arcos orientados tracejados no *HPSim*) e *inibidores*, que garantem a abertura de portas somente quando existe trem na estação, bem como impede que um trem deixe a mesma sem fechar suas portas.

A presença de um trem na estação habilita o disparo da *transição* que funciona como fonte de *marcas* da “unidade de monitoramento”, indicando abertura das portas do trem e iniciando a contagem de tempo. Ao final da contagem, a *marca* da “unidade de monitoramento” avança, representando o fechamento das portas, que permite a saída do trem da estação. A *marca* desta unidade só é eliminada quando o trem deixa a estação, encerrando suas funções. O modelo desta interação é apresentado na Figura 4.24:

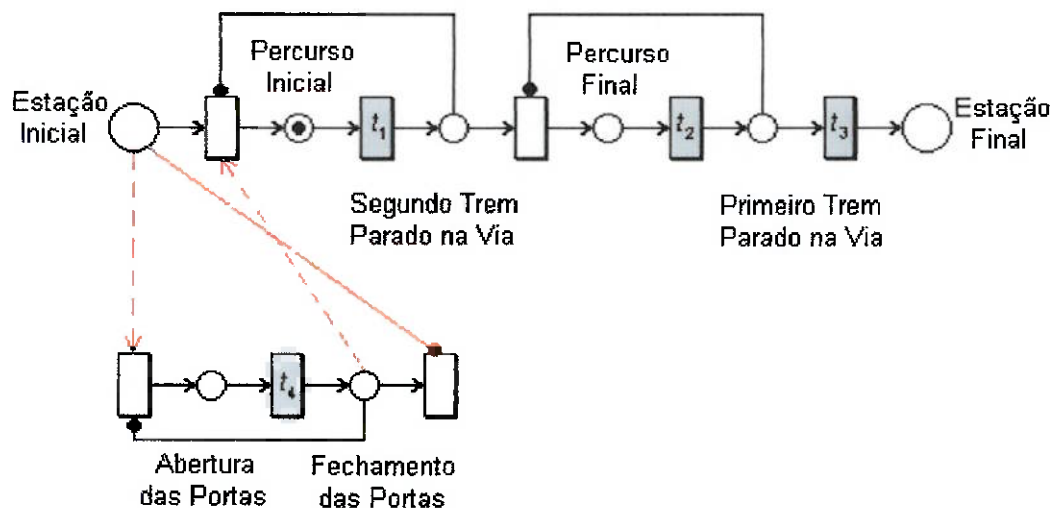


Figura 4.24 – Interação da “unidade de monitoramento de parada”

O modelo de malha física apresentado na Figura 4.24 é válido somente para o trajeto entre duas estações consecutivas, em um sentido de uma linha, mas pode ser expandido para compor todo o sistema metroviário. Para tanto, algumas modificações tornam-se necessárias, adequando os modelos apresentados para formar cada uma das

linhas, cujas sobreposições e interconexões comporão a malha completa (linha azul, verde e vermelha).

O modelo de uma linha é composta pela conexão de dois grafos que modelam os dois sentidos das viagens dos trens, como o apresentado na Figura 4.24. Além disto, os tempos de percurso devem ser ajustados de acordo com a linha pertinente, e junções entre os dois sentidos das linhas devem ser estabelecidas nas estações de extremidade, para a circulação dos trens ser mantida contínua.

Estas junções nas estações de extremidade das linhas são efetuadas pelo modelo apresentado na Figura 4.25:

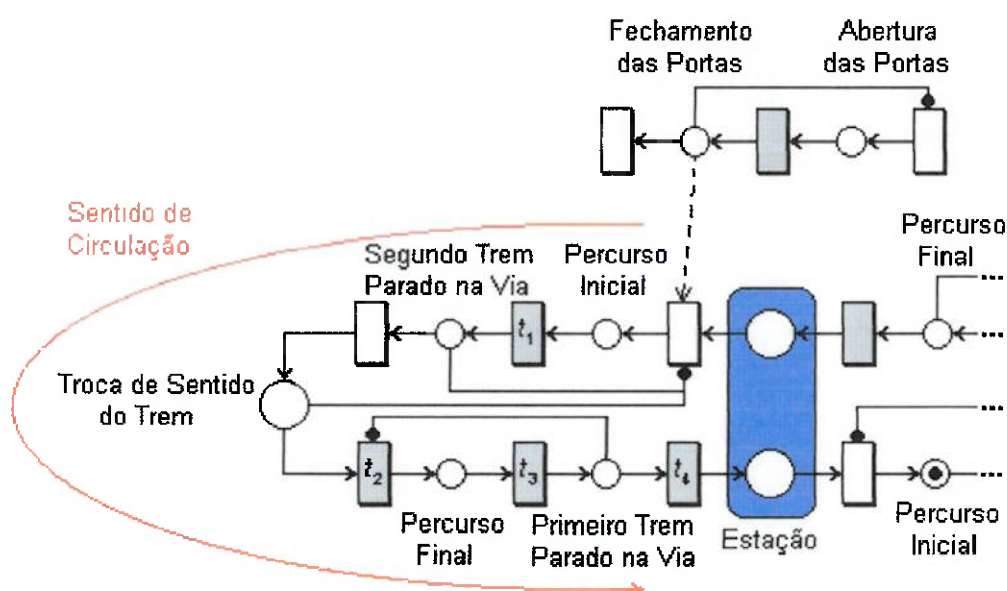


Figura 4.25 – Junção para troca de sentido de circulação de trens nas estações de extremidade

O modelo da Figura 4.25 considera a limitação de dois trens na via. Deste modo, *arcos inibidores* são utilizados para permitir a entrada na via de no máximo dois trens. Este modelo é composto de três trechos: o primeiro referente ao percurso inicial do trajeto, o segundo correspondente à unidade de troca de sentido do trem e por fim o trecho final, por onde o trem se retorna à estação, em sentido oposto ao inicial. O tempo total para esta operação é de 90 segundos, como apresentado no item 4.2 referente ao levantamento de dados, sendo comum para todas as linhas em estudo. No primeiro trecho, assim como no segundo, os tempos de percurso são definidos por t_1 e t_3 , com

tempos de 20 e 10 segundos respectivamente. Ambos os trechos apresentam o mesmo comprimento, entretanto, o segundo tem tempo menor devido ao tempo para adentrar a estação posterior, determinado por t_4 . Já o tempo para a operação de inversão de sentido de circulação propriamente dita é regulada por t_2 , correspondendo a 50 segundos.

A modelagem do trânsito de usuários nas estações é baseada nos dados estatísticos fornecidos pela Companhia de Metropolitano de São Paulo [Metrô, 2002] sobre a entrada e saída de usuários em cada estação, bem como sobre o embarque e desembarque em suas respectivas plataformas, nos horários de pico. O modelo de entrada e embarque de usuários é apresentado na Figura 4.26, e refere-se a uma estação genérica:

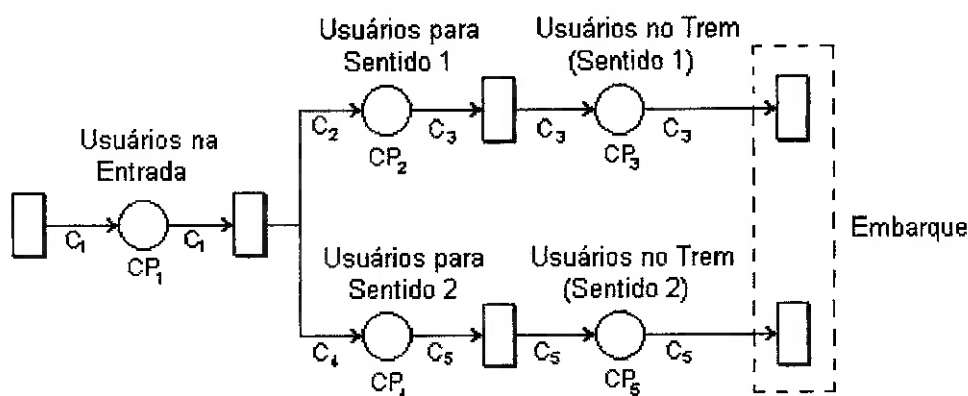


Figura 4.26 – Modelo de entrada e embarque de usuários em uma estação genérica

Neste modelo, a entrada de passageiros na estação é única, ou seja, não há distinção entre os passageiros no que se refere ao sentido da linha que se pretende tomar. A fonte de *marcas* gera deterministicamente, isto é, em um determinado intervalo de tempo de horário de pico, a quantidade equivalente ao número de usuários que entram em cada estação neste mesmo intervalo, segundo dados fornecidos pelo Metrô [2002]. Esta quantidade de marcas equivale ao *peso* do arco que relaciona esta fonte ao *lugar* “Usuários na Entrada” (C_1) correspondente. Este *lugar* tem sua *capacidade* (CP_1) dada pelo número máximo de passageiros comportado pela estação. Uma parcela (C_2) do total de usuários que entram na estação destina-se à plataforma de

embarque, de *capacidade* CP_2 , para um sentido da via (sentido 1), enquanto a outra parcela restante (C_4) se destina à outra plataforma, de *capacidade* CP_4 , para o outro sentido (sentido 2).

Quando um trem adentra a estação em determinado sentido, parte dos passageiros da plataforma de embarque correspondente (C_3 ou C_5) entram no trem, enquanto o mesmo mantém suas portas abertas (CP_3 ou CP_5 , respectivamente). Portanto, os valores de CP_3 e CP_5 correspondem ao número de passageiros que entraram no trem. O fechamento das portas indica o fim do embarque, permitindo o disparo do sorvedouro de *marcas*, que representa a partida dos passageiros da estação.

O modelo de embarque se relaciona diretamente com a unidade de monitoramento de parada (Figura 4.23), de acordo com a lógica descrita anteriormente, ligando o modelo de malha física ao de trânsito de passageiros na estação. O modelo de interação é apresentado na Figura 4.27:

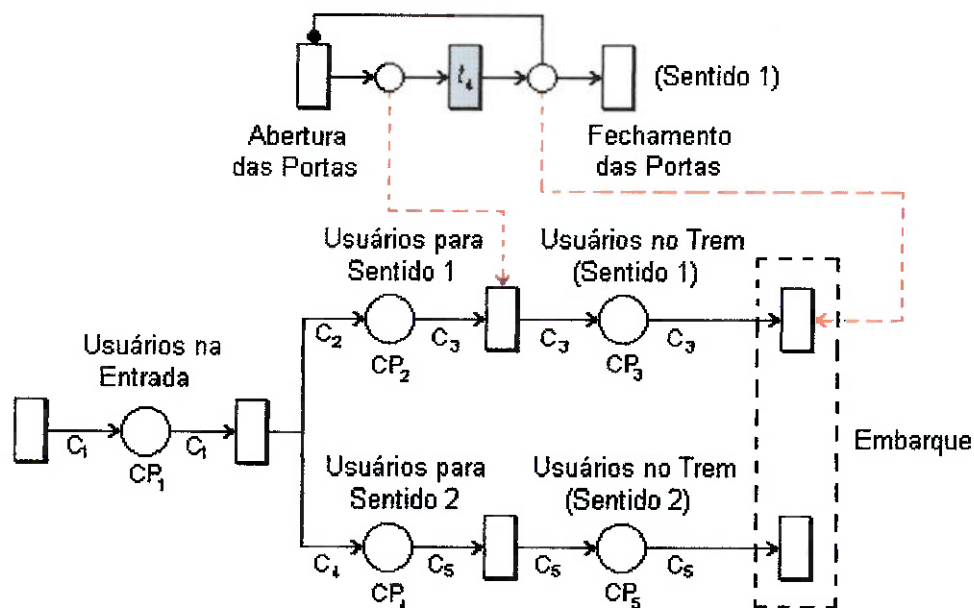


Figura 4.27 – Interação entre modelo de entrada e embarque e unidade de monitoramento

Neste modelo (Figura 4.27), é apresentado somente uma das interações, mas na realidade existem duas destas em cada um dos modelos de entrada e embarque de usuários.

Já o modelo de saída e desembarque de passageiros, referente a uma estação genérica, é apresentado na Figura 4.28:

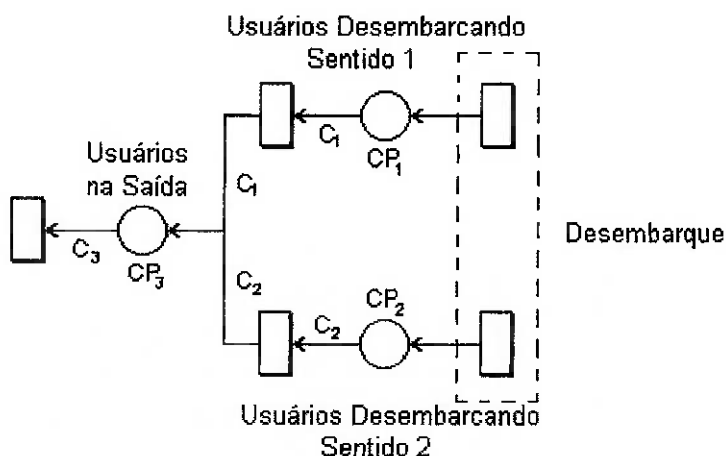


Figura 4.28 – Modelo de saída e desembarque de usuários em uma estação genérica

O desembarque é representado pelas duas fontes de *marcas* em destaque, cujo número de *marcas* geradas (C_1 ou C_2) equivalem à quantidade de Passageiros que desembarcam dos trens, em uma estação genérica, nos sentidos 1 ou 2, respectivamente. Os passageiros que desembarcam (representados também pela quantidade de *marcas* nos lugares CP_1 e CP_2) dirigem-se para a saída da estação, assim como a entrada, também considerada única, o lugar CP_3 .

Este modelo também interage com o modelo de malha física (Figura 4.24) através de *arcos habilitadores* e *inibidores*, através da unidade de monitoramento de parada (Figura 4.23). Esta interação é mostrada na Figura 4.29:

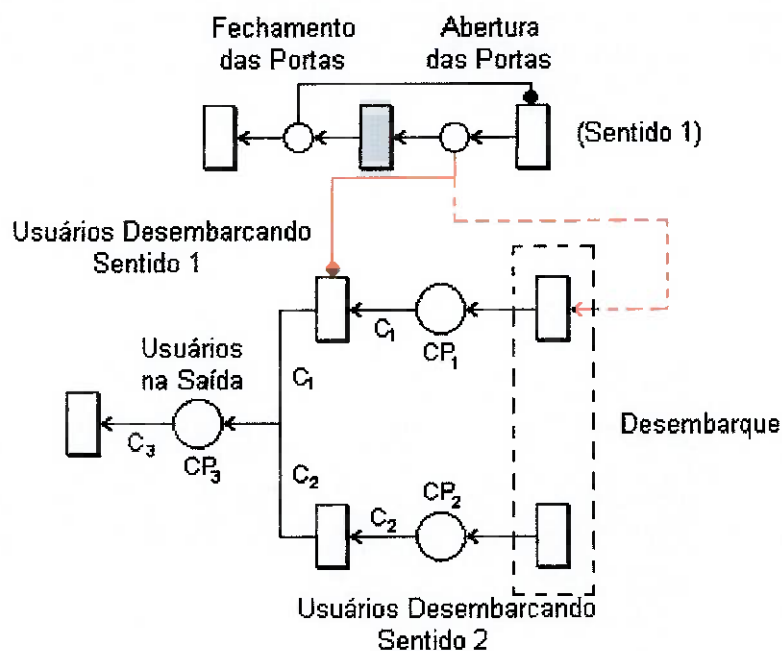


Figura 4.29 – Interação entre modelo de saída e desembarque com unidade de monitoramento

Quando um trem abre suas portas, a saída de passageiros do trem é liberada, isto é, a fonte de *marcas* que representa o desembarque é habilitada, gerando *marcas* correspondentes ao número de passageiros referente à saída. Entretanto, os passageiros só deixam as plataformas de desembarque quando o trem fecha suas portas, ou seja, quando a *marca* da unidade de monitoramento de parada é encaminhada para o *lugar* correspondente ao fechamento das portas, através de um arco *inibidor*.

Toda a modelagem apresentada até este ponto, referente ao trânsito dos usuários nas estações, é vinculada ao comportamento dos passageiros em uma estação genérica, que conta com entradas e embarques de passageiros nos dois sentidos da via, assim como desembarque e saída das estações. Entretanto, existem estações em que não existem embarques ou desembarques em um dos sentidos da via, enquanto outras apresentam entrada, embarque, desembarque e saída em até quatro sentidos de circulação de trens distintos (estação Sé).

Primeiramente, as estações de extremidade de linha (Barra Funda, Corinthians-Itaquera, Jabaquara, Tucuruvi e Vila Madalena), que apresentam junções (Figura 4.25),

têm o modelo de embarque e desembarque dado por (Figura 4.30 e Figura 4.31, respectivamente):

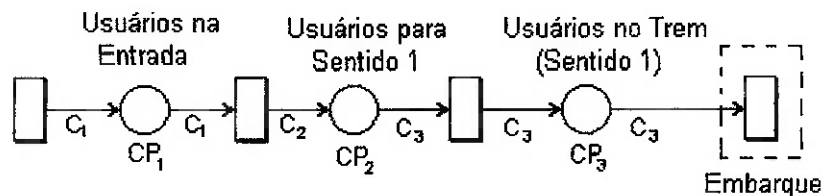


Figura 4.30 – Modelo de entrada e embarque de usuários em uma estação de extremidade

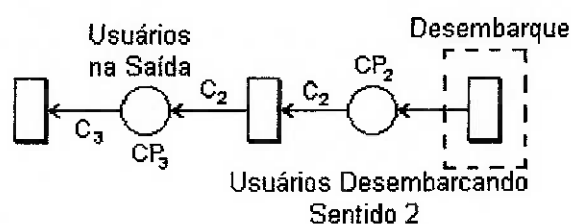


Figura 4.31 – Modelo de saída e desembarque de usuários em uma estação de extremidade

Ambos os modelos são adaptações dos modelos apresentados nas Figura 4.27 e Figura 4.29, respectivamente. Estas adaptações são realizadas considerando o fato de as estações de extremidade das vias apresentarem somente embarques ou desembarques em cada sentido. Deste modo, se há embarque no sentido 1, o sentido 2 apresenta somente desembarque. Ambos os modelos (Figura 4.30 e Figura 4.31) apresentam mesmo inter-relacionamento com as respectivas unidades de monitoramento de parada de cada sentido (através de *arcos habilitadores* e *inibidores*), apresentado anteriormente. Além das estações de extremidade, estes modelos são igualmente empregados para representar embarque ou desembarque em somente um dos sentidos da via, em estações distintas das de extremidade.

Outro caso distinto é o das estações de cruzamento de linhas, totalizando três: Ana Rosa, Paraíso e Sé. Tanto as estações Ana Rosa como Paraíso apresentam modelos de embarque e desembarque similares, já que nestas estações não há desembarque de passageiros em um sentido de circulação. O modelo de embarque para as estações Ana Rosa e Paraíso é apresentado na Figura 4.32:

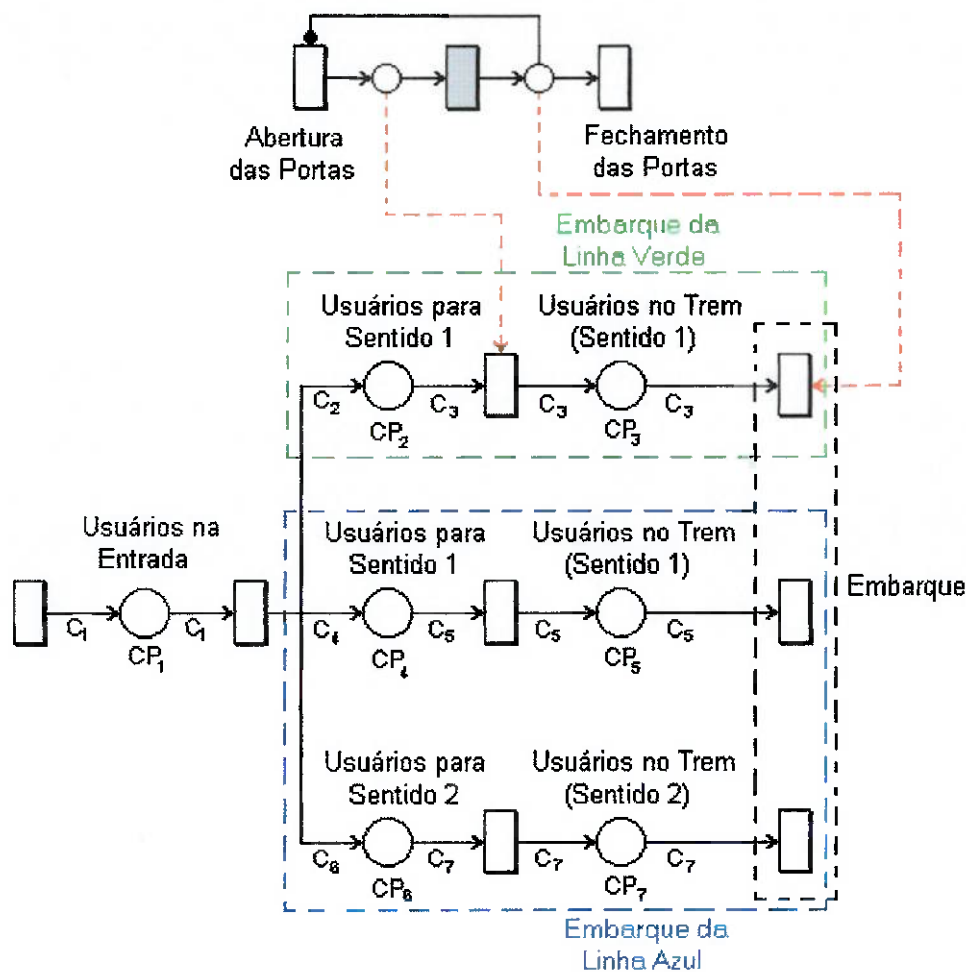


Figura 4.32 – Modelo de embarque para as estações Ana Rosa e Paraíso

O modelo apresentado na Figura 4.32 é uma composição entre os modelos apresentados para embarque nas Figura 4.27 e Figura 4.30. É importante ressaltar que a interação entre estes modelos e a unidade de monitoramento de parada é mantida. A parte do modelo destacada em verde é a referente ao embarque na Linha Verde que, como citado anteriormente, só apresenta embarque de passageiros no sentido Ana Rosa – Vila Madalena. Os embarques referentes à Linha Azul, destacados em azul, dão-se nos dois sentidos (Jabaquara – Tucuruvi e Tucuruvi – Jabaquara).

Já o desembarque de passageiros nas estações Ana Rosa e Paraíso, bem como na estação Sé, apresentam uma peculiaridade: a existência de trânsito de passageiros entre linhas. No caso das estações Ana Rosa e Paraíso, usuários podem trocar o sentido de viagem entre as Linhas Azul e Verde e, no caso da estação Sé, alterar o sentido entre

Linhas Azul e Vermelha. O modelo de desembarque para as estações Ana Rosa e Paraíso é apresentado na Figura 4.33:

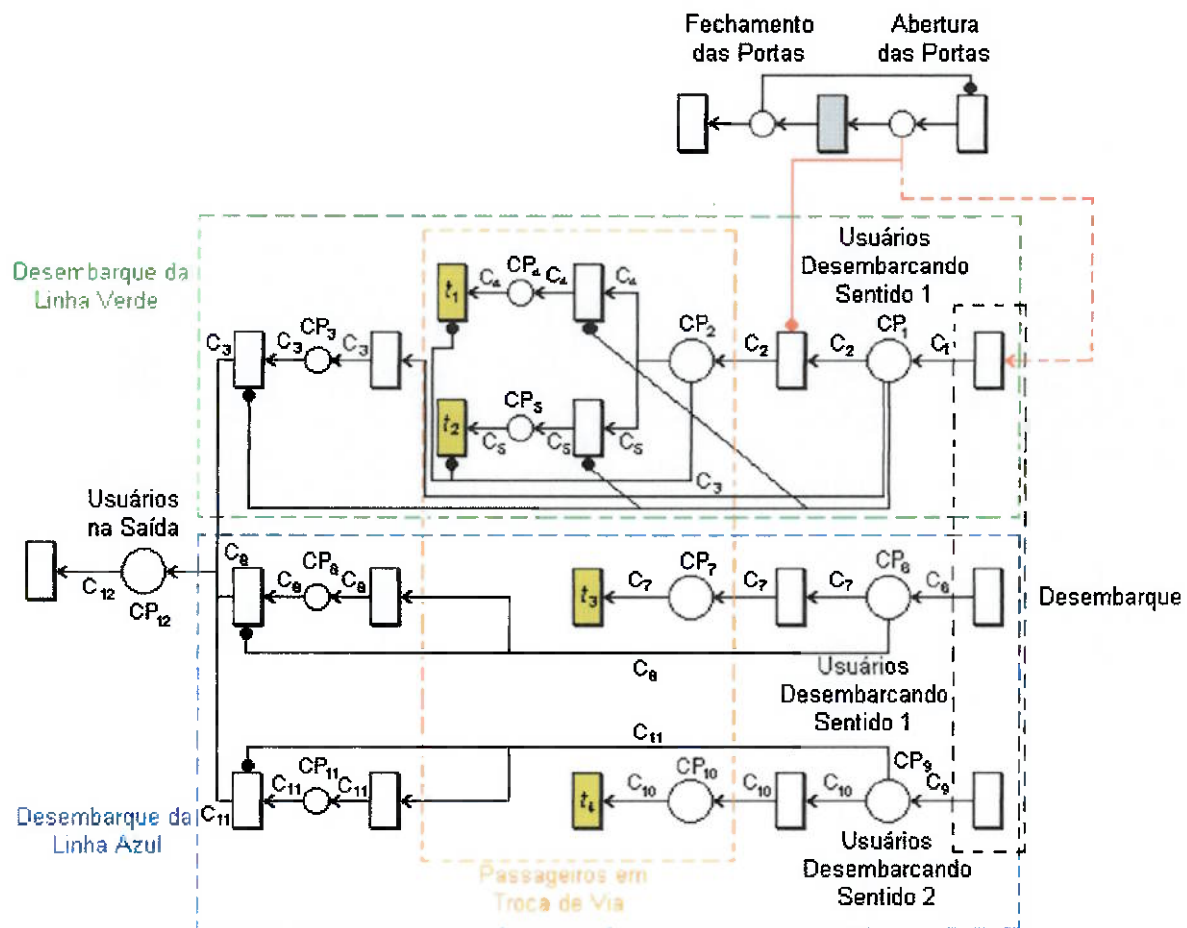


Figura 4.33 – Modelo de desembarque para as estações Ana Rosa e Paraíso

Assim como o modelo de embarque da Figura 4.32, a parte destacada em verde do modelo da

Figura 4.33 representa o desembarque da Linha Verde, que se dá apenas no sentido Vila Matilde Ana Rosa, tanto na estação Ana Rosa como na Paraíso. Este modelo é uma composição dos modelos de desembarque das Figura 4.29 e Figura 4.31, mas apresenta componentes adicionais, dados pela parte destacada “Passageiros em Troca de Via”, que modela as mudanças de vias de percurso. Nesta parte adicional, os lugares de capacidades CP_4 , CP_5 , CP_7 e CP_{10} definem a quantidade de usuários que se

destinam a troca de sentido de percurso. Portanto, CP_4 e CP_5 são a quantidade de passageiros que desembarcam nas estações Ana Rosa ou Paraíso pela Linha Verde e destinam-se à Linha Azul, tanto para o sentido Jabaquara – Tucuruvi como para o sentido Tucuruvi – Jabaquara, respectivamente. Da mesma maneira, CP_7 e CP_{10} representam a quantidade de passageiros que deixam estas estações na Linha Azul e destinam-se ao embarque na Linha Verde. É importante ressaltar que os desembarques da Linha Azul com destino à Linha Verde são definidos como embarques na Linha Verde, que se dão *unicamente* no sentido Ana Rosa – Vila Madalena, assim como os desembarques com a mesma finalidade da Linha Verde para a Azul, mas nos dois sentidos (Jabaquara – Tucuruvi ou Tucuruvi – Jabaquara).

Esta troca de linhas efetuadas pelos passageiros é realizada através de arcos que partem das *transições* t_1 , t_2 , t_3 e t_4 (em amarelo na Figura 4.33), unindo este modelo aos respectivos *lugares* de “Usuários para Sentido 1 ou 2” do modelo de embarque da Figura 4.32, de acordo com o sentido de destino de cada passageiro.

Entretanto, parte dos passageiros que desembarcam deixam estas estações. A saída de usuários é definida pelos arcos de *peso* c_3 , c_8 e c_{11} , e toda rede formada posteriormente. Portanto, no fluxo de passageiros nas estações Ana Rosa e Paraíso, parte dos passageiros que desembarcam destinam-se à saída, enquanto outra parte troca de linha para seguir suas viagens.

Já para a estação Sé, em que há embarque e desembarque de usuários para quatro sentidos de circulação de trens possíveis (dois na Linha Vermelha e dois na Linha Azul), os modelos de embarque e de desembarque tratam-se de composições de partes dos modelos das Figura 4.32 (parte destacada em azul) e Figura 4.33 (parte destacada em verde):

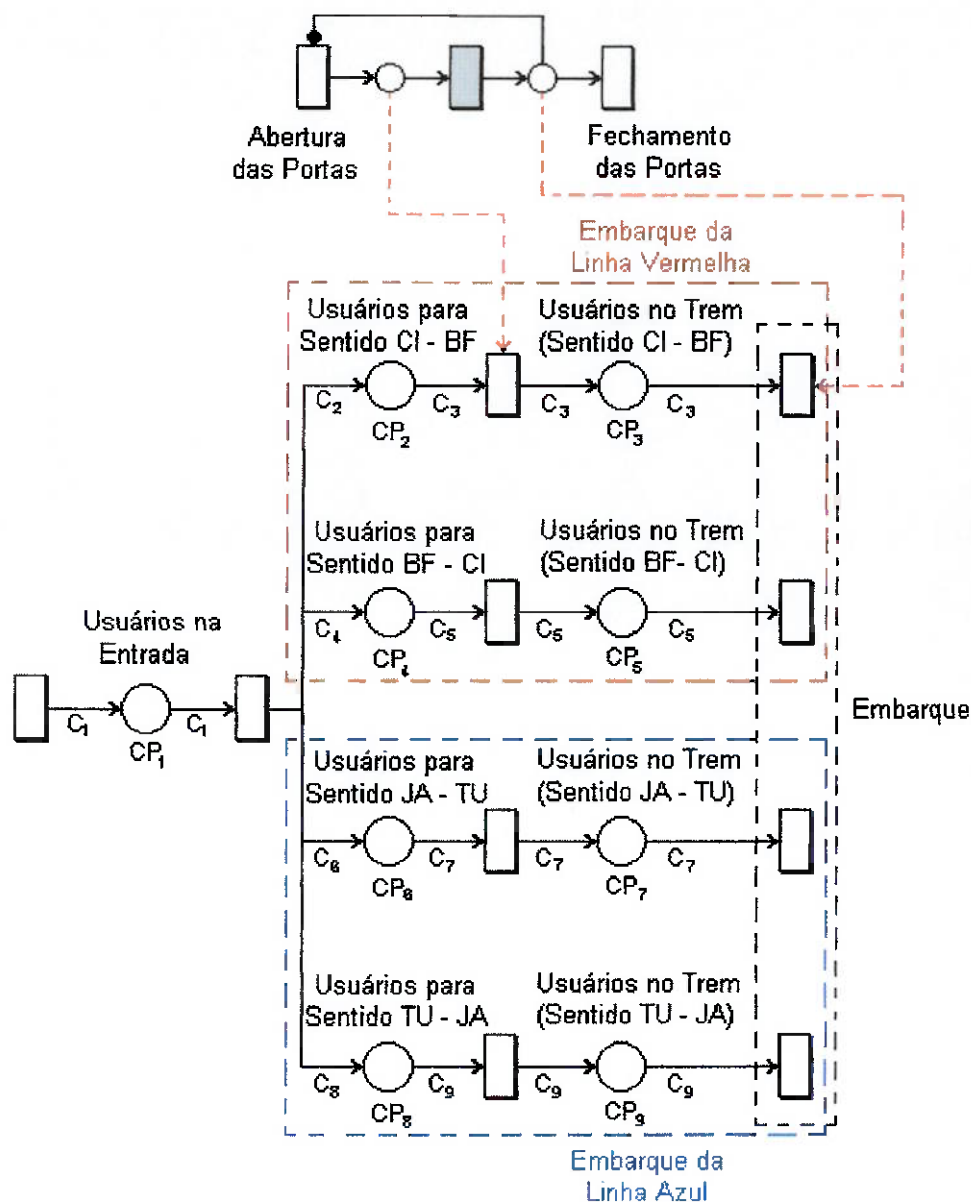


Figura 4.34 – Modelo de embarque para a estação Sé

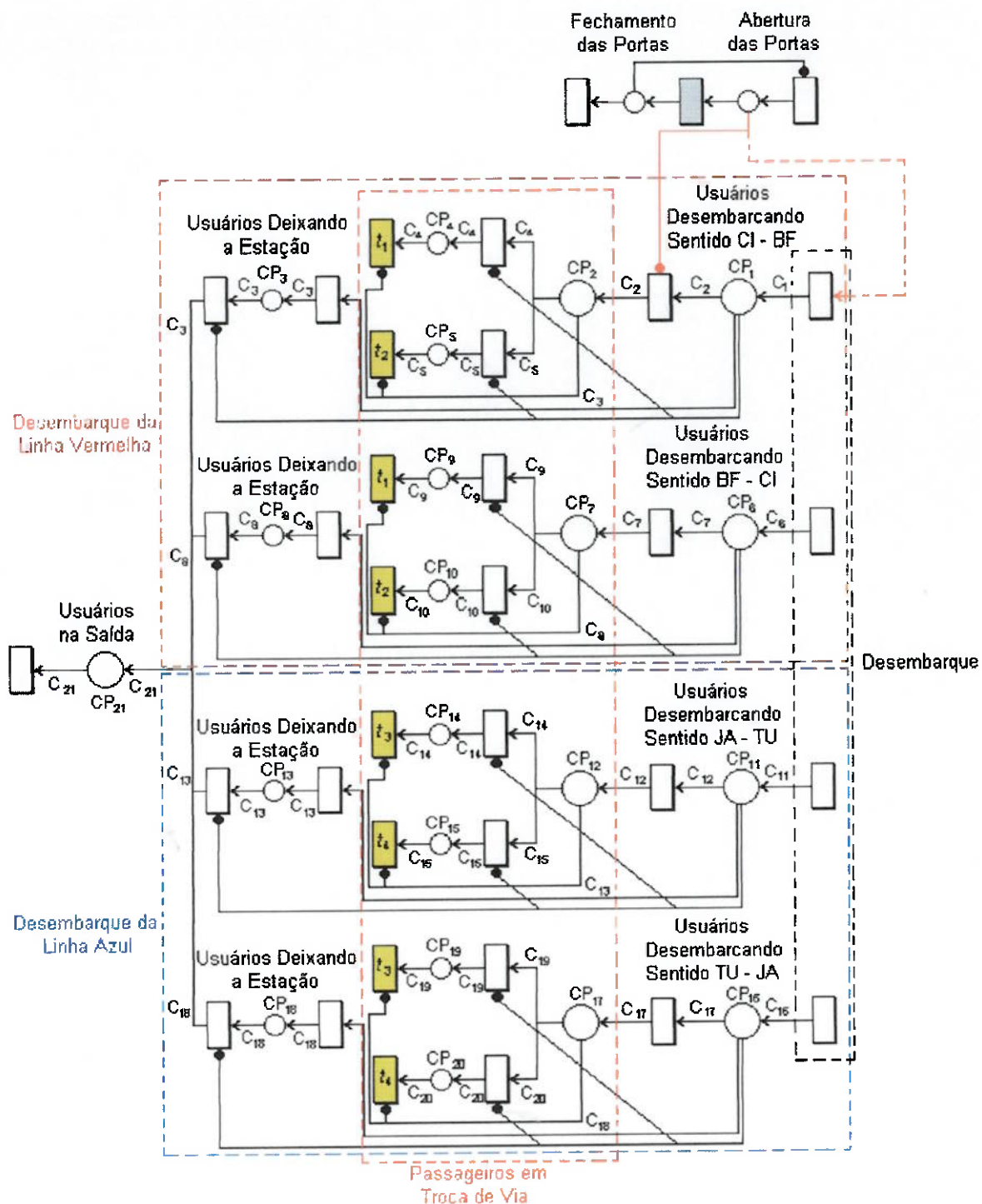


Figura 4.35 – Modelo de desembarque para a estação Sé

Ressalta-se que *arcos inibidores* são utilizados para evitar eventuais problemas gerados por concorrência. Ambos os modelos (Figura 4.34 e Figura 4.35) interagem

com o modelo de malha física do sistema metroviário (Figura 4.24) através de *arcos habilitadores* e *inibidores* entre os mesmos e as unidades de monitoramento de parada.

O modelo de desembarque (Figura 4.35) se relaciona com o modelo de embarque (Figura 4.34) para a estação Sé através de arcos orientados das *transições* em destaque (amarelo) para os respectivos *lugares* de embarque. Assim, passageiros que desembarcam na Sé pela Linha Vermelha embarca na Linha Azul por meio das *transições* t_1 e t_2 , nos sentidos Jabaquara – Tucuruvi e Tucuruvi – Jabaquara, respectivamente. Já os passageiros que desembarcam na Linha Azul, embarcam na Linha Vermelha através das *transições* t_3 e t_4 nos sentidos Corinthians-Itaquera – Barra Funda e Barra Funda – Corinthians-Itaquera, respectivamente.

O modelo da malha física completo, aliada aos modelos de embarque e desembarque, formam o modelo final entre duas estações genéricas (Figura 4.36).

No modelo da Figura 4.36, os modelos para embarque e desembarque apresentados referem-se à estação inicial. Os *arcos habilitadores* e *inibidores* apresentados são as conexões referentes ao sentido 1 (estação inicial para final) de circulação dos trens.

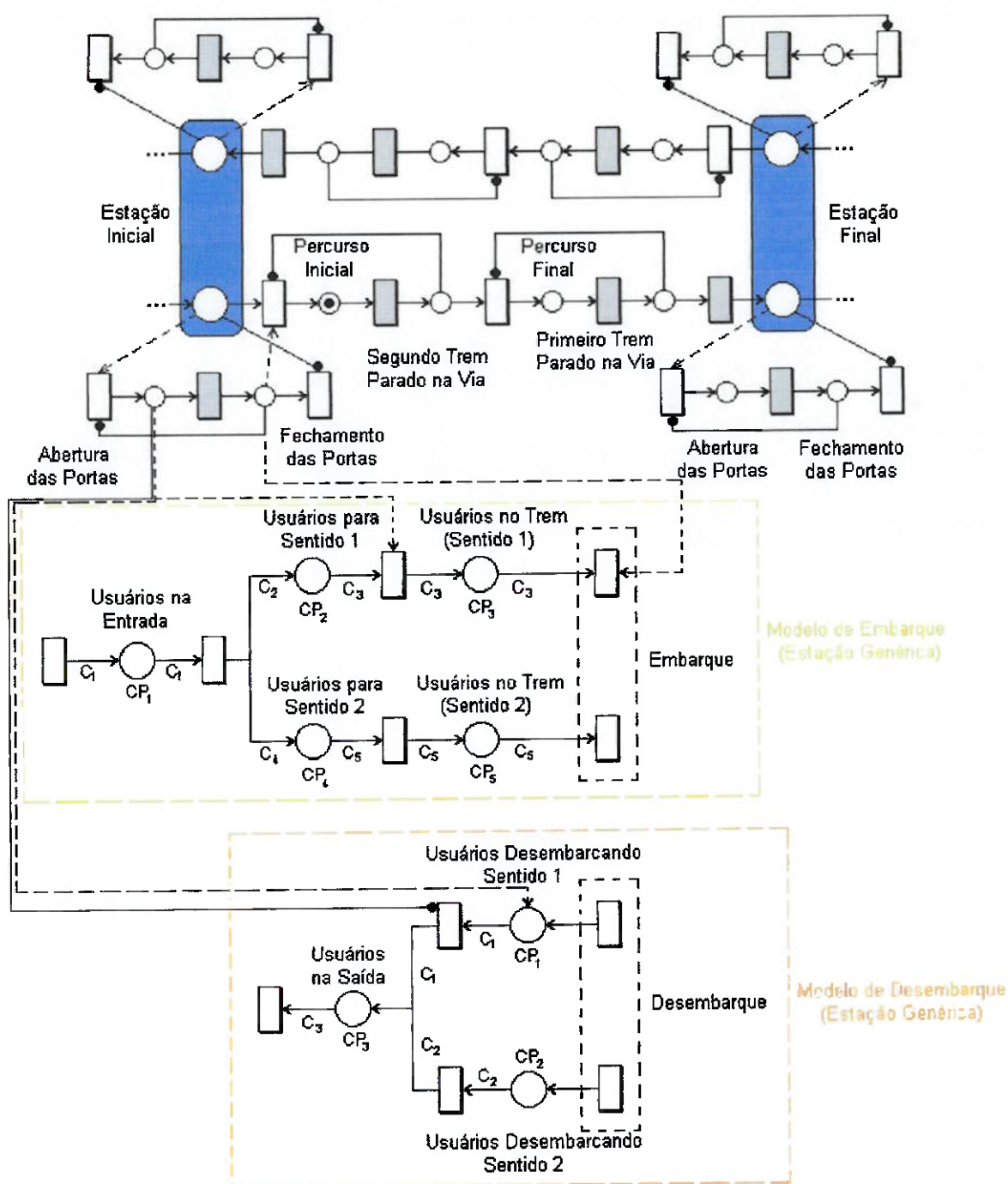


Figura 4.36 – Modelo final entre duas estações genéricas

Cada uma das linhas é composta pela integração de vários blocos de duas estações consecutivas e conectadas em suas extremidades pelo modelo apresentado na

Figura 4.25. A sobreposição das linhas compõe o sistema metroviário, como apresentado na Figura 4.37:

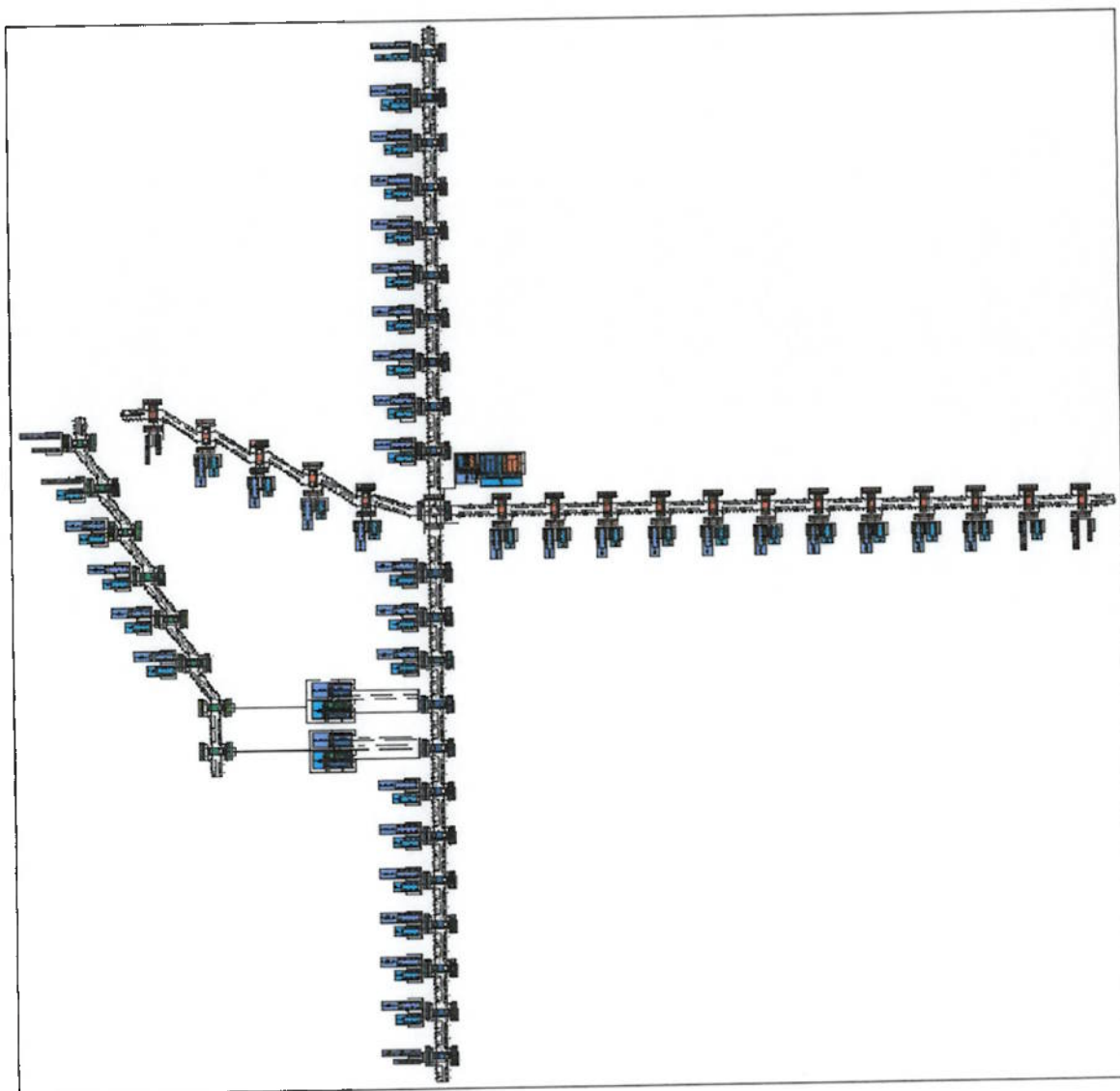


Figura 4.37 – Modelo do sistema metroviário de São Paulo em HPSim

4.3.2. Modelagem em ProModel

A modelagem em ProModel se baseia na definição de seus “elementos de modelagem”, que se encontram definidos no Anexo B – Ferramentas de Simulação. A partir destes, tem-se o sistema completo a ser simulado.

- **Locations:**

As *locations* do sistema são os lugares imóveis onde ocorrerão o processamento ou armazenamento das *entities*, a serem definidas posteriormente. Desta forma, tem-se:

- Todas as estações do Metrô com capacidade unitária (é permitida a permanência de apenas um trem do Metrô por estação), para as quais os trens do Metrô fluirão;
- O percurso entre duas estações consecutivas, com capacidade 2 (máximo de dois trens esperando na linha), que indicará o deslocamento de um trem de uma *location* estação para outra.
- “Buffer” para a entrada de passageiros em cada estação, com capacidade infinita (chegada de passageiros infinita), que indicará a chegada de passageiros na respectiva estação.

O percurso do Metrô é de ida e volta, portanto, tem-se as *locations* acima definidas duplamente para cada estação. Isto é, tem-se duas *locations* para indicar uma estação, um “buffer” de chegada de passageiros para cada sentido da linha e o percurso de ida e volta do Metrô.

A Figura 4.38 ilustra a definição das *locations* no ProModel, para algumas estações da Linha Azul, mas este é o procedimento para a definição de todas as *locations* do sistema.

Icon	Name	Cap.	Units	Dts...	Stats...	Rules...
	Tucuruvi_Ida	1	1	None	Time Series	Oldest
	Parada_Inglesa_Ida	1	1	None	Time Series	Oldest
	Jardim_Sao_Paulo_Ida	1	1	None	Time Series	Oldest
	Santana_Ida	1	1	None	Time Series	Oldest
	Carandiru_Ida	1	1	None	Time Series	Oldest
	Carandiru_Volta	1	1	None	Time Series	Oldest
	Santana_Volta	1	1	None	Time Series	Oldest
	Jardim_Sao_Paulo_Volta	1	1	None	Time Series	Oldest
	Parada_Inglesa_Volta	1	1	None	Time Series	Oldest
	Tucuruvi_Volta	1	1	None	Time Series	Oldest
	Tucuruvi_to_Parada_Inglesa	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Parada_Inglesa_to_Jardim_Sao_Paulo	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Jardim_Sao_Paulo_to_Santana	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Santana_to_Carandiru	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Carandiru_to_Tiete	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Tiete_to_Carandiru	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Carandiru_to_Santana	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Santana_to_Jardim_Sao_Paulo	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Jardim_Sao_Paulo_to_Parada_Inglesa	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Parada_Inglesa_to_Tucuruvi	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Tucuruvi_to_Tucuruvi	2	1	None	Time Series	Oldest, FIFO
	Buffer_Ida_Tucuruvi	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Ida_Parada_Inglesa	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Ida_Jardim_Sao_Paulo	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Ida_Santana	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Ida_Carandiru	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Volta_Carandiru	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Volta_Santana	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Volta_Jardim_Sao_Paulo	INF	1	None	Time Series	Oldest
	Buffer_Volta_Parada_Inglesa	INF	1	None	Time Series	Oldest

Figura 4.38 – Definição das “Locations”

- **Entities:**

As *entities* são os itens que serão processados no modelo, de forma que elas são os elementos dinâmicos do sistema. Desta forma tem-se duas *entities*:

- Passageiro: o passageiro que chega e desce de cada estação, no caso, os passageiros chegam na *location* “buffer” de chegada de passageiros da estação;
- Metrô: o trem que vai de estação para estação;

A utilização do trem do Metrô como uma *entity*, e não como um *resource*, é apenas um artifício utilizado para se simular a entrada e saída de passageiros, pois desta

forma, pode-se ter um atributo que indica a quantidade de passageiros no trem, associado à *entity* Metrô.

A Figura 4.39 mostra a definição das *entities* do sistema:



Entities				
Icon	Name	Speed (rpm)	Stats...	Notes...
	Passageiro	6	Time Series	
	Metrô	50	Time Series	

Figura 4.39 – Definição das “Entities”

- **Attributes:**

Para cada *entity* “Metrô” é necessário o controle do número de passageiros, de forma a se garantir que não entrará mais passageiros no Metrô do que o máximo permitido. Este controle pode ser feito, através de um *attribute*, que estará ligado à *entity* “Metrô”. A Figura 4.40 ilustra a definição do *attribute* “Quantidade_de_passageiros”.

Attributes			
ID	Type...	Classification...	Notes...
Quantidade_de_Passageiros	Integer	Ent	

Figura 4.40 – Definição dos “Attributes”

- **Path Networks:**

As *Path Networks* do sistema serão as três linhas do Metrô a serem modeladas, através das quais a *entity* Metrô circulará. Os *paths* serão os caminhos entre duas estações, sendo este unidirecional, e as interfaces ligam cada nó à *location* “estação” a ser considerada.

A Figura 4.41 ilustra a definição das *Path Networks*.

Path Networks							
Graphic	Name	Type	T/S	Paths...	Interfaces...	Mapping...	Nodes
	linha_Azul	Passing	Time	46	10	0	46
	linha_Vermelha	Passing	Time	36	12	0	36
	linha_Verde	Passing	Time	16	16	0	16

Paths			
From	To	BI	Time
N1	N2	Unit 0.11	
N2	N3	Unit 0.09	
N3	N4	Unit 0.10	
N4	N5	Unit 0.10	
N5	N6	Unit 0.10	
N6	N7	Unit 0.10	
N7	N8	Unit 0.10	
N8	N9	Unit 0.10	
N9	N10	Unit 0.10	
N10	N11	Unit 0.10	
N11	N12	Unit 0.10	
N12	N13	Unit 0.10	

Interfaces	
Node	Location
M1	Tucuruvi_Ida
M2	Parada_Engleza_I
M3	Jardim_Sao_Paulo
M4	Santana_Ida
M5	Carandiru_Ida
M42	Carandiru_Volta
M43	Santana_Volta
M44	Jardim_Sao_Paulo
M45	Parada_Engleza_V
M46	Tucuruvi_Volta

Figura 4.41 – Definição das “Path Networks”

- **Resources:**

Não haverá a necessidade de serem utilizados *resources*.

- **Processing:**

A definição dos processos envolvidos na malha metroviária é a parte mais complexa da modelagem. Dentro dos processos estão as definições da lógica de processamento do deslocamento de trens entre as estações, e a chegada de passageiros na estação.

- *Deslocamento de trens entre estações:*

Primeiro o trem deixa a estação e vai para o percurso entre duas estações, e depois o trem deve deixar o percurso entre duas estações e seguir para a próxima estação.

Na Figura 4.42 observa-se a lógica de processamento de saída do Metrô de uma estação, para o percurso entre as estações. Neste exemplo, o trem se encontra na estação Paraíso da Linha Azul, *location* "Paraiso_Azul_Ida" e vai para o percurso entre as estações Paraíso e a Ana Rosa, *location* "Paraiso_to_Ana_Rosa_Azul".

No quadro *Move Logic* tem-se a lógica de processamento. Quando o trem chegar na estação, ele espera o tempo, em segundos, definido pela variável "Espera_na_estacao_Azul" e depois se move para seu destino, no tempo, em segundos, definido pela variável "Tempo_entre_estacoes_Azul" dividido por dois, pois o trem não chegará à próxima estação, mas apenas na metade do percurso.

No quadro *Operation*, tem-se o processo de entrada e saída de passageiros do Metrô. As duas primeiras linhas são válidas apenas para as estações de cruzamento de linhas, as estações Sé, Paraíso e Ana Rosa. Elas simulam os passageiros que deixam uma linha e embarcam em outra.

Depois disto, tem-se a simulação da saída de passageiros, e depois, o embarque de passageiros no Metrô. Este embarque está condicionado a:

- Se o trem já está cheio, não ocorre o embarque de passageiros;
- Se o trem não estiver cheio e a quantidade de passageiros na estação for menor que o espaço para novos passageiros no trem, todos os passageiros da estação embarcam na estação, e a estação fica vazia;
- Se o trem não estiver cheio e a quantidade de passageiros na estação for maior que o espaço para novos passageiros no trem, entram apenas o número de passageiros, que o trem comporta, e o resto permanece na estação.

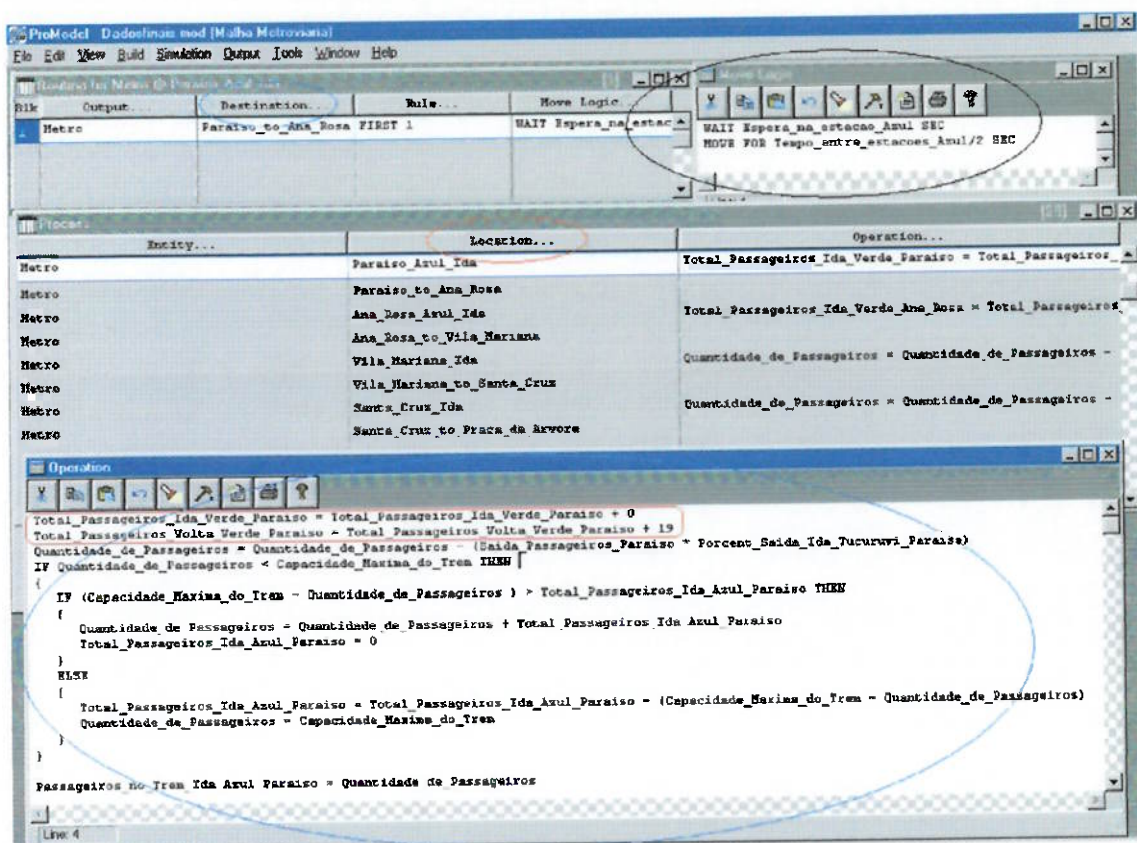


Figura 4.42 – Definição do processamento de deslocamento do trem de estação – linha

Depois que o trem deixa a estação e segue para o percurso entre estações, ele se encaminha para a próxima estação. Este procedimento está explicado a seguir.

No exemplo da Figura 4.43 o trem se encontra na *location* “Ana_Rosa_to_Vila_Mariana”, ou seja, está no percurso entre a estação Ana Rosa e Vila Mariana. Seu destino é a estação Vila Mariana, *location* “Vila_Mariana_Ida”, e o trem se moverá até seu destino, no tempo, em segundos, definido pela variável “Tempo_entre_estações_Azul” dividido por dois, pois o trem já se encontra a meio percurso para seu destino.

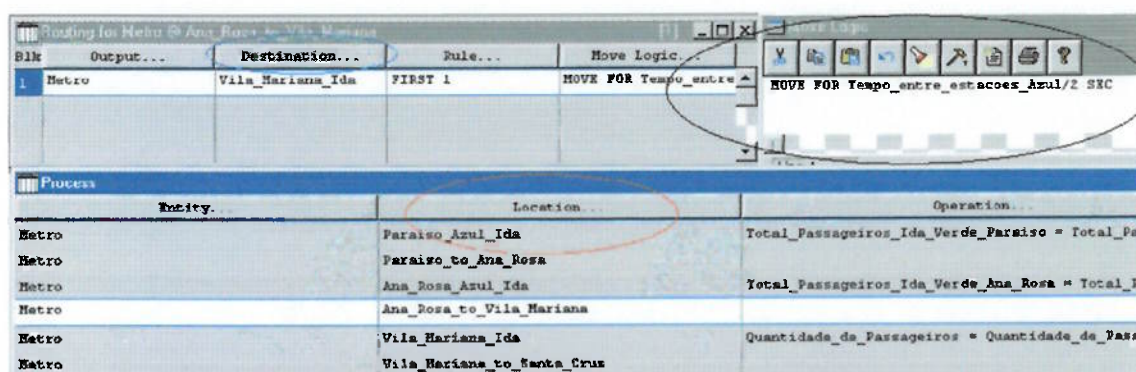


Figura 4.43 – Definição do processamento de deslocamento do trem de linha - estação

- *Chegada de passageiros na estação:*

Quando um passageiro chega em uma estação, uma *entity* “Passageiro” chega na *location* “Buffer” da estação correspondente, com seu sentido de deslocamento (por exemplo: Tucuruvi-Jabaquara). Desta forma, o valor da variável “Total_Passageiros” da estação é incrementada pelo valor de passageiros que chega nesta estação, de acordo com a porcentagem de passageiros que seguem para cada um dos sentidos da linha (vide Figura 4.44).

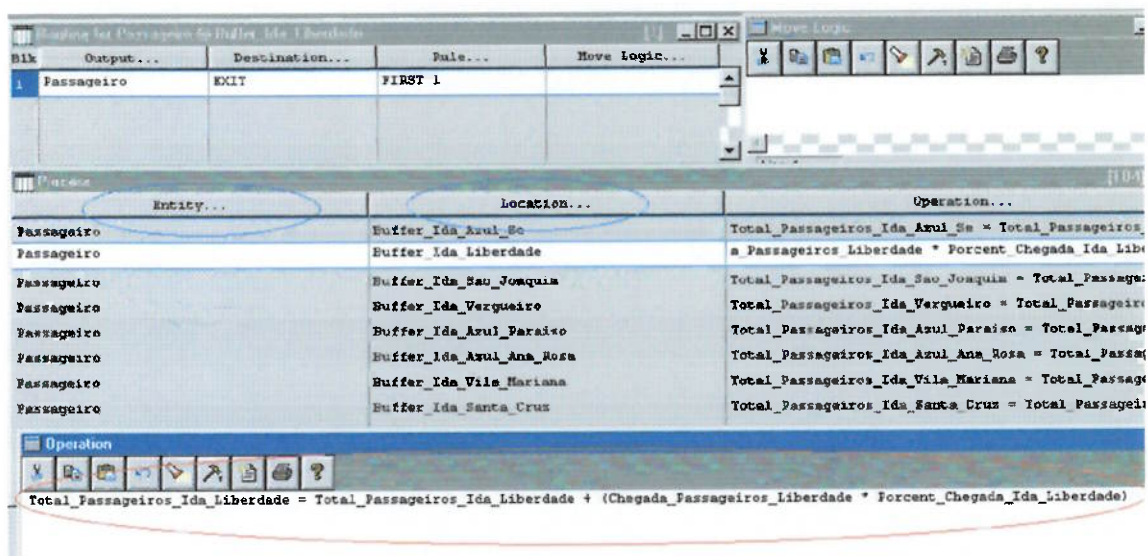


Figura 4.44 – Definição do “Processing” de chegada de passageiros na estação

• **Arrivals:**

A chegada das *entities* “Passageiros” e “Metrô” no sistema é definida a seguir:

- *Entitie* “Metrô”:

Como o foco desta simulação do sistema metroviário é nos horários de pico, quando todos os trens já estão operando normalmente, define-se que as *entities* “Metrô” devem chegar uma única vez no sistema, e depois elas circulam na malha metroviária.

- *Entitie* “Passageiro”:

Os passageiros devem chegar infinitamente nas estações, desta forma, define-se os *arrivals* das *entities* “Passageiros” para todas as estações, representadas pelas *locations* “Buffers” de cada estação, sendo que sua ocorrência é infinita.

A Figura 4.45 ilustra a definição dos *Arrivals* do sistema.

Entity...	Location...	Qty each...	First Time	Occurrences	Frequency	Logic	Disable
Metro	Paraiso_Azul_Volta	1		1			No
Metro	Vargueiro_Volta	1		1			No
Metro	Sao_Joachim_Volta	1		1			No
Metro	Liberdade_Volta	1		1			No
Metro	Se_Azul_Volta	1		1			No
Metro	Sao_Bento_Volta	1		1			No
Metro	Loz_Volta	1		1			No
Metro	Tiradentes_Volta	1		1			No
Metro	Armenia_Volta	1		1			No
Metro	Tiete_Volta	1		1			No
Metro	Carandiru_Volta	1		1			No
Metro	Santana_Volta	1		1			No
Metro	Jardim_Sao_Paulo_Volt	1		1			No
Metro	Parada_Ingleza_Volta	1		1			No
Metro	Tucuruvi_Volta	1		1			No
Passageiro	Buffer_Ida_Tucuruvi	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Parada_Inc	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Jardim_Sao	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Santana	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Carandiru	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Tiete	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Armenia	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Tiradentes	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Loz	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Sao_Bento	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Azul_Se	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Liberdade	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Sao_Joqui	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Vargueiro	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Azul_Paras	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Azul_Azul_V	1	0	INF	Frequencia_de_che		No
Passageiro	Buffer_Ida_Vila_Maria	1	0	INF	Frequencia_de_che		No

Figura 4.45 – Definição dos “Arrivals” do sistema.

- **Variables:**

As variáveis são os parâmetros do sistema, e os dados que são monitorados, e que serão analisados ao final da simulação. Pode-se separar estas variáveis em três categorias:

- **Relacionadas à linha do Metrô**

Estas variáveis são definidas no início do processamento e não se alteram durante a simulação.

- *Capacidade dos trens:* Indica a quantidade máxima de passageiros que cada entidade “Metrô” comporta.
- *Tempo entre as estações:* Indica o tempo que um trem leva para se locomover entre duas estações consecutivas. Este tempo pode ser diferente para as três linhas do Metrô.
- *Espera na estação:* Indica o tempo que cada trem permanece em cada estação. Este tempo pode ser diferente para as três linhas do Metrô.

A definição destas três variáveis está ilustrada na Figura 4.46.

Icon	ID	Type...	Initial value	Stats...	Notes
Yes	Total_Passageiros_Volta_TrianonHasp	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Consolacao	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Clinicas	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Sumare	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Vila_Madalena	Real	0300	Time Series, 1	
No	Capacidade_Maxima_do_Trem	Integer	1800	Time Series, 1	
No	Capacidade_Maxima_do_Trem_Vermelha	Integer	1800	Time Series, 1	
No	Capacidade_Maxima_do_Trem_Verde	Integer	1800	Time Series, 1	
No	Tempo_entre_estacoes_Azul	Integer	108	Time Series, 1	
No	Espera_na_estacao_Azul	Integer	20	Time Series, 1	
No	Tempo_entre_estacoes_Vermelha	Integer	101	Time Series, 1	
No	Espera_na_estacao_Vermelha	Integer	20	Time Series, 1	
No	Tempo_entre_estacoes_Verde	Integer	158	Time Series, 1	
No	Espera_na_estacao_Verde	Integer	20	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Tucuruvi	Real	2.53	Time Series, 1	
No	Porcent_Chegada_Ida_Tucuruvi	Real	1	Time Series, 1	

Figura 4.46 – Definição das variáveis relacionadas à cada linha do Metrô.

- Relacionadas à passageiros em cada estação

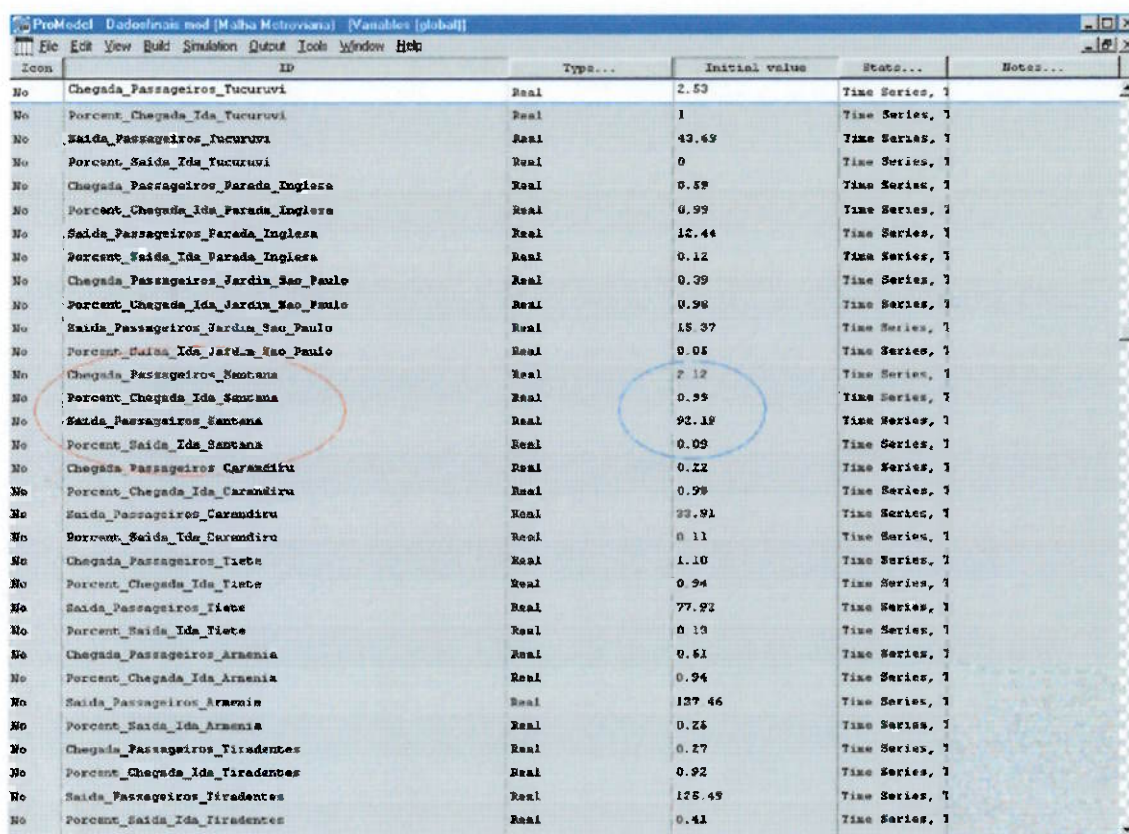
Estas variáveis são definidas no início do processamento e não se alteram durante a simulação.

- *Chegada de passageiros na estação*: Indica o número de passageiros que chegam por segundo, em cada estação.
- *Porcentagem de Chegada*: Porcentagem de passageiros que são transportados em um sentido da linha.
- *Saída de Passageiros*: Indica o número de passageiros que descem do trem em cada estação.
- *Porcentagem de Saída*: Porcentagem de passageiros que sai de um sentido da linha.

A porcentagem de passageiros que chegam/saem da estação no outro sentido é igual a 1 menos a porcentagem do sentido conhecido.

Para as estações onde ocorrem as trocas de linhas, tem-se variáveis que indicam a porcentagem de passageiros que se dirigem para os trens dos outros sentidos possíveis.

A Figura 4.47 ilustra a definição destas variáveis.



Icon	ID	Type...	Initial value	State...	Notes...
No	Chegada_Passageiros_Tucuruvi	Real	2.53	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Tucuruvi	Real	1	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Tucuruvi	Real	43.49	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Tucuruvi	Real	0	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Parada_Inglês	Real	0.59	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Parada_Inglês	Real	0.99	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Parada_Inglês	Real	12.44	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Parada_Inglês	Real	0.12	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Jardim_Sao_Paulo	Real	0.39	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Jardim_Sao_Paulo	Real	0.98	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Jardim_Sao_Paulo	Real	15.37	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Jardim_Sao_Paulo	Real	0.05	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Santana	Real	2.12	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Santana	Real	0.99	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Santana	Real	92.18	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Santana	Real	0.09	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Caramuru	Real	0.22	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Caramuru	Real	0.99	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Caramuru	Real	23.91	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Caramuru	Real	0.11	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Tietê	Real	1.10	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Tietê	Real	0.94	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Tietê	Real	77.92	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Tietê	Real	0.13	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Armenia	Real	0.61	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Armenia	Real	0.94	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Armenia	Real	127.46	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Armenia	Real	0.25	Time Series, 1	
No	Chegada_Passageiros_Tiradentes	Real	0.27	Time Series, 1	
No	Percent_Chegada_Ida_Tiradentes	Real	0.92	Time Series, 1	
No	Saída_Passageiros_Tiradentes	Real	125.49	Time Series, 1	
No	Percent_Saída_Ida_Tiradentes	Real	0.41	Time Series, 1	

Figura 4.47 – Definição das variáveis relacionadas à passageiros em cada estação

- Relacionadas ao total de passageiros em cada estação

Deve ser definida uma variável deste tipo para cada estação do Metrô. O valor desta variável será modificado toda vez que ocorrer o evento de chegada de passageiros na estação, ou quando um trem chegar na estação correspondente. No primeiro caso ela deve ser incrementada, e no segundo, decrementada. A Figura 4.48 ilustra a definição destas variáveis.

Icon	ID	Type...	Initial value	State...	Notes...
Yes	Total_Passageiros_Ida_Tucuruvi	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Parada_Inglês	Real	300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Jardim_São_Paulo	Real	300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Santana	Real	300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Carandiru	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Ipiranga	Real	0200	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Araçá	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Tiroteiros	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Luz	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_São_Bento	Real	0200	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Azul_Sc	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Ida_Liberdade	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Ida_São_José	Real	0200	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Ida_Vergueiro	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Ida_Azul_Paraíso	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Ida_Azul_Ana_Rosa	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Ida_Vila_Mariana	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Ida_Santa_Cruz	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Praça_da_Árvore	Real	0200	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Santa	Real	0200	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_São_Judas	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Conceloso	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Ida_Jabaquara	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Jabaquara	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Conceloso	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_São_Judas	Real	0300	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Santa	Real	0200	Time Series, 1	
Yes	Total_Passageiros_Volta_Praça_da_Árvore	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Volta_Santa_Cruz	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Volta_Vila_Mariana	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Volta_Azul_Ana_Rosa	Real	0300	Time Series, 1	
No	Total_Passageiros_Volta_Azul_Paraíso	Real	0300	Time Series, 1	

Figura 4.48 – Definição das variáveis relacionadas ao total de passageiros em cada estação

- Relacionadas ao total de passageiros em cada trem

Estas variáveis são utilizadas para se monitorar o número de passageiros que estão em cada trem do Metrô em circulação, desta forma, este tipo de variável será definida apenas para algumas estações, nas quais deseja-se monitorar o número de passageiros no trem. Vale ressaltar, que o número apresentado por esta variável indica o número de passageiros no trem, depois que ele deixou a estação correspondente.

A Figura 4.49 ilustra a definição deste tipo de variável.

Icon	ID	Type...	Initial value	Status...	Notes...
No	Percent_Saida_Ida_Brigadeiro	Real	0.06	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Santana	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Santana	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Sao_Bento	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Sao_Bento	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Arasmia	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Arasmia	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Azul_Se	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Azul_Se	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Azul_Paraiso	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Azul_Paraiso	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Azul_Ana_Rosa	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Azul_Ana_Rosa	Real	0	Time Series, 1	
No	Passageiros_no_Trem_Ida_Sao_Joaquim	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Sao_Joaquim	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Saude	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Saude	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Sumare	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Sumare	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_TrianonNasp	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_TrianonNasp	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Verde_Paraiso	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Verde_Paraiso	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Verde_Ana_Rosa	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Verde_Ana_Rosa	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Ida_Patriarca	Real	0	Time Series, 1	
Yes	Passageiros_no_Trem_Volta_Patriarca	Real	0	Time Series, 1	
No	Passageiros_no_Trem_Ida_Tatuape	Real	0	Time Series, 1	
No	Passageiros_no_Trem_Volta_Tatuape	Real	0	Time Series, 1	
No	Passageiros_no_Trem_Ida_Marechal_Deodoro	Real	0	Time Series, 1	
No	Passageiros_no_Trem_Volta_Marechal_Deodoro	Real	0	Time Series, 1	
No	Passageiros_no_Trem_Ida_Traca_da_Arvore	Real	0	Time Series, 1	

Figura 4.49 – Definição das variáveis relacionadas ao número de passageiros em cada trem

- **Malha Metroviária em ProModel**

Após a definição de todos os “elementos de modelagem”, o layout final, do sistema em ProModel é apresentado na Figura 4.50.

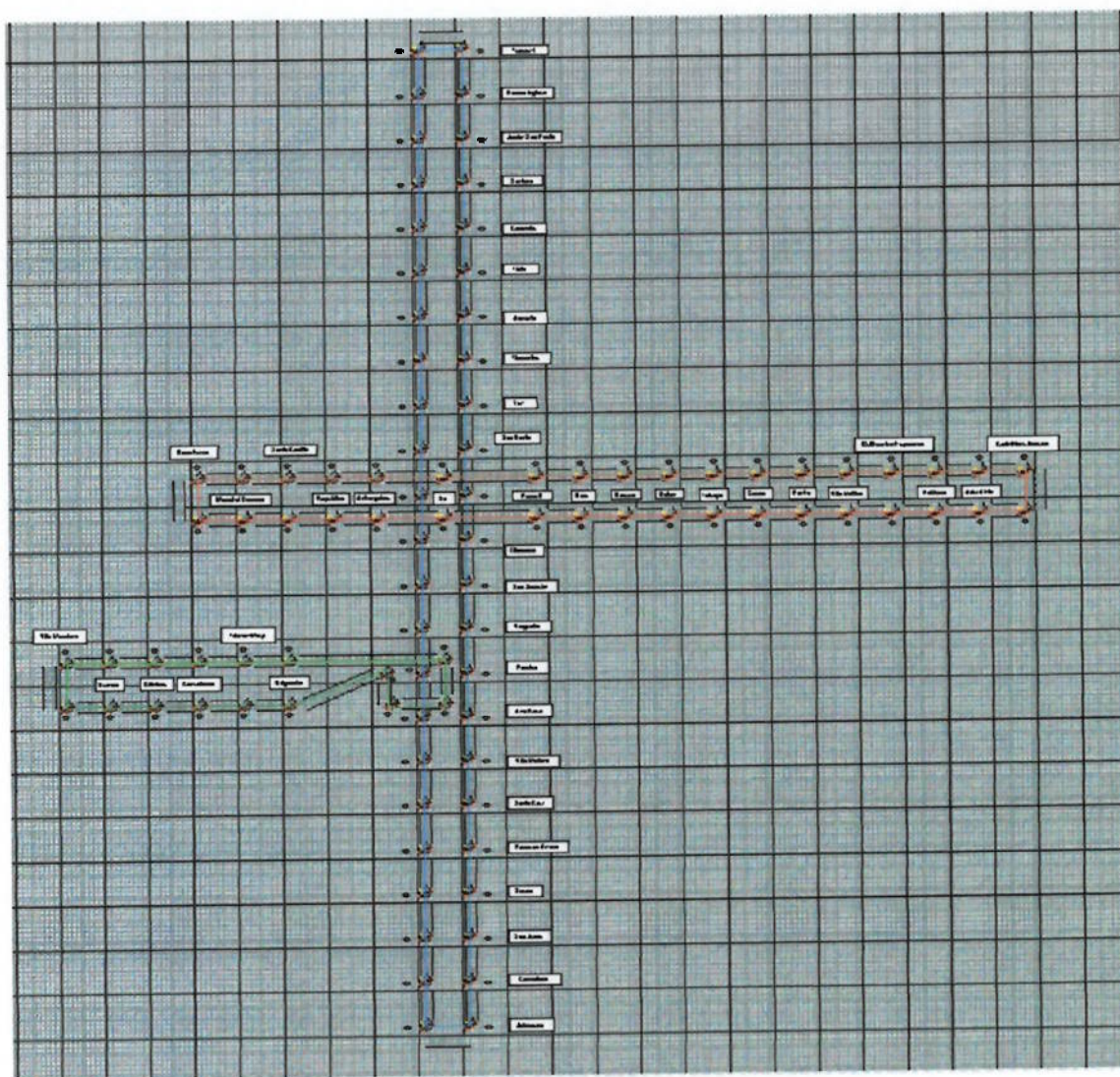


Figura 4.50 – Layout da Malha Metroviária em ProModel

A Figura 4.51 demonstra a representação da Linha Verde com um maior nível de detalhamento, sendo que as demais linhas seguem o mesmo padrão.

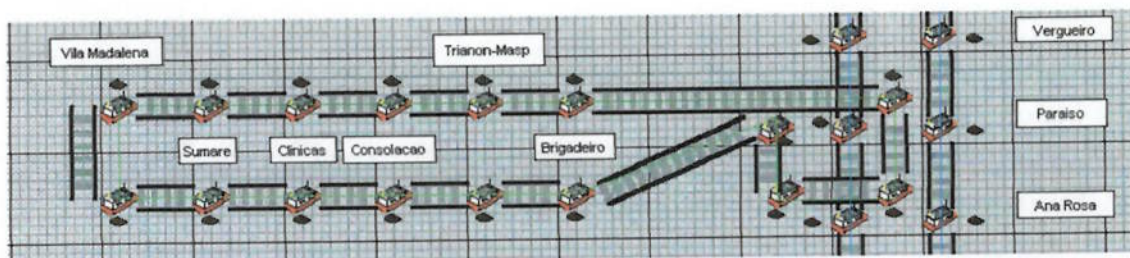


Figura 4.51 – Layout – Linha Verde

4.4. Verificação e Validação dos Modelos

4.4.1. Verificação e Validação dos Modelos em HPSim

Os modelos em HPSim foram simulados por tempo equivalente a uma hora de circulação de trens do sistema real. De acordo com observações sucessivas durante a simulação, constata-se a perfeita representação da dinâmica do sistema metroviário real, sendo obedecidos todos os tempos entre estações e de parada, além do número de trens em cada linha.

A validação dos modelos foi conduzida com a comparação dos resultados da simulação (das variáveis pertinentes monitoradas) com os respectivos valores reais. Estas variáveis são: os números totais de embarque e desembarque de passageiros em cada uma das estações, em seus dois sentidos, bem como o tráfego nas interconexões de linhas. Além disto, o total de passageiros por hora de pico, isto é, total de embarques e desembarques, é comparado com as capacidades reais, em cada estação, fornecidas pelo Metrô [2002]. Estes dados são apresentados em forma de gráficos de demanda referente a cada linha, em ambos os seus sentidos.

- Período da Manhã:

- Gráficos de demanda para Linha Azul:

A simulação do modelo em horário de pico da manhã apresenta as tabelas de dados de demanda de passageiros por hora (Tabela 4-15 e Tabela 4-16):

Tabela 4-15: Dados comparativos da Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Jabaquara	10.512	10.515	0,03%	0	0	0%	10.512	10.515	0,03%
Conceição	3.966	3.974	0,20%	43	29	32,56%	14.435	14.460	0,17%
São Judas	2.104	2.117	0,62%	237	232	2,11%	16.302	16.345	0,26%
Saúde	3.300	3.306	0,18%	731	735	0,55%	18.871	18.916	0,24%
Praça da Árvore	1.433	1.443	0,70%	601	600	0,17%	19.703	19.759	0,28%
Santa Cruz	2.773	2.780	0,25%	1.691	1.690	0,06%	20.785	20.849	0,31%
Vila Mariana	1.733	1.738	0,29%	1.337	1.333	0,30%	21.181	21.254	0,34%
Ana Rosa	1046	952	9,00%	6.665	6.665	0%	15.562	15.541	0,13%
Paraiso	2.997	3.007	0,33%	1.524	1.519	0,33%	17.034	17.029	0,03%
Vergueiro	513	527	2,73%	1.124	1.116	0,71%	16.423	16.440	0,10%
São Joaquim	673	682	1,34%	2.396	2.480	3,51%	14.700	14.642	0,39%
Liberdade	279	288	3,23%	645	640	0,78%	14.334	14.290	0,31%
Sé	12.858	12.870	0,09%	8.814	8.811	0,03%	18.378	18.349	0,16%
São Bento	174	179	2,87%	3.887	3.993	2,73%	14.665	14.535	0,89%
Luz	162	167	3,09%	1.731	1.716	0,87%	13.096	12.986	0,84%
Tiradentes	75	78	4,00%	2.438	2.430	0,33%	10.733	10.634	0,92%
Armênia	116	120	3,45%	3.319	3.309	0,30%	7.530	7.445	1,13%
Tietê	242	256	5,79%	2.178	2.176	0,09%	5.594	5.525	1,23%
Carandiru	18	19	5,56%	934	928	0,64%	4.678	4.616	1,33%
Santana	45	48	6,67%	2.586	2.572	0,54%	2.137	2.092	2,11%
Jardim São Paulo	21	32	52,38%	467	453	3,00%	1.691	1.671	1,18%
Parada Inglesa	15	19	26,67%	352	346	1,70%	1.354	1.344	0,74%
Tucuruvi	0	0	0%	1.354	1.344	0,74%	0	0	0%
	Média		5,6%	Média		2,26%	Média		0,57%

Tabela 4-16: Dados comparativos da Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Tucuruvi</i>	9.124	9.114	0,11%	0	0	0%	9.124	9.114	0,11%
<i>Parada Inglesa</i>	2.101	2.088	0,62%	42	32	23,81%	11.183	11.170	0,12%
<i>Jardim São Paulo</i>	1.379	1.296	6,02%	23	30	30,43%	12.539	12.436	0,82%
<i>Santana</i>	7.599	7.570	0,38%	254	279	9,84%	19.885	19.727	0,79%
<i>Carandiru</i>	790	775	1,90%	117	124	5,98%	20.558	20.378	0,88%
<i>Tiete</i>	3.714	3.744	0,81%	296	310	4,73%	23.976	23.812	0,68%
<i>Armênia</i>	1.712	1.715	0,18%	1.046	1.054	0,76%	24.641	24.473	0,68%
<i>Tiradentes</i>	885	879	0,68%	1.549	1.612	4,07%	23.978	23.740	0,99%
<i>Luz</i>	442	375	15,16%	1.100	1.184	7,64%	23.320	22.931	1,67%
<i>São Bento</i>	490	384	21,63%	1.650	1.760	6,67%	22.160	21.555	2,73%
<i>Sé</i>	37.339	39.340	5,36%	7.029	7.488	6,53%	52.471	53.407	1,78%
<i>Liberdade</i>	313	300	4,15%	1.298	1.305	0,54%	51.485	52.402	1,78%
<i>São Joaquim</i>	511	384	24,85%	4.987	5.007	0,40%	47.009	47.779	1,64%
<i>Vergueiro</i>	371	360	2,96%	3.659	3.720	1,67%	43.721	44.419	1,60%
<i>Paraiso</i>	765	725	5,23%	19.073	19.096	0,12%	25.413	26.048	2,50%
<i>Ana Rosa</i>	1.143	1.110	2,89%	4.891	4.867	0,49%	21.664	22.291	2,89%
<i>Vila Mariana</i>	103	75	27,18%	4.514	4.526	0,27%	17.254	17.840	3,40%
<i>Santa Cruz</i>	91	88	3,30%	7.012	7.254	3,45%	10.333	10.674	3,30%
<i>Praça da Árvore</i>	351	346	1,42%	1.357	1.395	2,80%	9.326	9.625	3,21%
<i>Saúde</i>	8	7	12,50%	1.954	2.005	2,61%	7.380	7.627	3,35%
<i>São Judas</i>	52	49	5,77%	2.022	2.110	4,35%	5.410	5.566	2,88%
<i>Conceição</i>	30	29	3,33%	1.602	1.697	5,93%	3.837	3.898	1,59%
<i>Jabaquara</i>	0	0	0%	3.837	3.898	1,59%	0	0	0%
	Média		6,37%	Média		5,42%	Média		1,71%

Os resultados apresentados no modelo HPSim são coerentes com os dados apresentados pelo sistema real. As discrepâncias médias percentuais limitam-se a um valor de 6%, aproximadamente. Contudo, destacam-se os valores mínimos (azul) e máximos (vermelho). Apesar dos valores máximos serem elevados em relação aos

valores médios, estes podem ser desconsiderados, tendo em vista o número reduzido de passageiros envolvidos em tais situações. Ressalta-se também que estes erros são compensados pelo próprio modelo, já que os valores máximo e mínimo do volume transportado estão próximos à média referente a tal variável. Os gráficos de demanda para os dados apresentados são (Figura 4.52e Figura 4.53):

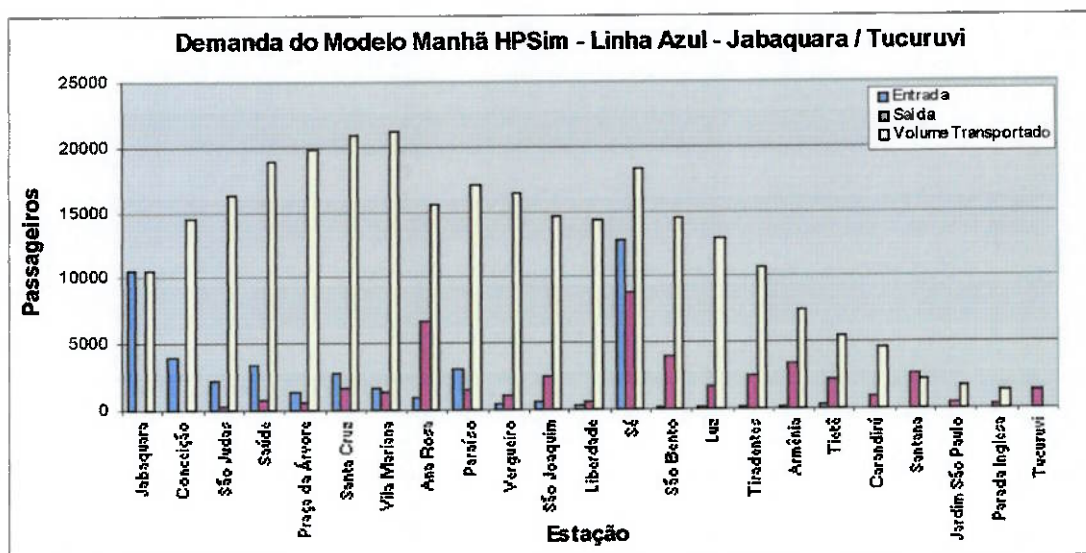


Figura 4.52 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Jabaquara/Tucuruvi (Manhã)

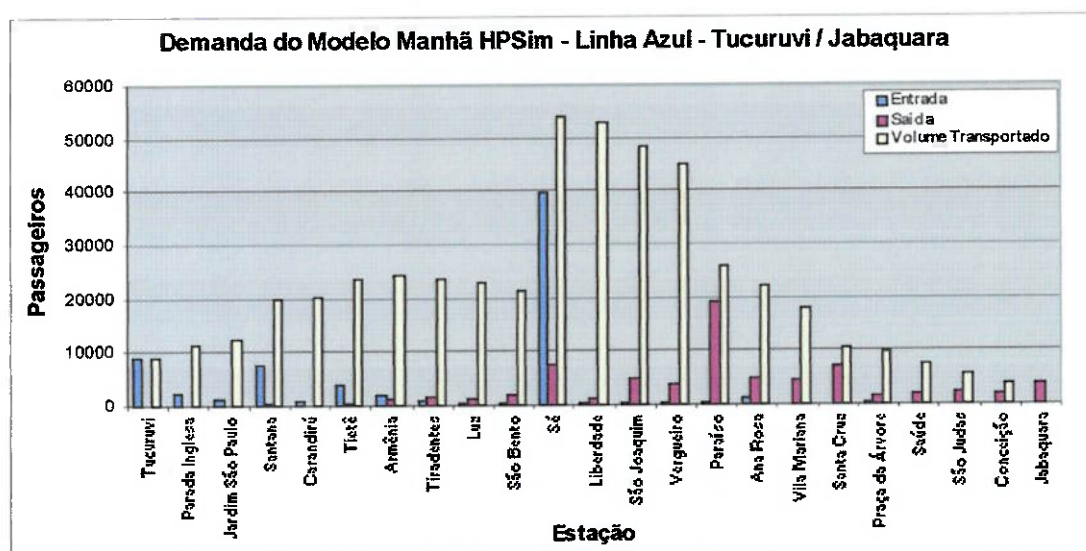


Figura 4.53 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Tucuruvi/Jabaquara (Manhã)

Em ambos os gráficos (Figura 4.52 e Figura 4.53), os valores apresentados são compatíveis com os valores apresentados nas Figura 4.2 e Figura 4.3, que contêm os valores apresentados pelo sistema real.

Os dados comparativos entre o total de demanda de passageiros e capacidade total das estações da Linha Azul, bem como o volume total de passageiros transportados, são apresentados na Figura 4.54 e na Tabela 4-17 abaixo:

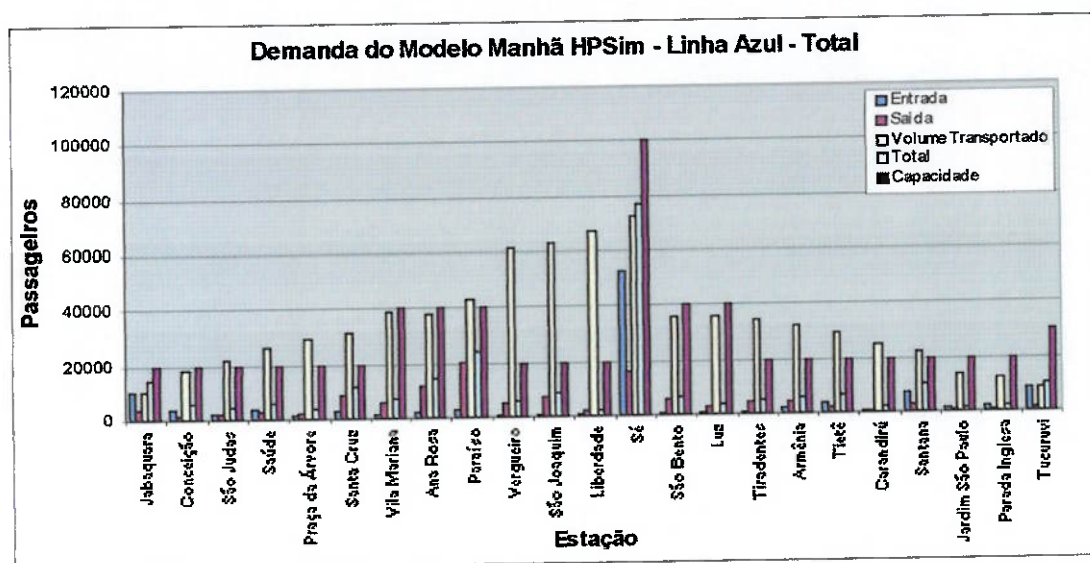


Figura 4.54 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Azul (Manhã)

Tabela 4-17: Dados comparativos totais da Linha Azul (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Jabaquara</i>	10.512	10.515	0,03%	3.837	3.898	1,59%	10.512	10.515	0,03%
<i>Conceição</i>	3.996	4.003	0,18%	1.645	1.726	4,92%	18.272	18.358	0,47%
<i>São Judas</i>	2.156	2.166	0,46%	2.259	2.342	3,67%	21.712	21.911	0,92%
<i>Saúde</i>	3.308	3.313	0,15%	2.685	2.740	2,05%	26.251	26.543	1,11%
<i>Praça da Árvore</i>	1.784	1.789	0,28%	1.958	1.995	1,89%	29.029	29.384	1,22%
<i>Santa Cruz</i>	2.864	2.868	0,14%	8.703	8.944	2,77%	31.118	31.523	1,30%
<i>Vila Mariana</i>	1.836	1.813	1,25%	5.851	5.859	0,14%	38.435	39.094	1,71%
<i>Ana Rosa</i>	2.189	2.156	1,51%	11.556	11.532	0,21%	37.226	37.832	1,63%
<i>Paraíso</i>	3.762	3.732	0,80%	20.597	20.615	0,09%	42.447	43.077	1,48%
<i>Vergueiro</i>	884	887	0,34%	4.783	4.836	1,11%	60.144	61.359	2,02%
<i>São Joaquim</i>	1.184	1.066	9,97%	7.383	7.487	1,41%	61.709	62.921	1,96%
<i>Liberdade</i>	592	588	0,68%	1.943	1.945	0,10%	65.819	67.192	2,09%
<i>Sé</i>	50.197	52.710	5,01%	15.843	16.299	2,88%	70.849	72.256	1,99%
<i>São Bento</i>	664	563	15,21%	5.537	5.753	3,90%	36.825	36.090	2,00%
<i>Luz</i>	604	542	10,26%	2.831	2.900	2,44%	36.416	35.917	1,37%
<i>Tiradentes</i>	960	957	0,31%	3.987	4.042	1,38%	34.711	34.374	0,97%
<i>Armênia</i>	1.828	1.835	0,38%	4.365	4.363	0,05%	32.171	31.918	0,79%
<i>Tietê</i>	3.956	4.000	1,11%	2.474	2.486	0,49%	29.570	29.337	0,79%
<i>Carandiru</i>	808	794	1,73%	1.051	1.052	0,10%	25.236	24.994	0,96%
<i>Santana</i>	7.644	7.618	0,34%	2.840	2.851	0,39%	22.022	21.819	0,92%
<i>Jardim São Paulo</i>	1.400	1.328	5,14%	490	483	1,43%	14.230	14.107	0,86%
<i>Parada Inglesa</i>	2.116	2.107	0,43%	394	378	4,06%	12.537	12.514	0,18%
<i>Tucuruvi</i>	9.124	9.114	0,11%	1.354	1.344	0,74%	9.124	9.114	0,11%
	Média		1,72%	Média		1,08%	Média		0,39%

Mais uma vez, os resultados decorrentes da simulação apresentam-se compatíveis com os valores apresentados pelo sistema real (Figura 4.4) As discrepâncias entre os valores obtidos na simulação e os valores reais são pequenas (0,39% para o volume total transportado, em média, apresentando valor máximo de 2,09%).

- Gráficos de demanda para Linha Verde:

A simulação do modelo em horário de pico da manhã apresenta as tabelas de dados de demanda de passageiros por hora (Tabela 4-18 e Tabela 4-19):

Tabela 4-18: Dados comparativos da Linha Verde – Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Ana Rosa</i>	5.796	5.792	0,07%	0	0	0%	5.796	5.792	0,07%
<i>Paraiso</i>	16.659	16.656	0,02%	0	0	0%	22.455	22.448	0,03%
<i>Brigadeiro</i>	266	270	1,50%	5.155	5.159	0,08%	17.566	17.559	0,04%
<i>Trianon-Masp</i>	128	130	1,56%	3.703	3.696	0,19%	13.991	13.993	0,01%
<i>Consolação</i>	82	86	4,88%	5.936	5.929	0,12%	8.137	8.150	0,16%
<i>Clinicas</i>	9	10	11,11%	5.426	5.430	0,07%	2.720	2.730	0,37%
<i>Sumaré</i>	0	0	0%	1.000	1.005	0,50%	1.720	1.725	0,29%
<i>Vila Madalena</i>	0	0	0%	1.720	1.725	0,29%	0	0	0%
	Média		2,39%	Média		0,16%	Média		0,12%

Tabela 4-19: Dados comparativos da Linha Verde – Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Vila Madalena</i>	1.851	1.845	0,32%	0	0	0%	1.851	1.845	0,32%
<i>Sumaré</i>	444	438	1,35%	26	24	7,69%	2.270	2.259	0,48%
<i>Clinicas</i>	1.343	1.344	0,07%	124	122	1,61%	3.489	3.481	0,23%
<i>Consolação</i>	970	976	0,62%	328	320	2,44%	4.131	4.137	0,15%
<i>Trianon-Masp</i>	628	632	0,64%	310	304	1,94%	4.449	4.465	0,36%
<i>Brigadeiro</i>	674	678	0,59%	345	343	0,58%	4.778	4.800	0,46%
<i>Paraíso</i>	0	0	0%	3.240	3.255	0,46%	1.538	1.545	0,46%
<i>Ana Rosa</i>	0	0	0%	1.538	1.545	0,46%	0	0	0%
	Média		0,45%	Média		1,90%	Média		0,31%

Os resultados apresentados no modelo HPSim são coerentes com os dados apresentados pelo sistema real. As discrepâncias médias percentuais limitam-se a um valor de 2%, aproximadamente. Contudo, destacam-se os valores mínimos (azul) e máximos (vermelho). Apesar dos valores máximos serem elevados em relação aos valores médios, estes podem ser desconsiderados, tendo em vista o número reduzido de passageiros envolvidos em tais situações. Ressalta-se também que estes erros são compensados pelo próprio modelo, já que os valores máximo e mínimo do volume transportado estão próximos à média referente a tal variável. Os gráficos de demanda para os dados apresentados são (Figura 4.55 e Figura 4.56):

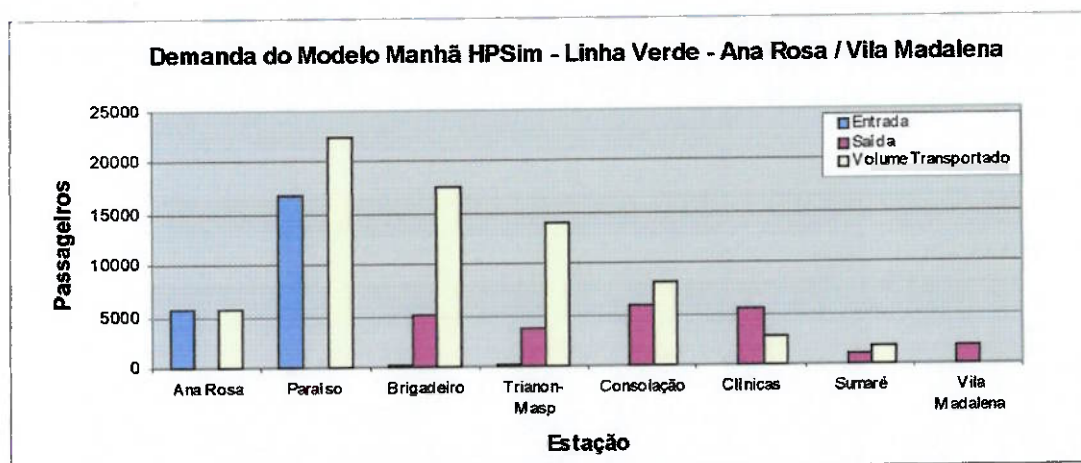


Figura 4.55 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Ana Rosa/Vila Madalena (Manhã)

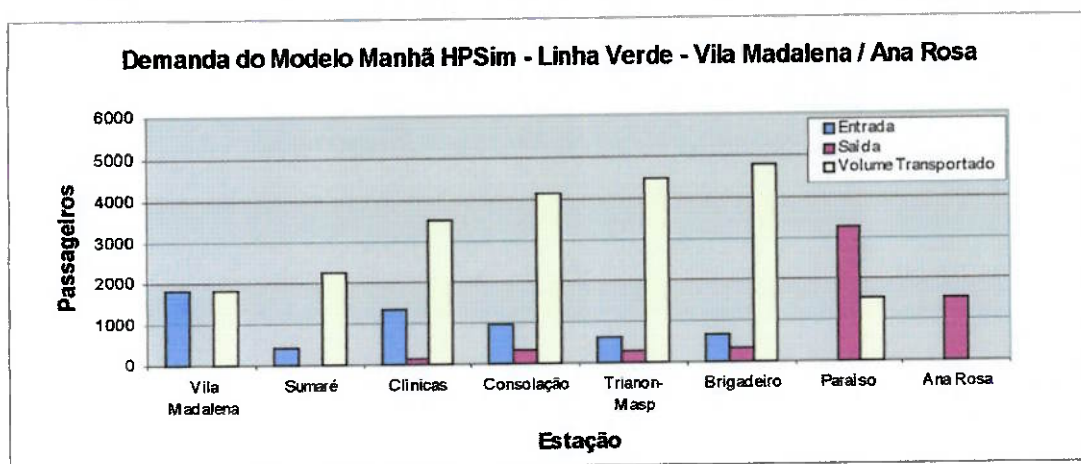


Figura 4.56 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Vila Madalena/Ana Rosa (Manhã)

Em ambos os gráficos (Figura 4.55 e Figura 4.56), os valores apresentados também são compatíveis com os valores apresentados nas Figura 4.8 e Figura 4.9, que contêm os valores apresentados pelo sistema real.

O gráfico comparativo entre o total de demanda de passageiros e capacidade total das estações da Linha Verde, bem como o volume de passageiros transportados é apresentado na Figura 4.57 e na Tabela 4-20 abaixo:

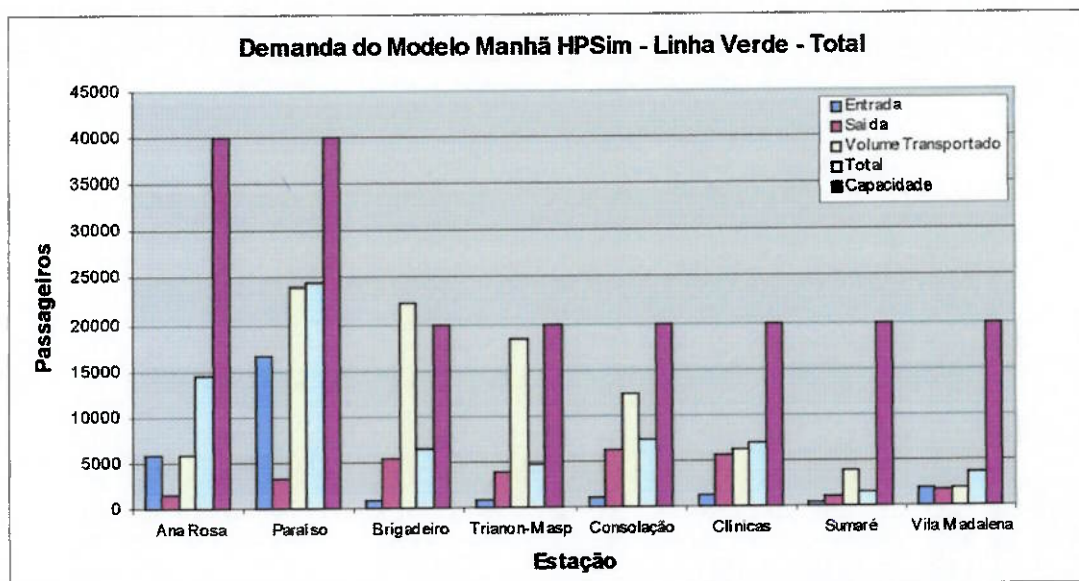


Figura 4.57 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Verde (Manhã)

Tabela 4-20: Dados comparativos totais da Linha Verde (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Ana Rosa	5.796	5.792	0,07%	1.538	1.545	0,46%	5.796	5.792	0,07%
Paraíso	16.659	16.656	0,02%	3.240	3.255	0,46%	23.993	23.993	0%
Brigadeiro	940	948	0,85%	5.500	5.502	0,04%	22.344	22.359	0,07%
Trianon-Masp	756	762	0,79%	4.013	4.000	0,32%	18.440	18.458	0,10%
Consolação	1.052	1.062	0,95%	6.264	6.249	0,24%	12.268	12.287	0,15%
Clinicas	1.352	1.354	0,15%	5.550	5.552	0,04%	6.209	6.211	0,03%
Sumaré	444	438	1,35%	1.026	1.029	0,29%	3.990	3.984	0,15%
Vila Madalena	1.851	1.845	0,32%	1.720	1.725	0,29%	1.851	1.845	0,32%
	Média		0,12%	Média		0,13%	Média		0,02%

Mais uma vez, os resultados decorrentes da simulação apresentam-se compatíveis com os valores apresentados pelo sistema real (Figura 4.10). As discrepâncias entre os valores obtidos na simulação e os valores reais são pequenas (0,02% para o volume total transportado, em média, apresentando valor máximo de 0,32%).

- Gráficos de demanda para Linha Vermelha:

A simulação do modelo em horário de pico da manhã apresenta as tabelas de dados de demanda de passageiros por hora (Tabela 4-21 e Tabela 4-22):

Tabela 4-21: Dados comparativos da Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Corinthians-Itaquera	16.804	16.809	0,03%	0	0	0%	16.804	16.809	0,03%
Artur Alvin	14.384	14.391	0,05%	65	62	4,32%	31.123	31.138	0,05%
Patriarca	5.550	5.402	2,67%	119	114	3,96%	36.554	36.426	0,35%
Guilhermina-Esperança	3.967	3.952	0,38%	141	135	4,48%	40.380	40.243	0,34%
Vila Matilde	3.929	3.914	0,37%	86	76	12,12%	44.222	44.081	0,32%
Penha	5.140	5.130	0,19%	595	587	1,34%	48.767	48.624	0,29%
Carrão	5.441	5.434	0,13%	1.650	1.634	0,99%	52.558	52.424	0,25%
Tatuapé	5.012	5.021	0,17%	1.601	1.591	0,64%	55.969	55.854	0,21%
Belém	3.407	3.404	0,09%	1.892	1.889	0,14%	57.485	57.369	0,20%
Bresser	969	972	0,36%	2.364	2.353	0,45%	56.089	55.988	0,18%
Brás	14.705	14.809	0,71%	1.392	1.344	3,44%	69.402	69.453	0,07%
Pedro II	1.019	1.026	0,72%	846	836	1,20%	69.575	69.643	0,10%
Sé	8.793	8.778	0,17%	42.959	43.109	0,35%	35.409	35.312	0,27%
Anhangabaú	573	585	2,14%	8.533	8.525	0,09%	27.448	27.372	0,28%
República	240	254	5,92%	7.338	7.332	0,09%	20.350	20.294	0,28%
Santa Cecília	118	124	5,39%	3.881	3.876	0,14%	16.586	16.542	0,27%
Marechal Deodoro	140	152	8,30%	3.849	3.836	0,33%	12.878	12.858	0,16%
Barra Funda	0	0	0%	12.878	12.858	0,15%	0	0	0%
	Média		1,54%	Média		1,90%	Média		0,20%

Tabela 4-22: Dados comparativos da Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Barra Funda</i>	25.104	25.474	1,47%	0	0	0%	25.104	25.474	1,47%
<i>Marechal Deodoro</i>	1.800	1.739	3,39%	2.217	2.214	0,14%	24.688	24.999	1,26%
<i>Santa Cecília</i>	1.086	1.044	3,87%	1.129	1.140	0,97%	24.645	24.903	1,05%
<i>República</i>	756	720	4,77%	1.645	1.634	0,67%	23.756	23.989	0,98%
<i>Anhangabaú</i>	1.343	1.365	1,64%	1.934	1.989	2,84%	23.166	23.365	0,86%
<i>Sé</i>	5.620	5.472	2,63%	13.807	13.806	0,01%	14.979	15.031	0,35%
<i>Pedro II</i>	281	273	2,85%	841	858	2,02%	14.420	14.446	0,18%
<i>Brás</i>	5.552	5.538	0,25%	2.210	2.223	0,59%	17.763	17.761	0,01%
<i>Bresser</i>	251	273	8,76%	5.825	5.867	0,72%	12.189	12.167	0,18%
<i>Belém</i>	329	335	1,82%	2.398	2.379	0,79%	10.120	10.123	0,03%
<i>Tatuapé</i>	288	295	2,43%	2.113	2.106	0,33%	8.295	8.312	0,20%
<i>Carrão</i>	247	244	1,21%	3.099	3.081	0,58%	5.442	5.475	0,61%
<i>Penha</i>	180	185	2,78%	1.344	1.326	1,34%	4.279	4.334	1,29%
<i>Vila Matilde</i>	67	74	10,45%	787	785	0,25%	3.560	3.623	1,77%
<i>Guilhermina-Esperança</i>	77	81	5,19%	547	546	0,18%	3.090	3.158	2,20%
<i>Patriarca</i>	54	58	7,41%	647	642	0,77%	2.497	2.574	3,08%
<i>Artur Alvim</i>	0	0	0%	1.488	1.521	2,22%	1.009	1.053	4,36%
<i>Corinthians-Itaquera</i>	0	0	0%	1.009	1.053	4,36%	0	0	0%
	Média		3,38%	Média		1,04%	Média		1,10%

Os resultados apresentados no modelo HPSim são coerentes com os dados apresentados pelo sistema real. As discrepâncias médias percentuais limitam-se a um valor de 3%, aproximadamente. Contudo, destacam-se os valores mínimos (azul) e máximos (vermelho). Apesar dos valores máximos serem elevados em relação aos valores médios, estes podem ser desconsiderados, tendo em vista o número reduzido de passageiros envolvidos em tais situações. Ressalta-se também que estes erros são compensados pelo próprio modelo, já que os valores máximo e mínimo do volume

transportado estão próximos à média referente a tal variável. Os gráficos de demanda para os dados apresentados são (Figura 4.58 e Figura 4.59):

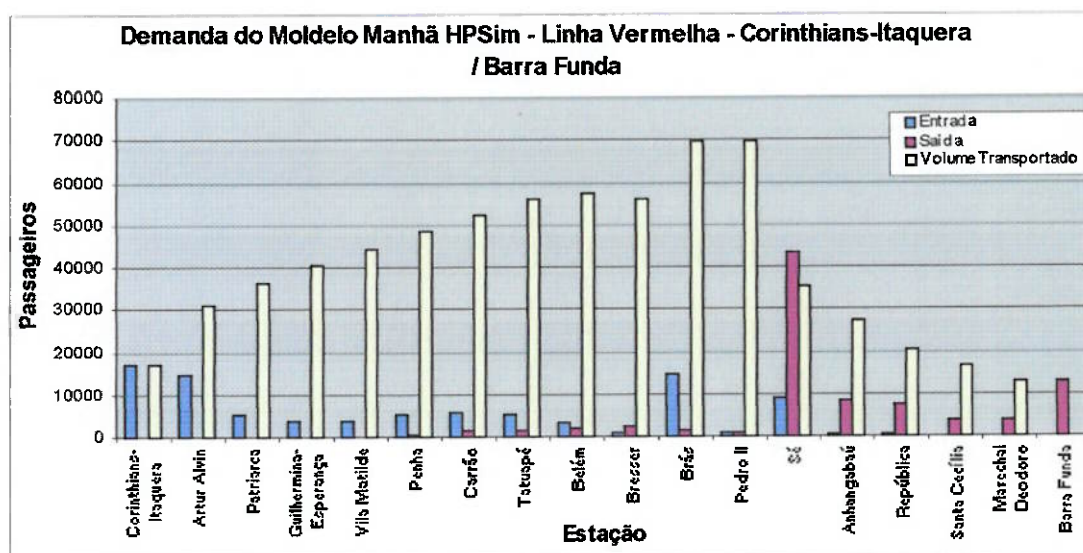


Figura 4.58 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Corinthians-Itaquera/Barra Funda (Manhã)

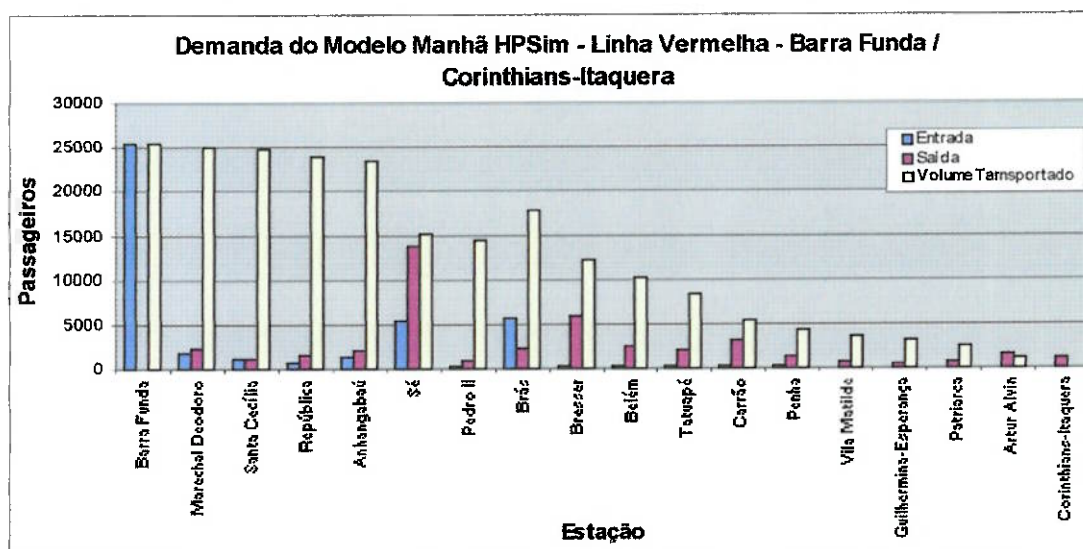


Figura 4.59 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Barra Funda/Corinthians-Itaquera (Manhã)

Em ambos os gráficos (Figura 4.58 e Figura 4.59), os valores apresentados são compatíveis com os valores apresentados nas Figura 4.14 e Figura 4.15, que contêm os valores apresentados pelo sistema real, assim como nos casos anteriores.

O gráfico comparativo entre o total de demanda de passageiros e capacidade total das estações da Linha Vermelha, bem como o volume de passageiros transportados é apresentado na Figura 4.60 e Tabela 4-23 abaixo:

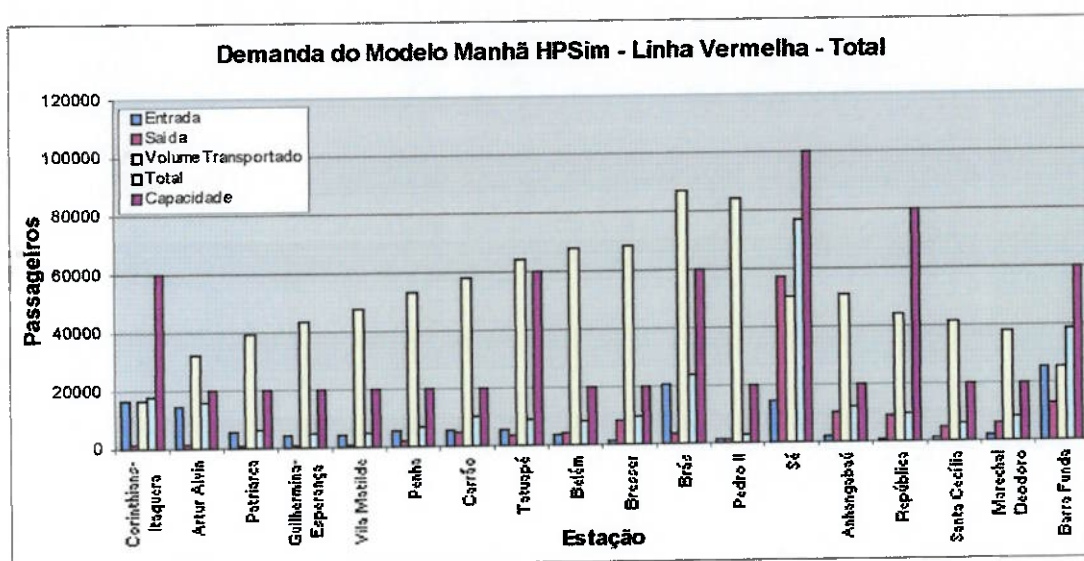


Figura 4.60 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Vermelha (Manhã)

Tabela 4-23: Dados comparativos totais da Linha Vermelha (Manhã)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Corinthians-Itaquera	16.804	16.809	0,03%	1.009	1.053	4,36%	16.804	16.809	0,03%
Artur Alvin	14.384	14.391	0,05%	1.552	1.583	1,94%	32.132	32.191	0,18%
Patriarca	5.603	5.460	2,56%	765	756	1,27%	39.051	39.000	0,13%
Guilhermina-Esperança	4.044	4.033	0,28%	688	681	1,07%	43.470	43.401	0,16%
Vila Matilde	3.995	3.988	0,19%	873	861	1,43%	47.782	47.704	0,16%
Penha	5.319	5.315	0,09%	1.938	1.913	1,34%	53.046	52.958	0,17%
Carrão	5.688	5.678	0,18%	4.749	4.715	0,72%	57.999	57.899	0,17%
Tatuapé	5.300	5.316	0,30%	3.714	3.697	0,46%	64.264	64.166	0,15%
Belém	3.736	3.739	0,08%	4.289	4.268	0,50%	67.604	67.492	0,17%
Bresser	1.219	1.245	2,09%	8.188	8.220	0,38%	68.278	68.155	0,18%
Brás	20.256	20.347	0,45%	3.601	3.567	0,97%	87.165	87.214	0,06%
Pedro II	1.299	1.299	0,05%	1.687	1.694	0,41%	83.994	84.089	0,11%
Sé	14.413	14.250	1,13%	56.766	56.915	0,26%	50.387	50.343	0,09%
Anhangabaú	1.915	1.950	1,79%	10.466	10.514	0,45%	50.614	50.737	0,24%
República	995	974	2,19%	8.983	8.966	0,19%	44.106	44.283	0,40%
Santa Cecília	1.203	1.168	2,96%	5.010	5.016	0,11%	41.231	41.445	0,52%
Marechal Deodoro	1.940	1.891	2,54%	6.065	6.050	0,26%	37.565	37.857	0,77%
Barra Funda	25.104	25.474	1,47%	12.877	12.858	0,15%	25.104	25.474	1,47%
	Média		0,33%	Média		0,02%	Média		0,13%

Mais uma vez, os resultados decorrentes da simulação apresentam-se compatíveis com os valores apresentados pelo sistema real (Figura 4.16). As discrepâncias entre os valores obtidos na simulação e os valores reais são pequenas (0,13% para o volume total transportado, em média, apresentando valor máximo de 1,47%). Portanto, todos os resultados permitem constatar a compatibilidade do modelo desenvolvido em HPSim para o horário de pico da manhã. Desse modo, o modelo está validado.

• Período da Tarde:

- Gráficos de demanda para Linha Azul:

Tem-se os dados de demanda por hora (Tabela 4-24 e Tabela 4-25):

Tabela 4-24: Dados comparativos da Linha Azul – Jabaquara / Tucuruvi (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Jabaquara	3.544	3.550	0,17%	0	0	0%	3.544	3.550	0,17%
Conceição	4.527	4.532	0,11%	46	41	10,87%	8.025	8.041	0,20%
São Judas	1.994	2.001	0,35%	106	103	2,83%	9.913	9.939	0,26%
Saúde	2.237	2.233	0,18%	278	269	3,24%	11.872	11.903	0,26%
Praça da Árvore	2.173	2.175	0,09%	214	210	1,87%	13.831	13.868	0,27%
Santa Cruz	4.753	4.743	0,21%	652	651	0,15%	17.932	17.960	0,16%
Vila Mariana	3.636	3.627	0,25%	706	713	0,99%	20.862	20.874	0,06%
Ana Rosa	5.544	5.370	3,14%	922	2.077	0,10%	24.332	24.167	0,68%
Paraiso	17.927	17.918	0,05%	815	930	0,87%	41.336	41.155	0,44%
Vergueiro	2.883	2.976	3,23%	815	810	0,61%	43.402	43.321	0,19%
São Joaquim	2.638	2.645	0,27%	2.312	2.307	0,22%	43.728	43.659	0,16%
Liberdade	1.805	1.816	0,61%	876	864	1,37%	44.657	44.611	0,10%
Sé	6.598	6.600	0,03%	31.800	31.779	0,07%	19.455	19.432	0,12%
São Bento	4.194	4.191	0,07%	1.046	1.056	0,96%	22.603	22.567	0,16%
Luz	2.118	2.112	0,28%	724	726	0,28%	23.997	23.953	0,18%
Tiradentes	921	924	0,33%	870	858	1,38%	24.048	24.019	0,12%
Armênia	551	544	1,27%	4.629	4.634	0,11%	19.970	19.929	0,21%
Tiete	2.114	2.112	0,09%	3.156	3.149	0,22%	18.928	18.892	0,19%
Carandiru	105	106	0,95%	2.062	2.054	0,39%	16.971	16.944	0,16%
Santana	278	279	0,36%	7.191	7.192	0,01%	10.058	10.031	0,27%
Jardim São Paulo	65	64	1,54%	1.069	1.056	1,22%	9.054	9.039	0,17%
Parada Inglesa	17	32	88,24%	1.270	1.290	1,57%	7.801	7.781	0,26%
Tucuruvi	0	0	0%	7.801	7.781	0,26%	0	0	0%
	Média		4,43%	Média		1,29%	Média		0,21%

Tabela 4-25: Dados comparativos da Linha Azul – Tucuruvi / Jabaquara (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Tucuruvi</i>	1.512	1.519	0,46%	0	0	0%	1.512	1.519	0,46%
<i>Parada Inglesa</i>	567	600	5,82%	12	32	166,67%	2.068	2.087	0,92%
<i>Jardim São Paulo</i>	591	600	1,52%	23	30	30,43%	2.635	2.657	0,83%
<i>Santana</i>	3.822	3.813	0,24%	152	155	1,97%	6.305	6.315	0,16%
<i>Carandiru</i>	1.127	1.140	1,15%	52	60	15,38%	7.379	7.395	0,22%
<i>Tietê</i>	474	4.65	1,90%	320	310	3,13%	7.533	7.550	0,23%
<i>Armênia</i>	2.517	2.511	0,24%	607	604	0,49%	9.443	9.457	0,15%
<i>Tiradentes</i>	2.835	2.945	3,88%	101	93	7,92%	12.178	12.309	1,08%
<i>Luz</i>	3.302	3.410	3,27%	220	224	1,82%	15.259	15.495	1,55%
<i>São Bento</i>	9.706	9.696	0,10%	451	448	0,67%	24.515	24.743	0,93%
<i>Sé</i>	10.129	10.137	0,08%	14.175	14.632	3,22%	20.469	20.248	1,08%
<i>Liberdade</i>	1.167	1.131	3,08%	719	720	0,14%	20.917	20.659	1,23%
<i>São Joaquim</i>	1.030	1.020	0,97%	2.347	2.340	0,30	19.600	19.339	1,33%
<i>Vergueiro</i>	901	840	6,77%	1.113	1.050	5,66%	19.389	19.129	1,34%
<i>Paraíso</i>	2.659	2.640	0,71%	5.194	5.160	0,65%	16.853	16.609	1,45%
<i>Ana Rosa</i>	6.077	6.090	0,21%	1.270	1.260	0,79%	21.660	21.439	1,02%
<i>Vila Mariana</i>	488	496	1,64%	3.660	3.658	0,05%	18.488	18.277	1,14%
<i>Santa Cruz</i>	1.807	1.800	0,39%	3.254	3.240	0,43%	17.041	16.837	1,20%
<i>Praça da Árvore</i>	971	992	2,16%	1.577	1.643	4,19%	16.435	16.186	1,52%
<i>Saúde</i>	143	145	1,40%	3.024	2.929	3,14%	13.554	13.402	1,12%
<i>São Judas</i>	78	78	0%	2.035	1.972	3,10%	11.597	11.508	0,77%
<i>Conceição</i>	93	92	1,08%	2.756	2.668	3,19%	8.934	8.932	0,02%
<i>Jabaquara</i>	0	0	0%	8.934	8.932	0,02%	0	0	0%
	Média		1,61%	Média		11,02%	Média		0,12%

Os resultados apresentados no modelo HPSim são coerentes com os dados apresentados pelo sistema real. As discrepâncias médias percentuais limitam-se a um valor de 11%, aproximadamente. Contudo, destacam-se os valores mínimos (azul) e máximos (vermelho). Apesar dos valores máximos serem elevados em relação aos

valores médios, estes podem ser desconsiderados, tendo em vista o número reduzido de passageiros envolvidos em tais situações. Ressalta-se também que estes erros são compensados pelo próprio modelo, já que os valores máximo e mínimo do volume transportado estão próximos à média referente a tal variável. Os gráficos de demanda para os dados apresentados são (Figura 4.61 e Figura 4.62):

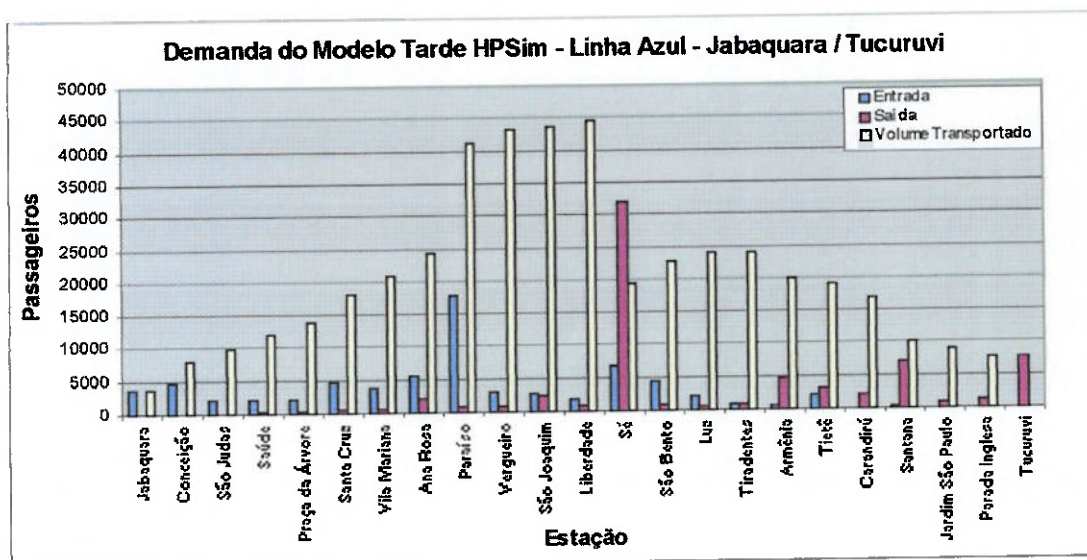


Figura 4.61 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Jabaquara/Tucuruvi (Tarde)

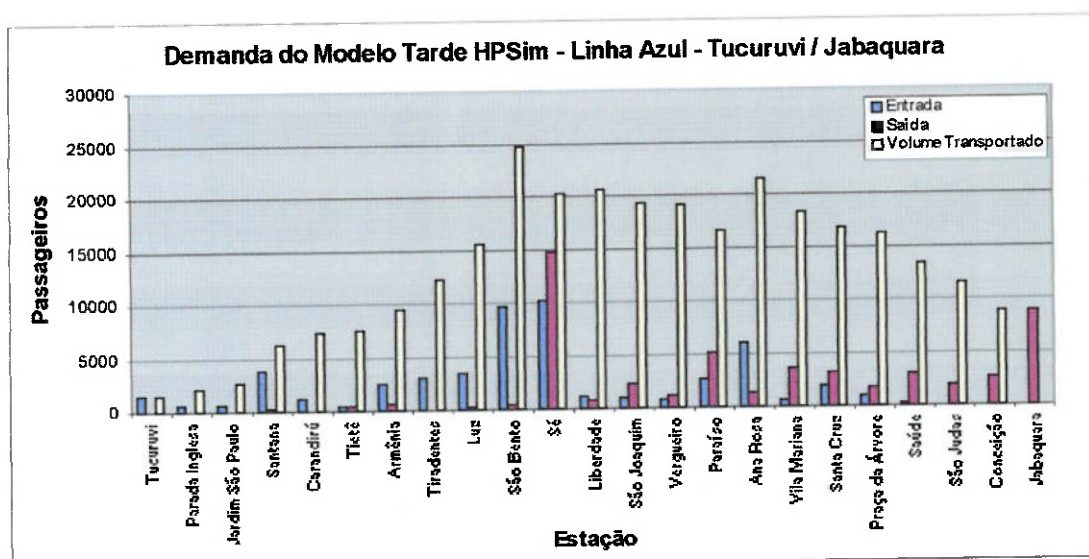


Figura 4.62 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Azul no sentido Tucuruvi/Jabaquara (Tarde)

Em ambos os gráficos (Figura 4.61 e Figura 4.62), os valores apresentados são compatíveis com os valores apresentados nas Figura 4.5 e Figura 4.6, que contêm os valores apresentados pelo sistema real.

O gráfico comparativo entre o total de demanda de passageiros e capacidade total das estações da Linha Azul, bem como o volume total de passageiros transportados, é apresentado na Figura 4.63 e na Tabela 4-26 abaixo:

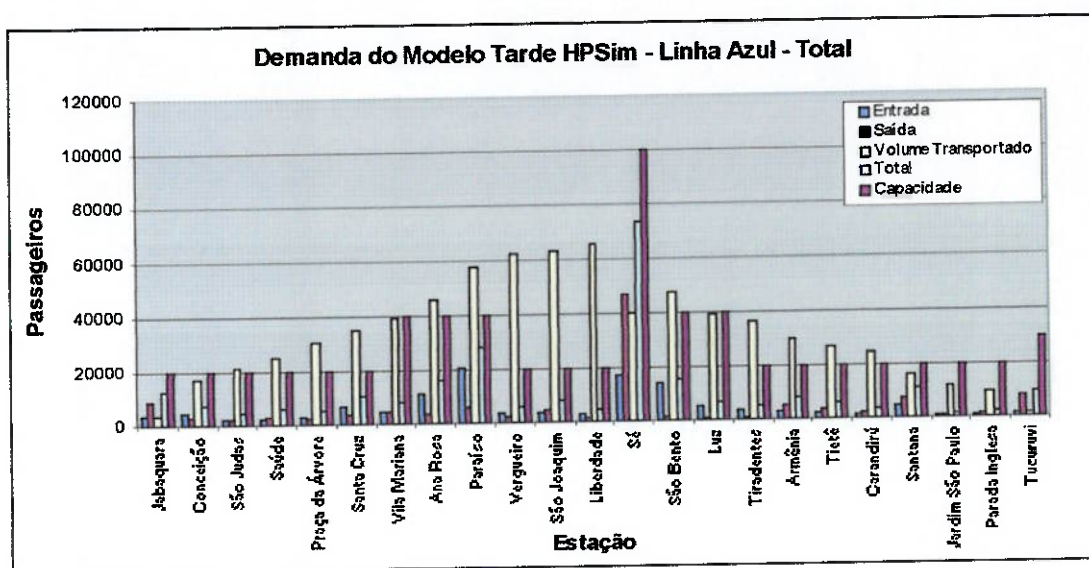


Figura 4.63 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Azul (Tarde)

Tabela 4-26: Dados comparativos totais da Linha Azul (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Jabaquara</i>	3.544	3.550	0,17%	8.934	8.932	0,02%	3.544	3.550	0,17%
<i>Conceição</i>	4.620	4.624	0,09%	2.802	2.709	3,32%	16.959	16.973	0,08%
<i>São Judas</i>	2.072	2.079	0,34%	2.141	2.075	3,08%	21.510	21.447	0,29%
<i>Saúde</i>	2.380	2.378	0,08%	3.302	3.198	3,15%	25.426	25.305	0,48%
<i>Praça da Árvore</i>	3.144	3.167	0,73%	1.791	1.853	3,46%	30.266	30.054	0,70%
<i>Santa Cruz</i>	6.560	6.543	0,26%	3.906	3.891	0,38%	34.973	34.797	0,50%
<i>Vila Mariana</i>	4.124	4.123	0,02%	4.366	4.371	0,11%	39.350	39.151	0,51%
<i>Ana Rosa</i>	11.621	11.460	1,39%	3.345	3.337	0,24%	45.992	45.606	0,84%
<i>Paraiso</i>	20.586	20.558	0,14%	6.116	6.090	0,43%	58.189	57.764	0,73%
<i>Vergueiro</i>	3.784	3.816	0,85%	1.928	1.860	3,53%	62.791	62.450	0,54%
<i>São Joaquim</i>	3.668	3.665	0,08%	4.659	4.647	0,26%	63.328	62.998	0,52%
<i>Liberdade</i>	2.972	2.947	0,84%	1.595	1.584	0,69%	65.574	65.270	0,46%
<i>Sé</i>	16.727	16.737	0,06%	45.975	46.411	0,95%	39.924	39.680	0,61%
<i>São Bento</i>	13.900	13.887	0,09%	1.497	1.504	0,47%	47.118	47.310	0,41%
<i>Luz</i>	5.420	5.522	1,88%	944	950	0,64%	39.256	39.448	0,49%
<i>Tiradentes</i>	3.756	3.869	3,01%	971	951	2,06%	36.226	36.328	0,28%
<i>Armênia</i>	3.068	3.055	0,42%	5.236	5.238	0,04%	29.413	29.386	0,09%
<i>Tietê</i>	2.588	2.577	0,43%	3.476	3.459	0,49%	26.461	26.442	0,07%
<i>Carandiru</i>	1.232	1.246	1,14%	2.114	2.114	0%	24.350	24.339	0,05%
<i>Santana</i>	4.100	4.092	0,20%	7.343	7.347	0,05%	16.363	16.346	0,10%
<i>Jardim São Paulo</i>	656	664	1,22%	1.092	1.086	0,55%	11.689	11.696	0,06%
<i>Parada Inglesa</i>	584	632	8,22%	1.282	1.322	3,12%	9.869	9.868	0,01%
<i>Tucuruvi</i>	1.512	1.519	0,46%	7.801	7.781	0,26%	1.512	1.519	0,46%
	Média		0,62%	Média		0,42%	Média		0,20%

Mais uma vez, os resultados decorrentes da simulação apresentam-se compatíveis com os valores apresentados pelo sistema real (Figura 4.7). As discrepâncias entre os valores obtidos na simulação e os valores reais são pequenas (0,20% para o volume total transportado, em média, apresentando valor máximo de 0,84%).

- Gráficos de demanda para Linha Verde:

A simulação do modelo em horário de pico da manhã apresenta as tabelas de dados de demanda de passageiros por hora (Tabela 4-27 e Tabela 4-28):

Tabela 4-27: Dados comparativos da Linha Vermelha – Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Ana Rosa</i>	2.009	2.016	0,35%	0	0	0%	2.009	2.016	0,35%
<i>Paraiso</i>	5.096	5.104	0,16%	0	0	0%	7.105	7.120	0,21%
<i>Brigadeiro</i>	909	908	0,11%	1.379	1.380	0,07%	6.636	6.648	0,18%
<i>Trianon-Masp</i>	621	616	0,81%	1.474	1.472	0,14%	5.782	5.792	0,17%
<i>Consolação</i>	627	624	0,48%	2.502	2.505	0,13%	3.907	3.911	0,10%
<i>Clínicas</i>	6	7	16,67%	1.387	1.392	0,36%	2.526	2.526	0%
<i>Sumaré</i>	11	9	18,18%	539	540	0,19%	1.998	1.995	0,15%
<i>Vila Madalena</i>	0	0	0%	1.998	1.995	0,15%	0	0	0%
	Média		4,59%	Média		0,13%	Média		0,15%

Tabela 4-28: Dados comparativos da Linha Verde – Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Vila Madalena</i>	2.855	2.850	0%	0	0	0%	2.855	2.850	0,18%
<i>Sumaré</i>	1.397	1.392	0%	9	8	11,11%	4.243	4.234	0,21%
<i>Clínicas</i>	3.246	3.248	0,08%	30	28	6,67%	7.459	7.454	0,07%
<i>Consolação</i>	8.577	8.576	0,19%	305	304	0,33%	15.731	15.726	0,03%
<i>Trianon-Masp</i>	7.175	7.168	0,12%	557	551	1,08%	22.349	22.343	0,03%
<i>Brigadeiro</i>	4.995	4.992	0,07%	856	850	0,71%	26.488	26.485	0,01%
<i>Paraíso</i>	0	0	0,50%	17.706	17.695	0,06%	8.782	8.790	0,09%
<i>Ana Rosa</i>	0	0	0,29%	8.782	8.790	0,09%	0	0	0%
	Média		0,16%	Média		2,50%	Média		0,08%

Os resultados apresentados no modelo HPSim são coerentes com os dados apresentados pelo sistema real. As discrepâncias médias percentuais limitam-se a um valor de 5%, aproximadamente. Contudo, destacam-se os valores mínimos (azul) e máximos (vermelho). Apesar dos valores máximos serem elevados em relação aos valores médios, estes podem ser desconsiderados, tendo em vista o número reduzido de passageiros envolvidos em tais situações. Ressalta-se também que estes erros são compensados pelo próprio modelo, já que os valores máximo e mínimo do volume transportado estão próximos à média referente a tal variável. Os gráficos de demanda para os dados apresentados são (Figura 4.64 e Figura 4.65):

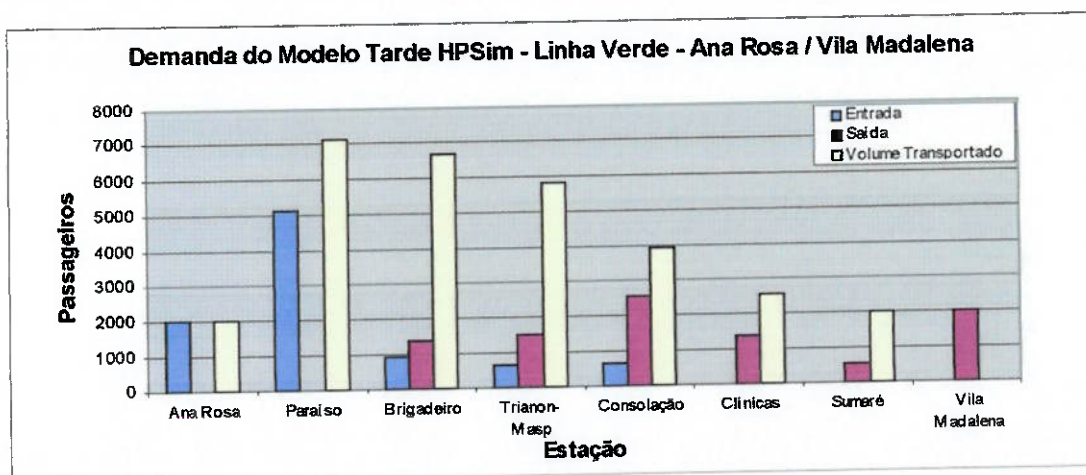


Figura 4.64 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Ana Rosa/Vila Madalena (Tarde)

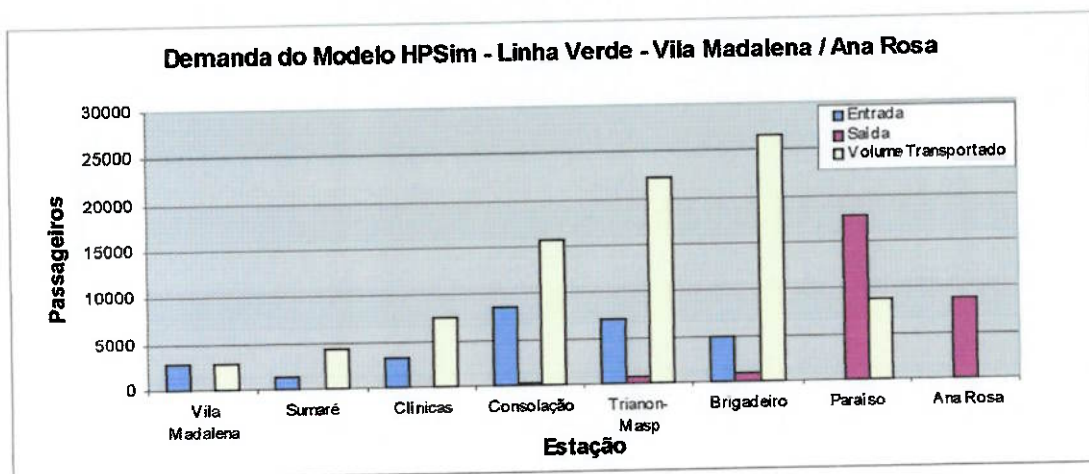


Figura 4.65 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Verde no sentido Vila Madalena/Ana Rosa (Tarde)

Em ambos os gráficos (Figura 4.64 e Figura 4.65), os valores apresentados também são compatíveis com os valores apresentados nas Figura 4.11 e Figura 4.12, que contêm os valores apresentados pelo sistema real.

O gráfico comparativo entre o total de demanda de passageiros e capacidade total das estações da Linha Verde, bem como o volume total de passageiros transportados, é apresentado na Figura 4.66 e na Tabela 4-29 abaixo:

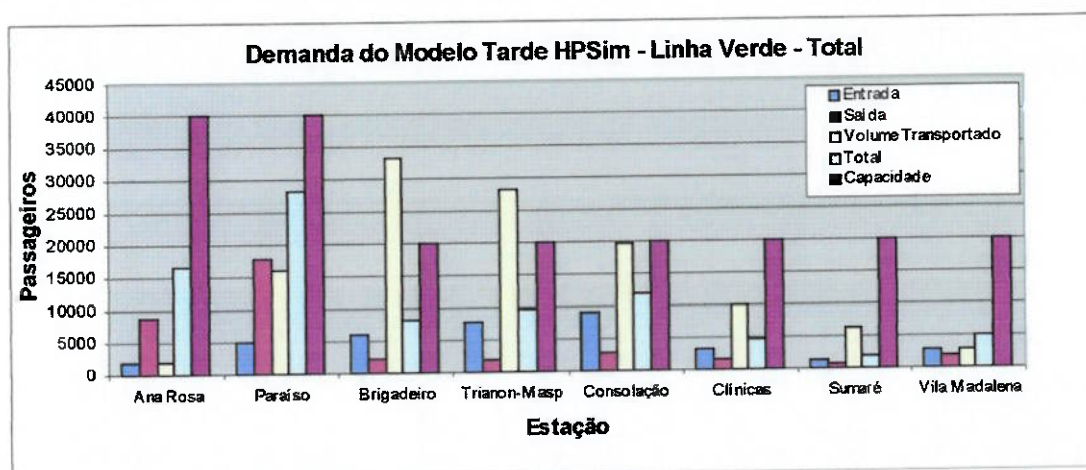


Figura 4.66 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Verde (Tarde)

Tabela 4-29: Dados comparativos totais da Linha Verde (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Ana Rosa	2.009	2.016	0,35%	8.782	8.790	0,09%	2.009	2.016	0,35%
Paraíso	5.096	5.104	0,16%	17.706	17.695	0,06%	15.887	15.910	0,14%
Brigadeiro	5.904	5.900	0,07%	2.235	2.230	0,22%	33.124	33.133	0,03%
Trianon-Masp	7.796	7.784	0,15%	2.031	2.023	0,39%	28.131	28.135	0,01%
Consolação	9.204	9.200	0,04%	2.807	2.809	0,07%	19.638	19.637	0,01%
Clínicas	3.252	3.255	0,09%	1.417	1.420	0,21%	9.985	9.980	0,05%
Sumaré	1.408	1.401	0,50%	548	548	0%	6.241	6.229	0,19%
Vila Madalena	2.855	2.850	0,18%	1.998	1.995	0,15%	2.855	2.850	0,18%
	Média		0,04%	Média		0,06%	Média		0,01%

Mais uma vez, os resultados decorrentes da simulação apresentam-se compatíveis com os valores apresentados pelo sistema real (Figura 4.13). As discrepâncias entre os valores obtidos na simulação e os valores reais são pequenas (0,01% para o volume total transportado, em média, apresentando valor máximo de 0,35%).

- Gráficos de demanda para Linha Vermelha:

A simulação do modelo em horário de pico da manhã apresenta as tabelas de dados de demanda de passageiros por hora (Tabela 4-30 e Tabela 4-31):

Tabela 4-30: Dados comparativos da Linha Vermelha – Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Corinthians-Itaquera	2.124	2.106	0,85%	0	0	0%	2.124	2.106	0,85%
Artur Alvin	2.295	2.301	0,26%	94	80	14,89%	4.325	4.327	0,05%
Patriarca	1.115	1.120	0,45%	127	114	10,24	5.313	5.333	0,38%
Guilhermina-Esperança	795	798	0,38%	158	152	3,80%	5.950	5.979	0,49%
Vila Matilde	1.152	1.140	1,04%	119	114	4,20%	6.983	7.005	0,32%
Penha	1.316	1.330	1,06%	418	418	0%	7.881	7.917	0,46%
Carrão	2.323	2.318	0,22%	687	684	0,44%	9.517	9.551	0,36%
Tatuapé	2.622	2.627	0,19%	928	925	0,32%	11.211	11.253	0,37%
Belém	2.516	2.584	2,70%	664	659	0,75%	13.063	13.178	0,88%
Bresser	2.464	2.479	0,61%	1.258	1.256	0,16%	14.269	14.401	0,93%
Brás	2.811	2.812	0,04%	3.381	3.358	0,68%	13.699	13.855	1,14%
Pedro II	1.174	1.178	0,34%	215	208	3,26%	14.658	14.825	1,14%
Sé	15.101	15.086	0,10%	7.421	7.644	3,00%	22.337	22.267	0,31%
Anhangabaú	2.174	2.184	0,46%	1.594	1.591	0,19%	22.918	22.860	0,25%
República	1.691	1.699	0,47%	1.930	1.911	0,98%	22.679	22.648	0,14%
Santa Cecília	685	684	0,15%	892	874	2,02%	22.472	22.458	0,06%
Marechal Deodoro	736	740	0,54%	2.529	2.526	0,12%	20.680	20.672	0,04%
Barra Funda	0	0	0%	20.680	20.672	0,04%	0	0	0%
	Média		0,55%	Média		2,50%	Média		0,45%

Tabela 4-31: Dados comparativos da Linha Vermelha – Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
<i>Barra Funda</i>	10.258	10.249	0,09%	0	0	0%	10.258	10.249	0,09%
<i>Marechal Deodoro</i>	3.201	3.192	0,28%	358	342	4,47%	13.102	13.099	0,02%
<i>Santa Cecília</i>	2.320	2.318	0,09%	106	114	7,55%	15.315	15.303	0,08%
<i>República</i>	7.201	7.220	0,26%	255	266	4,31%	22.261	22.257	0,02%
<i>Anhangabaú</i>	8.238	8.246	0,10%	291	312	7,22%	30.208	30.191	0,06%
<i>Sé</i>	37.424	37.440	0,04%	6.015	6.006	0,15%	61.616	61.625	0,01%
<i>Pedro II</i>	1.158	1.170	1,04%	393	396	0,76%	62.381	62.399	0,03%
<i>Brás</i>	2.702	2.711	0,33%	13.445	13.455	0,07%	51.637	51.655	0,03%
<i>Bresser</i>	1.864	1.862	0,11%	4.188	4.187	0,02%	49.314	49.330	0,03%
<i>Belém</i>	1.624	1.638	0,86%	4.146	4.148	0,05%	46.791	46.820	0,06%
<i>Tatuapé</i>	2.238	2.223	0,67%	5.708	5.694	0,25%	43.322	43.349	0,06%
<i>Carrão</i>	1.149	1.131	1,57%	5.814	5.811	0,05%	38.656	38.669	0,03%
<i>Penha</i>	416	429	3,13%	5.228	5.236	0,15%	33.844	33.862	0,05%
<i>Vila Matilde</i>	256	234	8,59%	3.877	3.861	0,41%	30.223	30.235	0,04%
<i>Guilhermina-Esperança</i>	129	117	9,30%	3.491	3.510	0,54%	26.860	26.842	0,07%
<i>Patriarca</i>	177	185	4,52%	3.947	3.939	0,20%	23.090	23.088	0,01%
<i>Artur Alvin</i>	93	78	16,13%	14.600	14.586	0,10%	8.583	8.580	0,03%
<i>Corinthians-Itaquera</i>	0	0	0%	8.583	8.580	0,03%	0	0	0%
	Média		2,6%	Média		1,46%	Média		0,04%

Os resultados apresentados no modelo HPSim são coerentes com os dados apresentados pelo sistema real. As discrepâncias médias percentuais limitam-se a um valor de 3%, aproximadamente. Contudo, destacam-se os valores mínimos (azul) e máximos (vermelho). Apesar dos valores máximos serem elevados em relação aos valores médios, estes podem ser desconsiderados, tendo em vista o número reduzido de passageiros envolvidos em tais situações. Ressalta-se também que estes erros são compensados pelo próprio modelo, já que os valores máximo e mínimo do volume

transportado estão próximos à média referente a tal variável. Os gráficos de demanda para os dados apresentados são (Figura 4.67 e Figura 4.68):

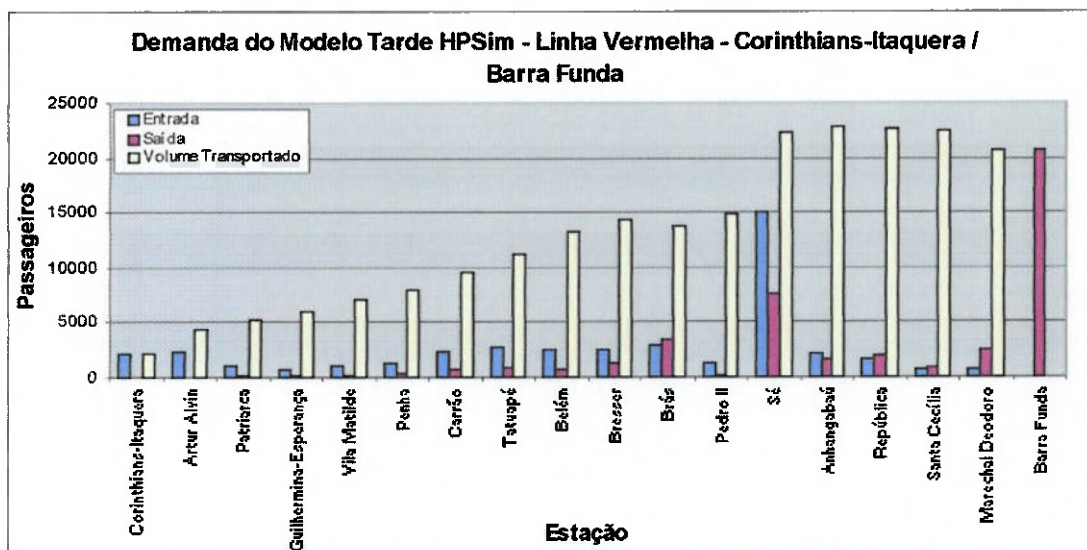


Figura 4.67 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Corinthians-Itaquera/Barra Funda (Tarde)

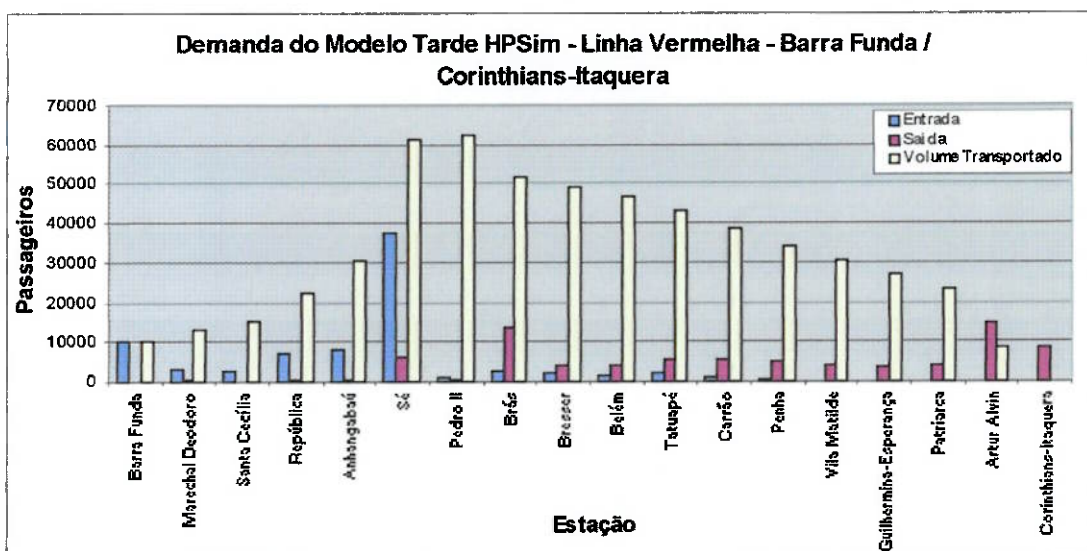


Figura 4.68 – Gráfico de demanda do modelo HPSim para Linha Vermelha no sentido Barra Funda/Corinthians-Itaquera (Tarde)

Em ambos os gráficos (Figura 4.67 e Figura 4.68), os valores apresentados são compatíveis com os valores apresentados nas Figura 4.17 e Figura 4.18, que contêm os valores apresentados pelo sistema real, assim como nos casos anteriores.

O gráfico comparativo entre o total de demanda de passageiros e capacidade total das estações da Linha Vermelha, bem como o volume total de passageiros transportados, é apresentado na Figura 4.69 e na Tabela 4-32 abaixo:

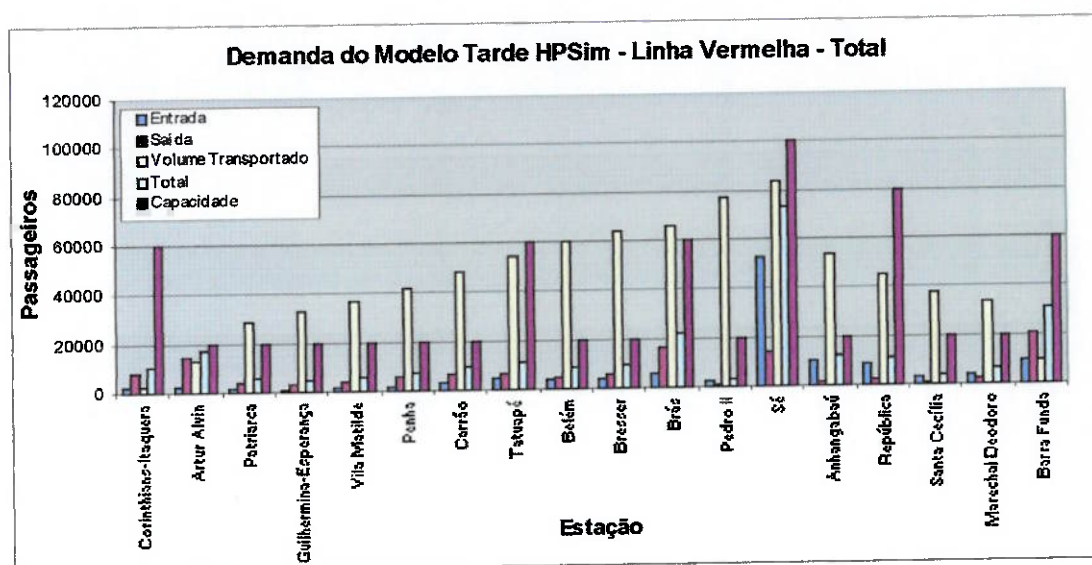


Figura 4.69 – Gráfico de demanda total do modelo HPSim para Linha Vermelha (Tarde)

Tabela 4-32: Dados comparativos totais da Linha Vermelha (Tarde)

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Corinthians-Itaquera	2.124	2.106	0,85%	8.583	8.580	0,03%	2.124	2.106	0,85%
Artur Alvin	2.388	2.379	0,38%	14.694	14.666	0,19%	12.908	12.907	0,01%
Patriarca	1.292	1.305	1,01%	4.074	4.053	0,52%	28.403	28.421	0,06%
Guilhermina-Esperança	924	915	0,97%	3.649	3.662	0,36%	32.810	32.821	0,03%
Vila Matilde	1.408	1.374	2,41%	3.996	3.975	0,53%	37.206	37.240	0,09%
Penha	1.732	1.759	1,56%	5.646	5.654	0,14%	41.725	41.779	0,13%
Carrão	3.472	3.449	0,66%	6.501	6.495	0,09%	48.173	48.220	0,10%
Tatuapé	4.860	4.850	0,21%	6.636	6.619	0,26%	54.533	54.602	0,13%
Belém	4.140	4.222	1,98%	4.810	4.807	0,06%	59.854	59.998	0,24%
Bresser	4.328	4.341	0,30%	5.446	5.443	0,06%	63.583	63.731	0,23%
Brás	5.513	5.523	0,18%	16.826	16.813	0,08%	65.336	65.510	0,27%
Pedro II	2.332	2.348	0,69%	608	604	0,66%	77.039	77.224	0,24%
Sé	52.525	52.526	0%	13.436	13.650	1,59%	83.953	83.892	0,07%
Anhangabaú	10.412	10.430	0,17%	1.885	1.903	0,95%	53.126	53.051	0,14%
República	8.892	8.919	0,30%	2.185	2.177	0,37%	44.940	44.905	0,08%
Santa Cecília	3.005	3.002	0,10%	998	988	1,00%	37.787	37.761	0,07%
Marechal Deodoro	3.937	3.932	0,13%	2.887	2.868	0,66%	33.782	33.771	0,03%
Barra Funda	10.258	10.249	0,09%	20.680	20.672	0,04%	10.258	10.249	0,09%
	Média		0,02%	Média		0,08%	Média		0,01%

Mais uma vez, os resultados decorrentes da simulação apresentam-se compatíveis com os valores apresentados pelo sistema real (Figura 4.19). As discrepâncias entre os valores obtidos na simulação e os valores reais são pequenas (0,01% para o volume total transportado, em média, apresentando valor máximo de 0,85%). Portanto, todos os resultados permitem constatar a compatibilidade do modelo desenvolvido em HPSim para o horário de pico da tarde. Desde modo, o modelo está validado.

4.4.2. Verificação e Validação dos Modelos em ProModel

A validação do modelo desenvolvido anteriormente segue as seguintes premissas, para a operação normal dos trens, conforme os dados obtidos anteriormente:

- Capacidade Máxima do Trem: 1800 passageiros;
- Tempo entre duas estações consecutivas:
 - Linha Azul: 108 segundos;
 - Linha Verde: 158 segundos;
 - Linha Vermelha: 101 segundos;
- Tempo de parada dos trens nas estações: 20 segundos;
- No início do procedimento, tem-se um trem em cada estação;
 - Este foi o número de trens utilizado para se garantir, de maneira mais simples, que o tempo de chegada de trens em uma estação seja igual ao tempo determinado previamente;
 - Este número de trens é aproximadamente igual ao número de trens utilizados nos horários de pico, informado pela Companhia do Metropolitano;

A saída e chegada de passageiros/segundo foi calculada de acordo com os dados fornecidos pela Companhia do Metropolitano;

- Período da Manhã:
 - O modelo foi simulado por um período de 84 minutos;
 - O número de trens que passou por uma estação, durante a simulação, foi, em média:
 - Linha Azul → 28 trens/hora
 - Linha Verde → 20 trens/hora
 - Linha Vermelha → 29 trens/hora

- Simulando-se o modelo em ProModel com os dados anteriores, obtém-se os resultados da Figura 4.70, Figura 4.71 e Figura 4.72, para as Linhas Azul, Vermelha e Verde respectivamente. Estes gráficos apresentam os seguintes dados:
 - Entrada total de passageiros nas estações, durante o período de simulação;
 - Saída total de passageiros de cada estação;
 - Volume de passageiros transportados nas estações, isto é, este número indica o total de passageiros que passaram por determinada estação, seja dentro do trem, seja fora do trem;
 - Total de passageiros que entrou ou saiu de cada estação, isto é, este número indica o total de passageiros que circulou pelas dependências das estações, excluindo os passageiros que passaram pela estação dentro dos trens;
 - A capacidade máxima de passageiros/hora de cada estação;

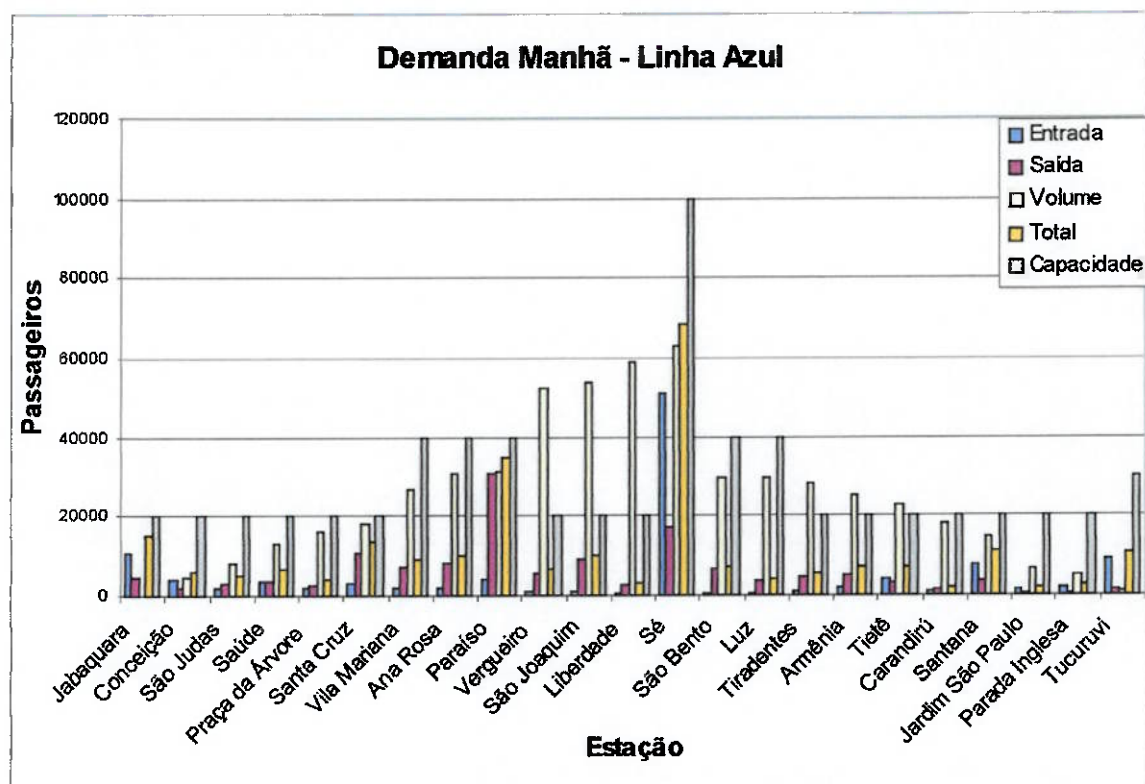


Figura 4.70 – Demanda Manhã - Linha Azul

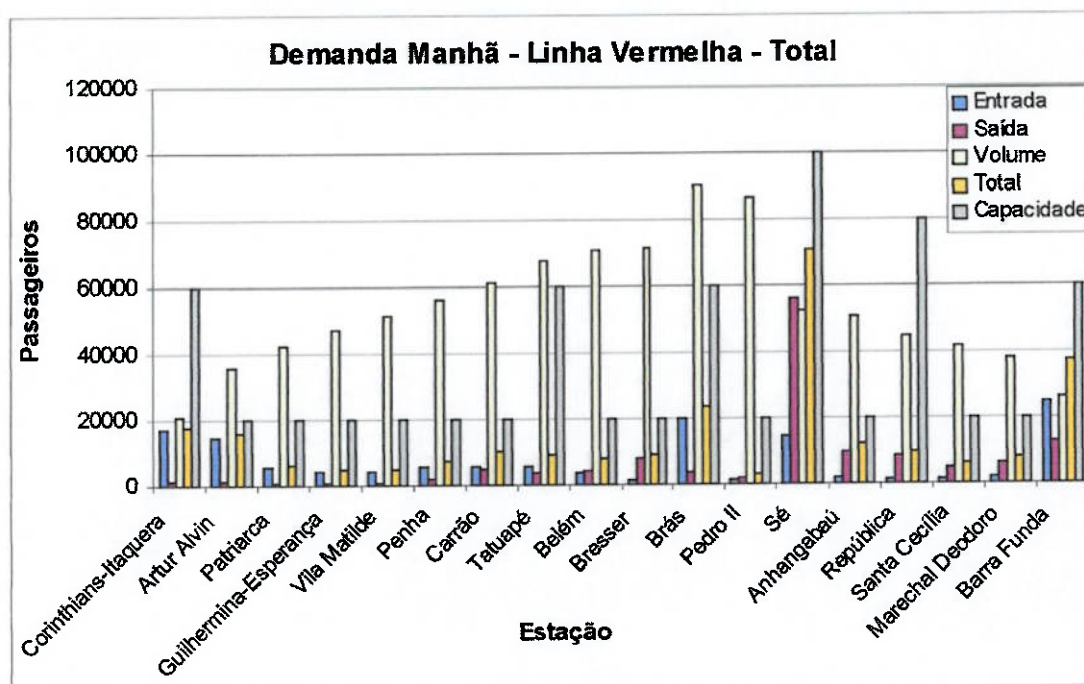


Figura 4.71 – Demanda Manhã - Linha Vermelha

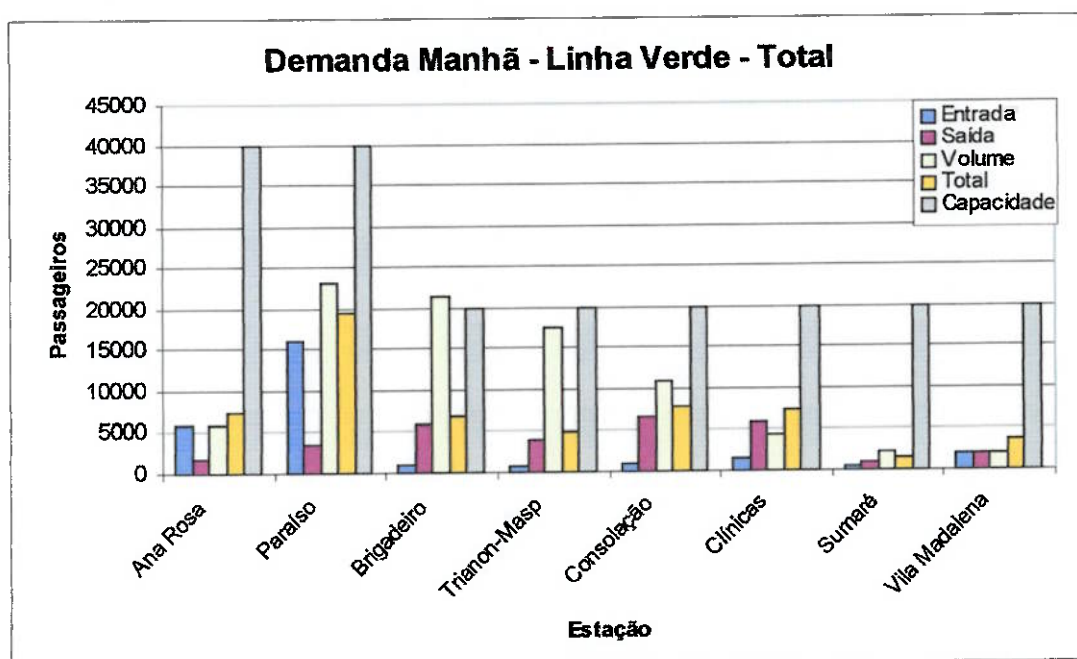


Figura 4.72 – Demanda Manhã - Linha Verde

Comparando-se estes gráficos obtidos a partir da simulação, com os gráficos de demanda teóricos, dos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, pode-se observar que os resultados apresentados estão compatíveis com os esperados.

A Tabela 4-33, Tabela 4-34 e a Tabela 4-35 ilustra os erros médios obtidos, para a Linha Azul, Linha Vermelha e Linha Verde respectivamente, comparando-se os resultados da simulação com os resultados esperados, para o total de entrada de passageiros nas estações, o total de passageiros que saem das estações, o volume de passageiros transportados e o total de passageiros que entrou ou saiu de cada estação.

Tabela 4-33: Validação do Modelo – Manhã – Linha Azul

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Jabaquara	10.512	10.512	0%	3.837	3.837	0%	10.512	9.862	6%
Conceição	3.996	3.996	0%	1.645	1.702	-3%	18.272	17.618	4%
São Judas	2.156	2.156	0%	2.259	2.343	-4%	21.712	21.095	3%
Saúde	3.308	3.308	0%	2.685	2.801	-4%	26.251	25.651	2%
Praça da Árvore	1.784	1.784	0%	1.958	2.045	-4%	29.029	28.454	2%
Santa Cruz	2.864	2.864	0%	8.703	8.936	-3%	31.118	30.588	2%
Vila Mariana	1.836	1.836	0%	5.851	5.851	0%	38.435	38.138	1%
Ana Rosa	2.001	1.997	0%	6.743	6.763	0%	41.851	41.566	1%
Paraíso	3.949	3.978	-1%	25.410	25.590	-1%	42.447	42.093	1%
Vergueiro	884	884	0%	4.783	4.669	2%	60.144	59.777	1%
São Joaquim	1.184	1.184	0%	7.383	7.463	-1%	61.709	61.148	1%
Liberdade	592	592	0%	1.943	1.966	-1%	65.819	65.279	1%
Sé	50.197	51.024	-2%	15.843	14.464	9%	70.849	70.856	0%
São Bento	664	664	0%	5.537	5.470	1%	36.825	37.117	-1%
Luz	604	604	0%	2.831	2.763	2%	36.416	36.867	-1%
Tiradentes	960	960	0%	3.987	3.890	2%	34.711	35.347	-2%
Armênia	1.828	1.828	0%	4.365	4.261	2%	32.171	32.963	-2%
Tietê	3.956	3.956	0%	2.474	2.415	2%	29.570	30.430	-3%
Carandirú	808	808	0%	1.051	1.051	0%	25.236	26.106	-3%
Santana	7.644	7.644	0%	2.840	2.858	-1%	22.022	22.891	-4%
Jardim São Paulo	1.400	1.400	0%	490	476	3%	14.230	15.132	-6%
Parada Inglesa	2.116	2.116	0%	394	386	2%	12.537	13.452	-7%
Tucuruvi	9.124	9.124	0%	1.354	1.354	0%	9.124	10.041	-10%
	Média		0%	Média		0%	Média		-1%

Tabela 4-34: Validação do Modelo – Manhã – Linha Vermelha

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Corinthians-Itaquera	16.804	16.804	0%	1.009	982	3%	16.804	20.459	-22%
Artur Alvin	14.384	14.384	0%	1.553	1.511	3%	32.132	35.764	-11%
Patriarca	5.604	5.604	0%	765	729	5%	39.051	42.647	-9%
Guilhermina-Esperança	4.044	4.044	0%	688	656	5%	43.470	47.036	-8%
Vila Matilde	3.996	3.996	0%	873	831	5%	47.782	51.322	-7%
Penha	5.320	5.320	0%	1.939	1.854	4%	53.046	56.562	-7%
Carrão	5.688	5.688	0%	4.749	4.547	4%	58.000	61.491	-6%
Tatuapé	5.300	5.300	0%	3.714	3.606	3%	64.264	67.595	-5%
Belém	3.736	3.736	0%	4.289	4.166	3%	67.604	70.827	-5%
Bresser	1.220	1.220	0%	8.189	8.036	2%	68.278	71.378	-5%
Brás	20.257	20.257	0%	3.601	3.488	3%	87.165	90.112	-3%
Pedro II	1.300	1.300	0%	1.687	1.621	4%	83.995	86.851	-3%
Sé	14.413	14.324	1%	56.766	56.543	0%	50.388	52.661	-5%
Anhangabaú	1.916	1.916	0%	10.467	9.978	5%	50.614	50.788	0%
República	996	996	0%	8.984	8.564	5%	44.106	44.605	-1%
Santa Cecília	1.204	1.204	0%	5.010	4.878	3%	41.231	41.789	-1%
Marechal Deodoro	1.940	1.940	0%	6.065	5.906	3%	37.565	38.195	-2%
Barra Funda	25.104	25.104	0%	12.878	12.539	3%	25.104	26.015	-4%
	Média		0%	Média		3%	Média		-6%

Tabela 4-35: Validação do Modelo – Manhã – Linha Verde

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Ana Rosa	5.796	5.783	0%	1.538	1.595	-4%	5.796	5.757	1%
Paraíso	16.659	16.102	3%	3.240	3.346	-3%	23.993	23.127	4%
Brigadeiro	940	940	0%	5.500	5.844	-6%	22.344	21.367	4%
Trianon-Masp	756	756	0%	4.013	4.013	0%	18.441	17.463	5%
Consolação	1.052	1.052	0%	6.264	6.660	-6%	12.268	10.895	11%
Clínicas	1.352	1.352	0%	5.550	5.912	-7%	6.209	4.474	28%
Sumaré	444	444	0%	1.025	1.092	-7%	3.990	2.188	45%
Vila Madalena	1.851	1.851	0%	1.720	1.835	-7%	1.851	1.851	0%
	Média		0%	Média		-5%	Média		12%

A partir da simulação anterior, pode-se verificar a quantidade total de passageiros em algumas estações. A Figura 4.73, Figura 4.74 e Figura 4.75 ilustra os resultados para a Linha Azul, Linha Vermelha e Linha Verde, respectivamente.

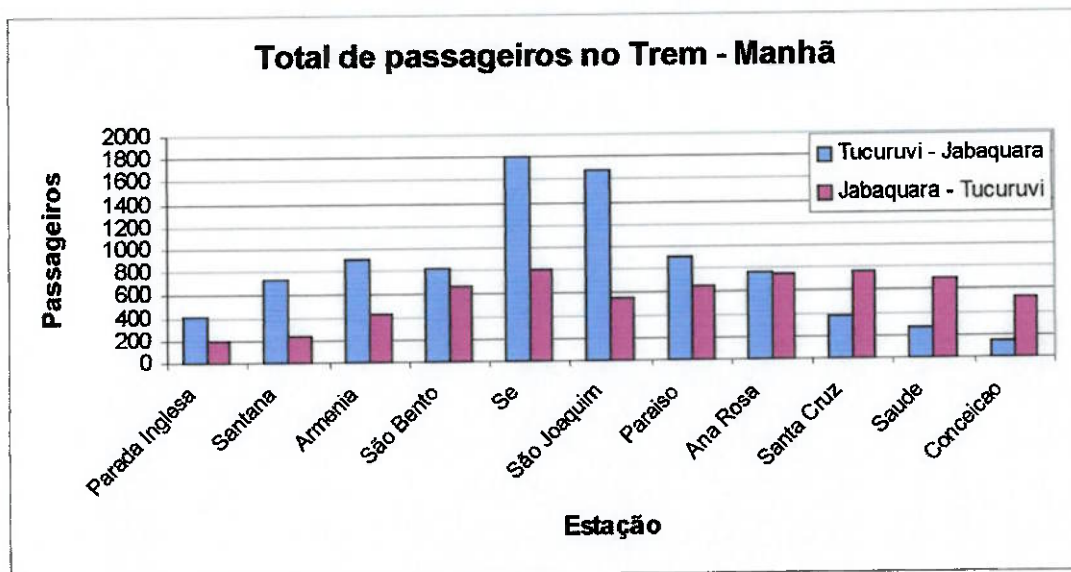


Figura 4.73 – Total passageiros no Metrô – Manhã – Linha Azul

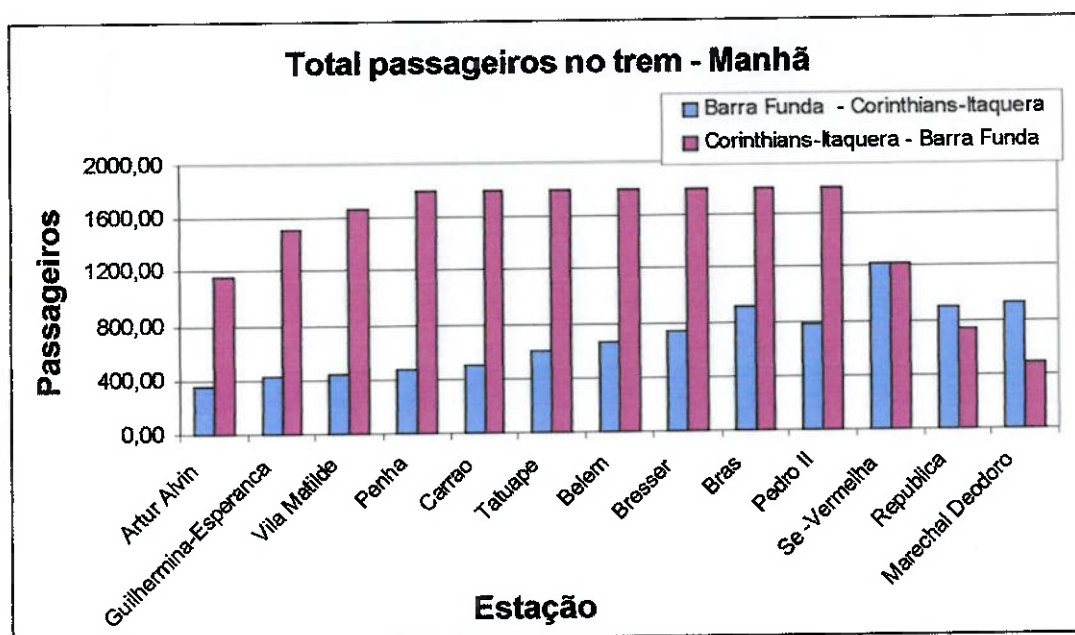


Figura 4.74 – Total passageiros no Metrô – Manhã – Linha Vermelha

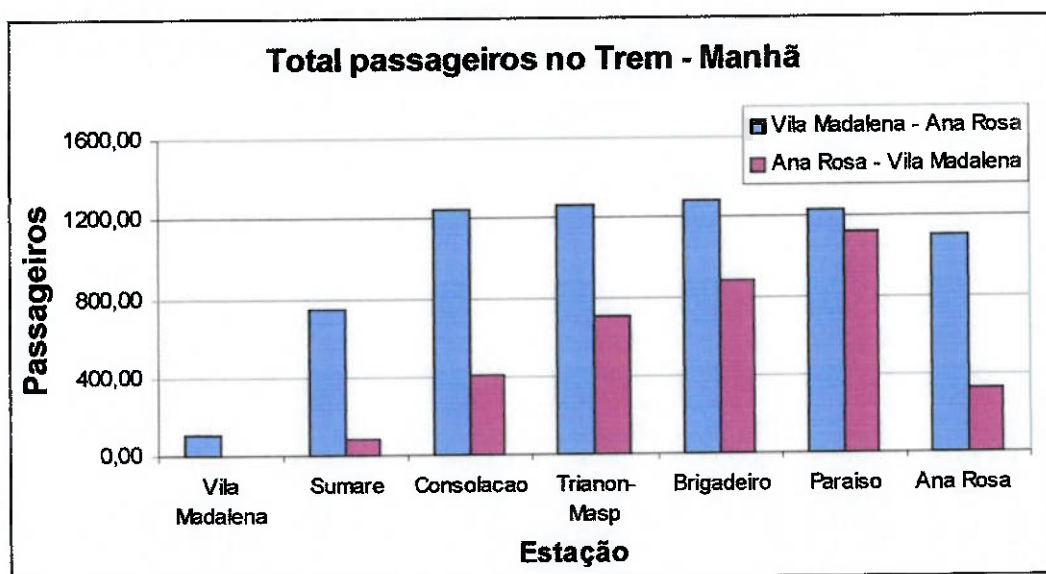


Figura 4.75 – Total passageiros no Metrô – Manhã – Linha Verde

No procedimento adotado, a quantidade de passageiros nos trens é medida depois que o trem deixa a estação, isto é, quando o trem chega em uma estação, primeiro alguns passageiros descem, depois outros entram no trem. Neste instante é que se mede a quantidade de passageiros no trem, na estação. Assim, a partir dos gráficos acima, pode-se concluir que:

- Linha Azul:
 - Nos dois sentidos, a quantidade de passageiros nos trens em circulação fica abaixo de sua capacidade. Isto não ocorre apenas em algumas estações, como as estações Sé e São Joaquim, onde os trens apresentam uma quantidade de passageiros próxima à sua capacidade total;
- Linha Verde:
 - Nos dois sentidos, a quantidade de passageiros nos trens fica abaixo de sua capacidade, sendo que a circulação de passageiros é maior no sentido Vila Madalena – Ana Rosa;
- Linha Vermelha:

- No sentido Barra Funda – Corinthians-Itaquera, a quantidade de passageiros nos trens em circulação fica abaixo da capacidade dos trens;
 - No sentido Corinthians-Itaquera – Barra Funda, os trens circulam com sua capacidade total na maioria das estações.
-
- Período da Tarde:
 - O modelo foi simulado por um período de 71 minutos;
 - O número de trens que passou por uma estação, durante a simulação, foi, em média:
 - Linha Azul → 28 trens/hora
 - Linha Verde → 20 trens/hora
 - Linha Vermelha → 29 trens/hora
 - Simulando-se o modelo em ProModel com os dados anteriores, obtém-se os resultados da Figura 4.76, Figura 4.77 e Figura 4.78 para a Linha Azul, Vermelha e Verde respectivamente. Estes gráficos apresentam a entrada e saída de passageiros de cada estação, durante o período de simulação, bem como o volume de passageiros transportados nas estações, o total de passageiros que entrou ou saiu, e a capacidade máxima de cada estação;

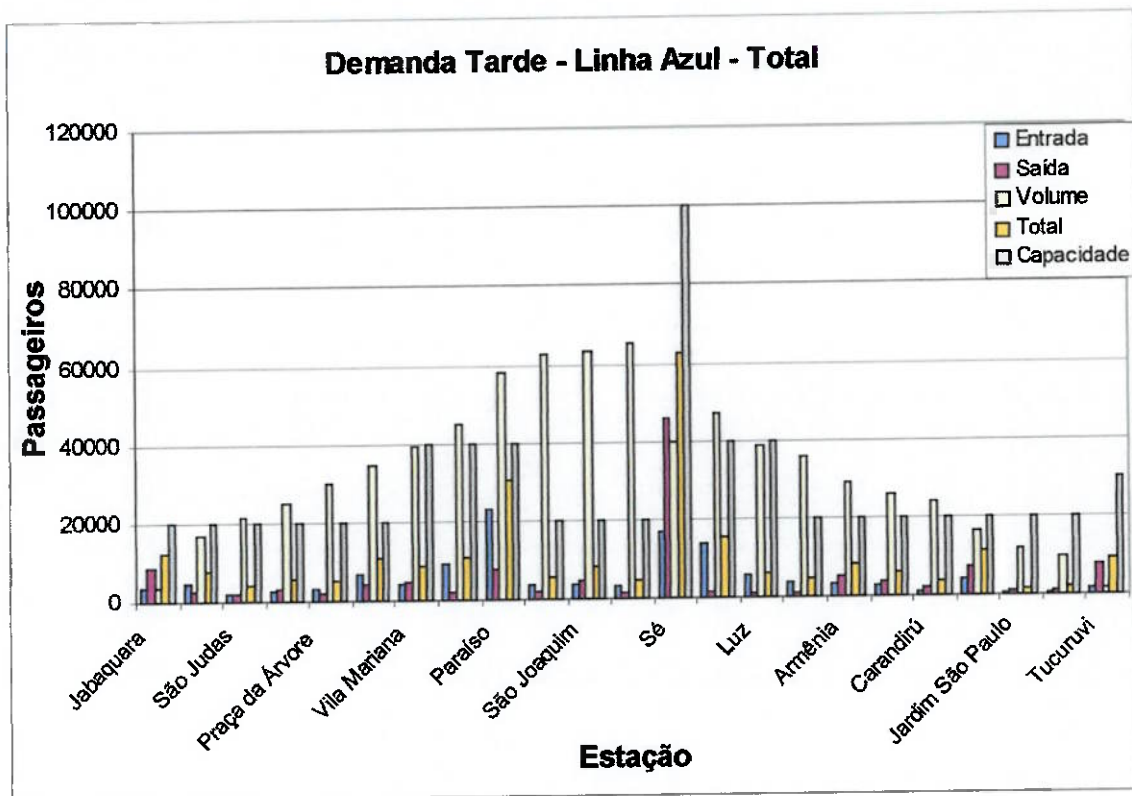


Figura 4.76 – Demanda Tarde - Linha Azul

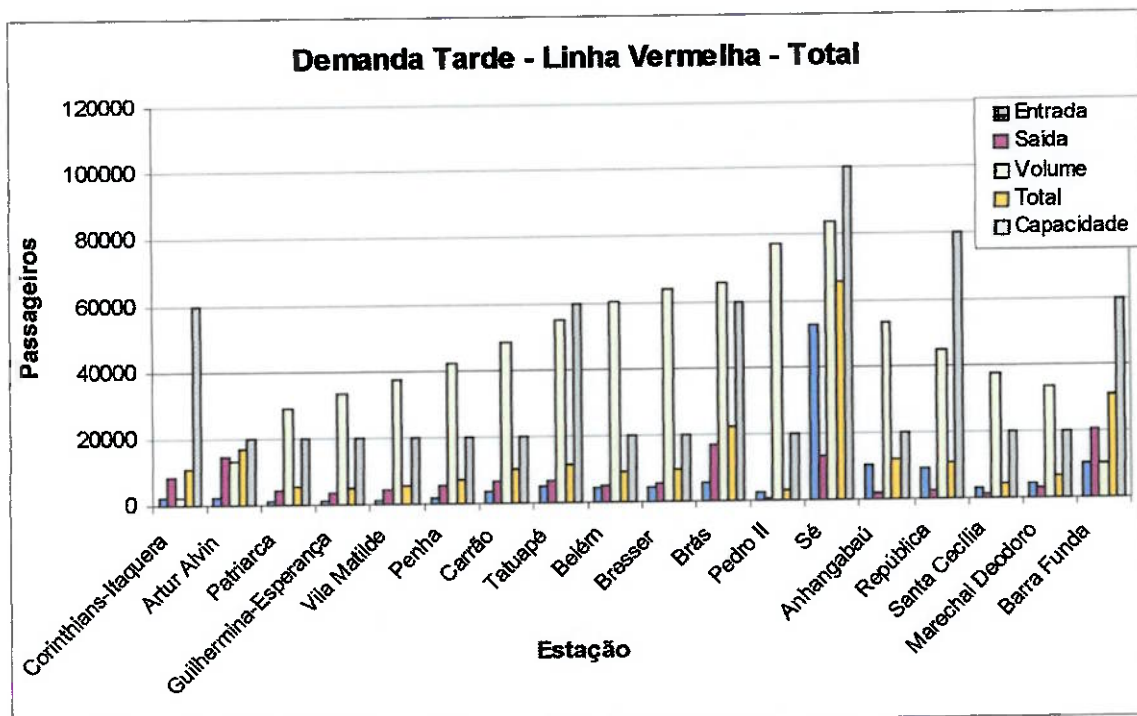


Figura 4.77 – Demanda Tarde - Linha Vermelha

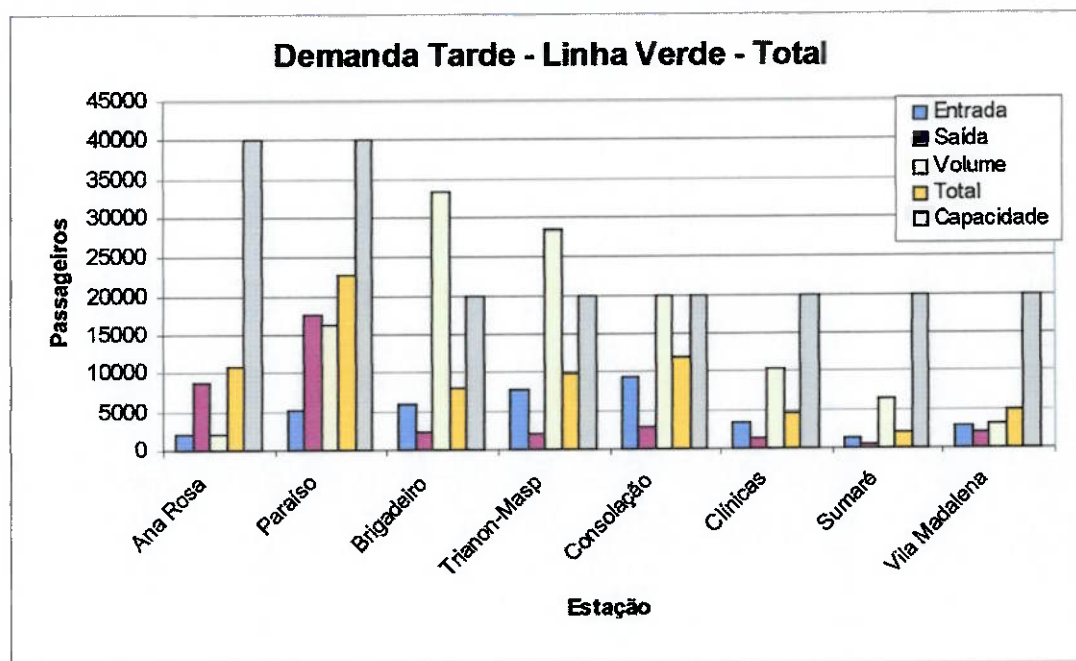


Figura 4.78 – Demanda Tarde - Linha Verde

Comparando-se estes gráficos obtidos a partir da simulação, com os gráficos de demanda teóricos, dos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3, pode-se observar que os resultados apresentados estão compatíveis com os esperados.

A Tabela 4-36, Tabela 4-37 e Tabela 4-38 ilustra os erros médios obtidos, para a Linha Azul, Linha Vermelha e Linha Verde respectivamente, comparando-se os resultados da simulação com os resultados esperados, para o total de entrada de passageiros nas estações, o total de passageiros que saem das estações, o volume de passageiros transportados e o total de passageiros que entrou ou saiu de cada estação.

Tabela 4-36: Validação do Modelo – Tarde – Linha Azul

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Jabaquara	3.544	3.544	0%	8.934	8.932	0%	3.544	3.544	0%
Conceição	4.620	4.620	0%	2.802	2.800	0%	16.959	16.833	1%
São Judas	2.072	2.072	0%	2.141	2.128	1%	21.510	21.371	1%
Saúde	2.380	2.380	0%	3.302	3.304	0%	25.426	25.254	1%
Praça da Árvore	3.144	3.144	0%	1.791	1.792	0%	30.266	30.076	1%
Santa Cruz	6.560	6.560	0%	3.906	3.920	0%	34.973	34.808	0%
Vila Mariana	4.124	4.124	0%	4.366	4.368	0%	39.350	39.231	0%
Ana Rosa	9.071	9.071	0%	1.890	1.904	-1%	44.896	44.763	0%
Paraíso	23.135	23.135	0%	7.572	7.560	0%	58.187	58.004	0%
Vergueiro	3.784	3.784	0%	1.928	1.932	0%	62.791	62.820	0%
São Joaquim	3.668	3.668	0%	4.659	4.648	0%	63.328	63.334	0%
Liberdade	2.972	2.972	0%	1.595	1.596	0%	65.574	65.587	0%
Sé	16.727	16.727	0%	45.975	45.920	0%	39.924	39.770	0%
São Bento	13.900	13.900	0%	1.497	1.512	-1%	47.118	46.783	1%
Luz	5.420	5.420	0%	944	952	-1%	39.256	38.949	1%
Tiradentes	3.756	3.756	0%	971	980	-1%	36.226	35.934	1%
Armênia	3.068	3.068	0%	5.236	5.236	0%	29.413	29.150	1%
Tietê	2.588	2.588	0%	3.476	3.472	0%	26.461	26.251	1%
Carandirú	1.232	1.232	0%	2.114	2.100	1%	24.350	24.171	1%
Santana	4.100	4.100	0%	7.343	7.336	0%	16.363	16.175	1%
Jardim São Paulo	656	656	0%	1.092	1.092	0%	11.689	11.495	2%
Parada Inglesa	584	584	0%	1.282	1.260	2%	9.869	9.696	2%
Tucuruvi	1.512	1.512	0%	7.801	7.784	0%	1.512	1.356	10%
	Média		0%	Média		0%	Média		1%

Tabela 4-37: Validação do Modelo – Tarde – Linha Vermelha

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Corinthians-Itaquera	2.124	2.124	0%	8.583	8.584	0%	2.124	2.452	-15%
Artur Alvin	2.388	2.388	0%	14.693	14.674	0%	12.909	13.228	-2%
Patriarca	1.292	1.292	0%	4.075	4.060	0%	28.403	28.691	-1%
Guilhermina-Esperança	924	924	0%	3.650	3.625	1%	32.810	33.081	-1%
Vila Matilde	1.408	1.408	0%	3.996	3.973	1%	37.206	37.452	-1%
Penha	1.732	1.732	0%	5.647	5.626	0%	41.725	41.950	-1%
Carrão	3.472	3.472	0%	6.501	6.496	0%	48.174	48.391	0%
Tatuapé	4.860	4.860	0%	6.635	6.612	0%	54.533	54.759	0%
Belém	4.140	4.140	0%	4.810	4.814	0%	59.854	60.054	0%
Bresser	4.328	4.328	0%	5.446	5.452	0%	63.583	63.785	0%
Brás	5.513	5.513	0%	16.827	16.820	0%	65.336	65.566	0%
Pedro II	2.332	2.332	0%	608	609	0%	77.039	77.281	0%
Sé	52.524	52.524	0%	13.437	13.456	0%	83.954	83.662	0%
Anhangabaú	10.412	10.412	0%	1.885	1.856	2%	53.126	52.782	1%
República	8.892	8.892	0%	2.185	2.175	0%	44.940	44.533	1%
Santa Cecília	3.005	3.005	0%	999	986	1%	37.787	37.335	1%
Marechal Deodoro	3.938	3.938	0%	2.886	2.842	2%	33.782	33.273	2%
Barra Funda	10.258	10.258	0%	20.680	20.648	0%	10.258	10.258	0%
Média			0%	Média			Média		
							-1%		

Tabela 4-38: Validação do Modelo – Tarde – Linha Verde

	Entrada			Saída			Volume Transportado		
	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença	Real	Modelo	Diferença
Ana Rosa	2.009	2.009	0%	8.782	8.780	0%	2.009	2.043	-2%
Paraíso	5.096	5.096	0%	17.706	17.700	0%	15.887	16.168	-2%
Brigadeiro	5.904	5.904	0%	2.235	2.240	0%	33.124	33.371	-1%
Triunfo-Masp	7.796	7.796	0%	2.032	2.020	1%	28.131	28.373	-1%
Consolação	9.204	9.204	0%	2.807	2.800	0%	19.638	19.878	-1%
Clínicas	3.252	3.252	0%	1.418	1.420	0%	9.985	10.232	-2%
Sumaré	1.408	1.408	0%	548	540	1%	6.241	6.507	-4%
Vila Madalena	2.855	2.855	0%	1.998	2.000	0%	2.855	3.121	-9%
Média			0%	Média			Média		
							-3%		

A partir da simulação anterior, pode-se verificar a quantidade total de passageiros em algumas estações. A Figura 4.79, Figura 4.80 e Figura 4.81 ilustra o resultado para a Linha Azul, Linha Vermelha e Linha Verde, respectivamente.

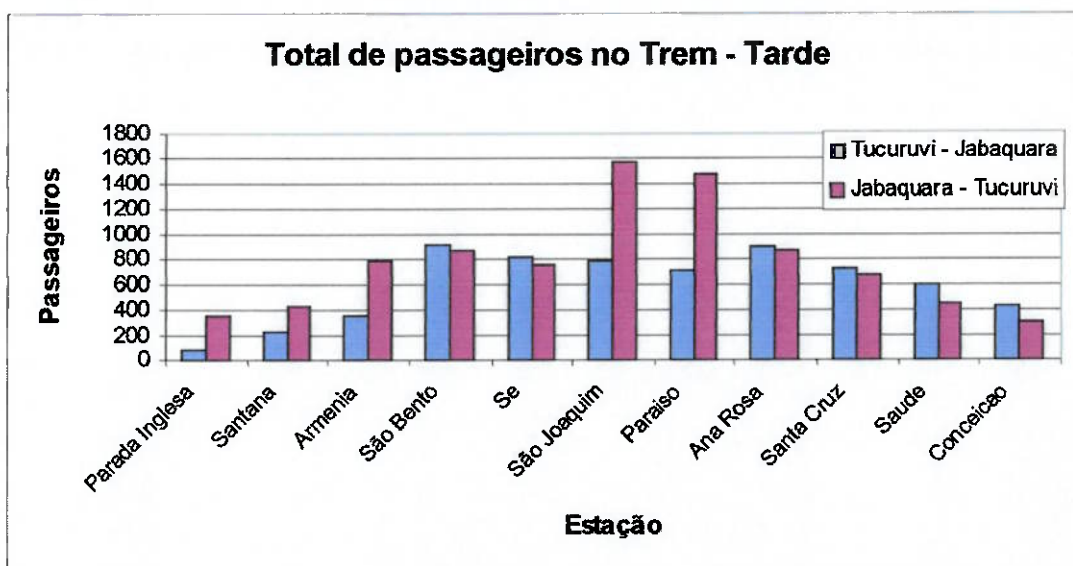


Figura 4.79 – Total passageiros no trem – Tarde – Linha Azul

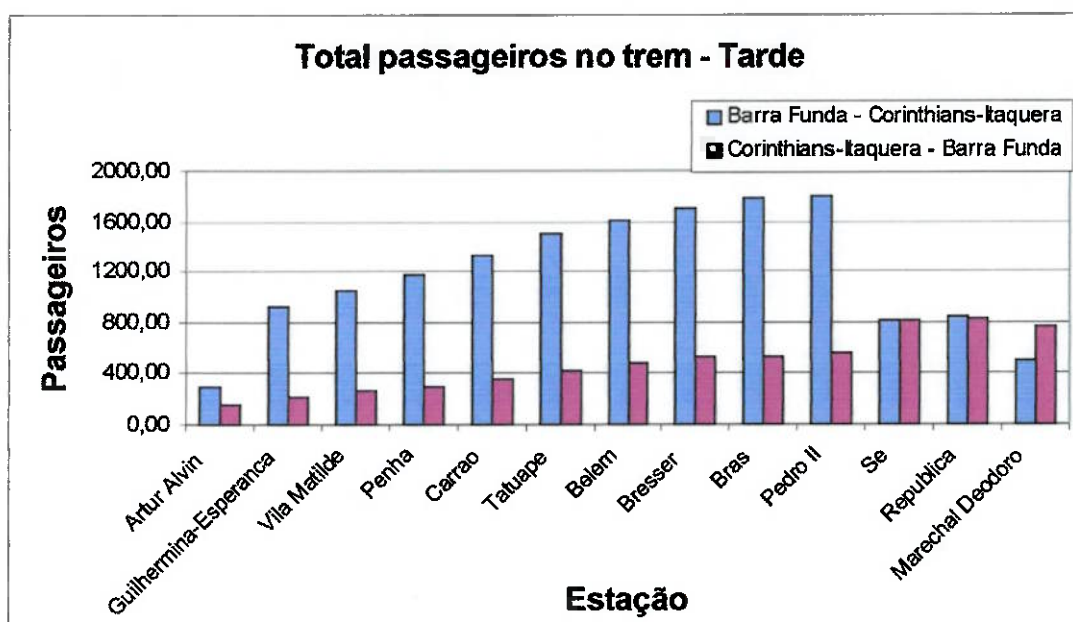


Figura 4.80 – Total passageiros no trem – Tarde – Linha Vermelha

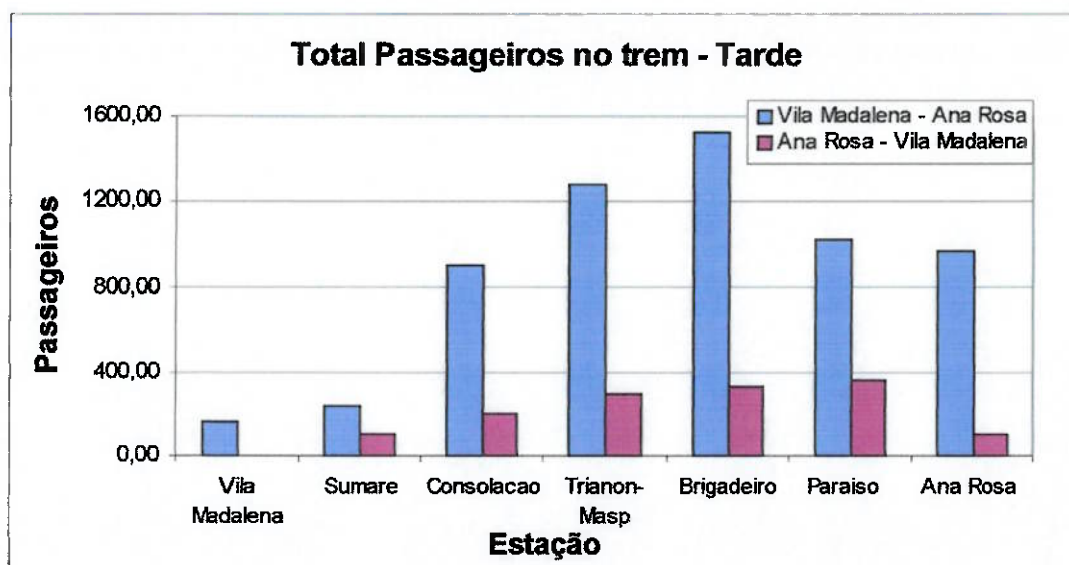


Figura 4.81 – Total passageiros no trem – Tarde – Linha Verde

A partir destes gráficos, pode-se concluir que:

- **Linha Azul:**
 - Nos dois sentidos, a quantidade de passageiros nos trens em circulação fica abaixo de sua capacidade. Isto não ocorre apenas em algumas estações, como as estações São Joaquim e Paraíso, onde os trens apresentam uma quantidade de passageiros próxima à sua capacidade total;
- **Linha Verde:**
 - Nos dois sentidos, a quantidade de passageiros nos trens em circulação fica abaixo de sua capacidade, sendo que o sentido Vila Madalena – Ana Rosa apresenta uma maior movimentação de passageiros.
- **Linha Vermelha:**
 - Nos dois sentidos, a quantidade de passageiros nos trens em circulação fica abaixo de sua capacidade, sendo que o sentido Barra Funda – Corinthians-Itaquera apresenta uma maior movimentação de passageiros.

Os resultados obtidos a partir da simulação do modelo desenvolvido em ProModel são bastante satisfatórios, comparando-se com os resultados esperados. Pode-se observar que os erros nos resultados obtidos, tanto para o período da manhã, quanto no período da tarde, foram pequenos na entrada e saída de passageiros da estação.

Estes erros são resultado das aproximações e arredondamentos dos números de entrada e saída de passageiros da estação, por segundo.

Pode-se observar que os erros do cálculo do total de passageiros na estação são maiores. Isto ocorre devido aos erros de aproximações e arredondamentos, mas principalmente, devido à propagação dos erros anteriores, visto que à medida que o trem vai de uma estação para outra, os erros de cálculo da estação anterior são sobrepostos pelos erros de cálculo da estação atual.

A partir dos gráficos do total de passageiros nos trens, observa-se que a quantidade de passageiros nos trens no período da tarde é maior que no período da manhã, indicando que no período da tarde, a utilização do Metrô por parte da população é maior que no período da manhã.

5. Análise

A análise de saídas consiste no estudo dos dados gerados na simulação do modelo em estudo. Seu propósito é prever o desempenho do sistema, ou comparar o desempenho de duas ou mais alternativas de projeto de sistemas [Banks, et al., 1996].

Neste trabalho, os modelos gerados tanto em HPSim como em ProModel foram simulados para a análise de alterações em certas condições do sistema metroviário, visando prever seu desempenho.

5.1. Análise com Modelos em HPSim

5.1.1. Caso 1: Aumento do Número de Trens em Circulação

Com base nos modelos apresentados em HPSim, propõe-se o estudo do comportamento do sistema frente a um aumento de 20% na frota efetiva de trens em circulação, nos horários de pico. Os novos números de trens em circulação nestes horários são apresentados na Tabela 5-1

Tabela 5-1: Dados para estudo de aumento em 20% do número de trens em horário de pico

	Linha 1 – Azul	Linha 2- Verde	Linha 3 - Vermelha
Número de carros atuais	270	66	252
Número de trens atuais	45	11	42
Número de trens adicionais	9	2	8
Número de trens totais	54	13	50

De posse destes novos números, os modelos são adaptados a estas mudanças e submetidos a mais uma simulação, cujos resultados são apresentados para os dois períodos em estudo:

- Período da Manhã:

Para o período da manhã, tem-se os novos gráficos de demanda de passageiros:

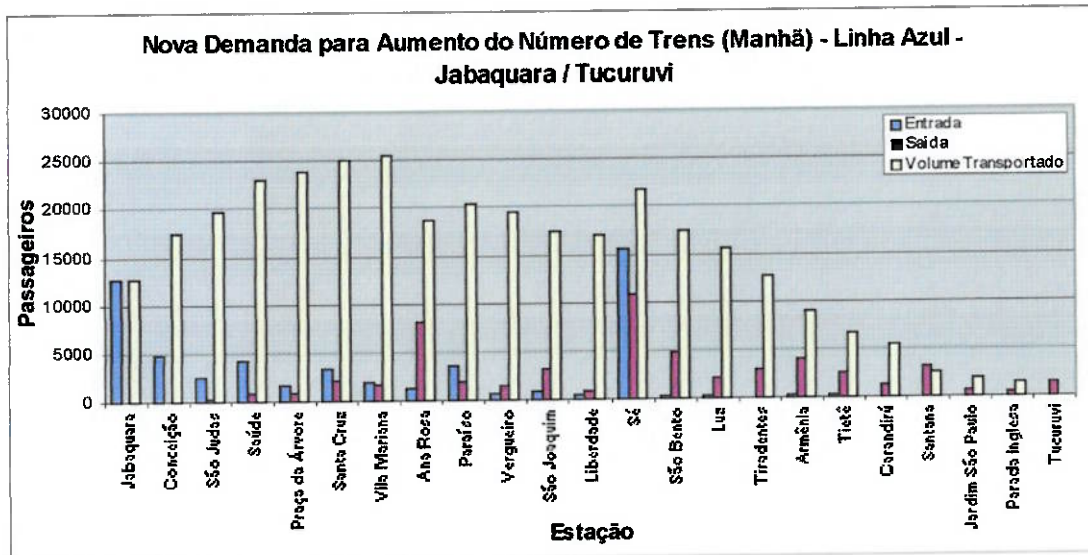


Figura 5.1 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Manhã)

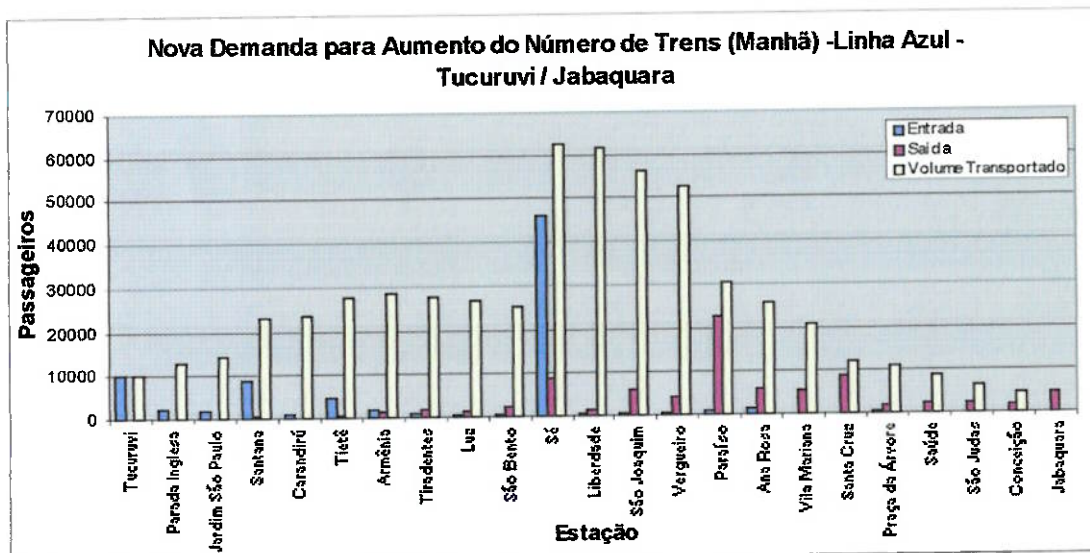


Figura 5.2 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Manhã)

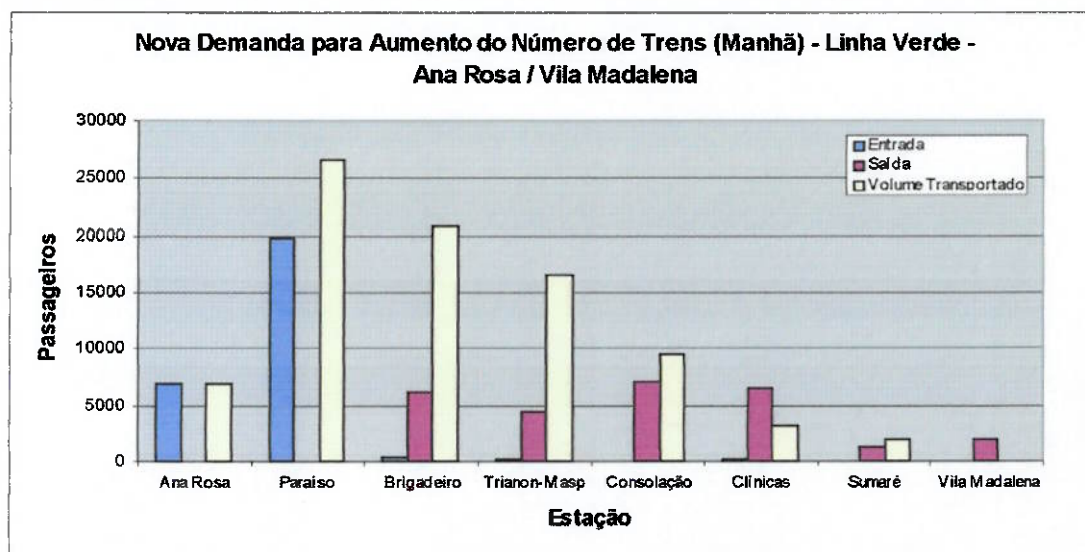


Figura 5.3 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã)

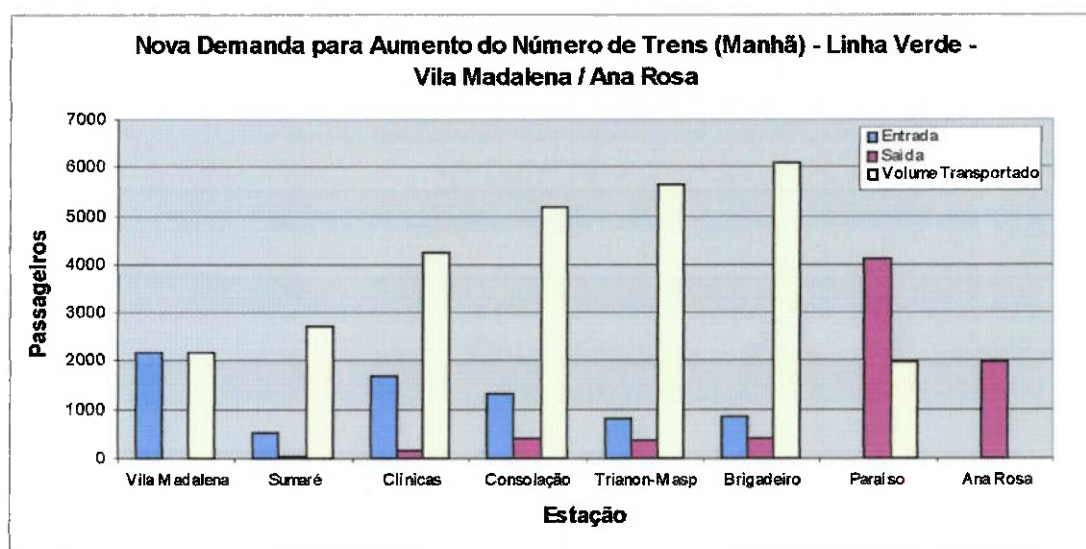


Figura 5.4 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã)

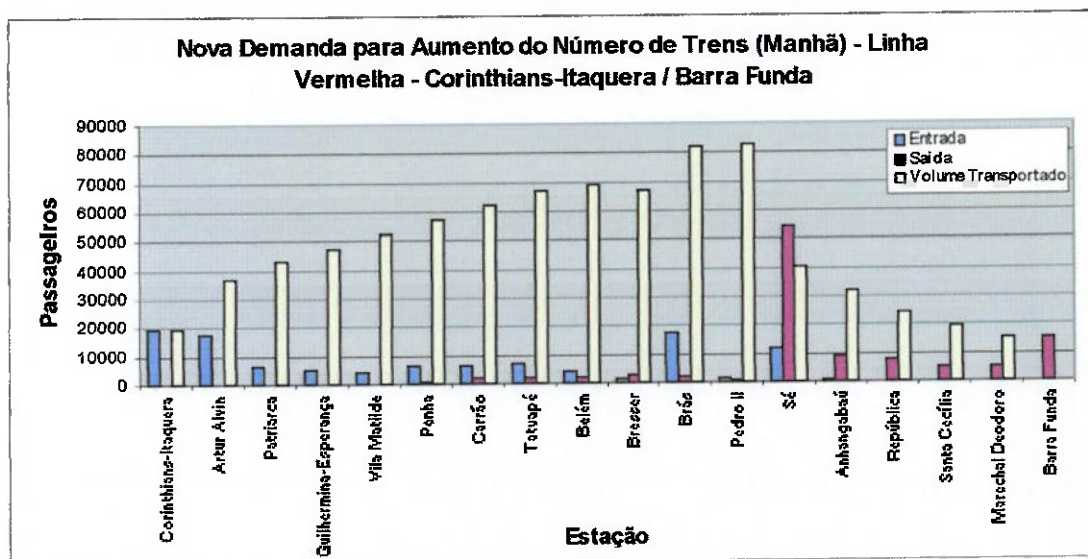


Figura 5.5 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)

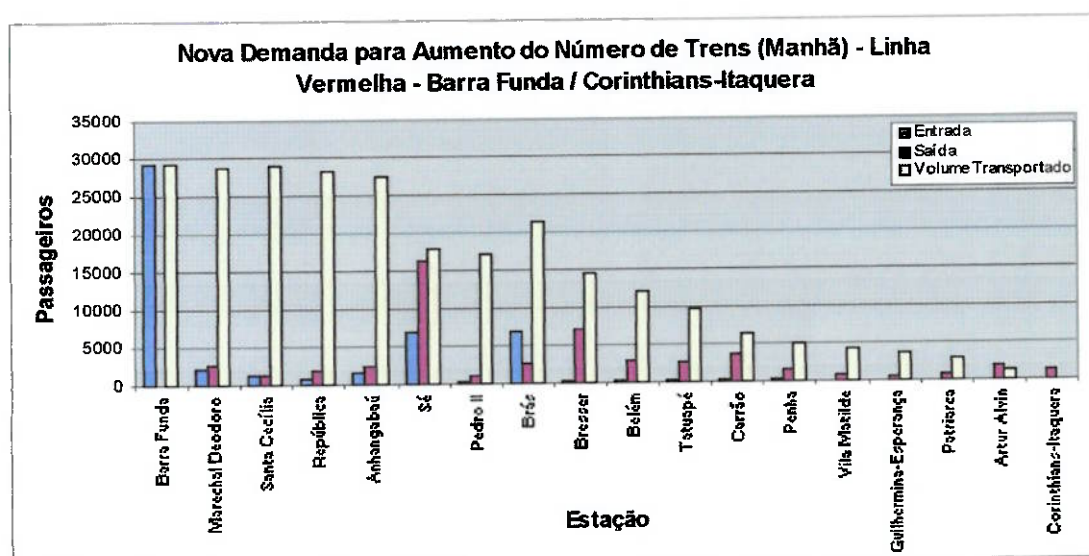


Figura 5.6 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Manhã)

Para uma análise geral, são apresentados os gráficos de demanda total por linha (Figura 5.7, Figura 5.8 e Figura 5.9), nos quais se encontram representados os totais de passageiros que circulam pelas estações e as capacidades das mesmas:

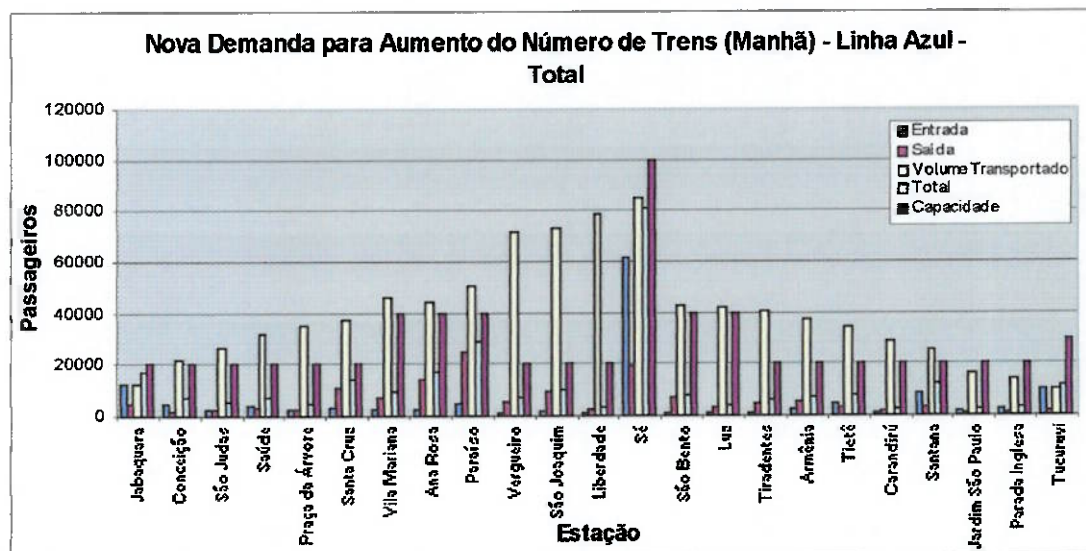


Figura 5.7 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Azul (Manhã)

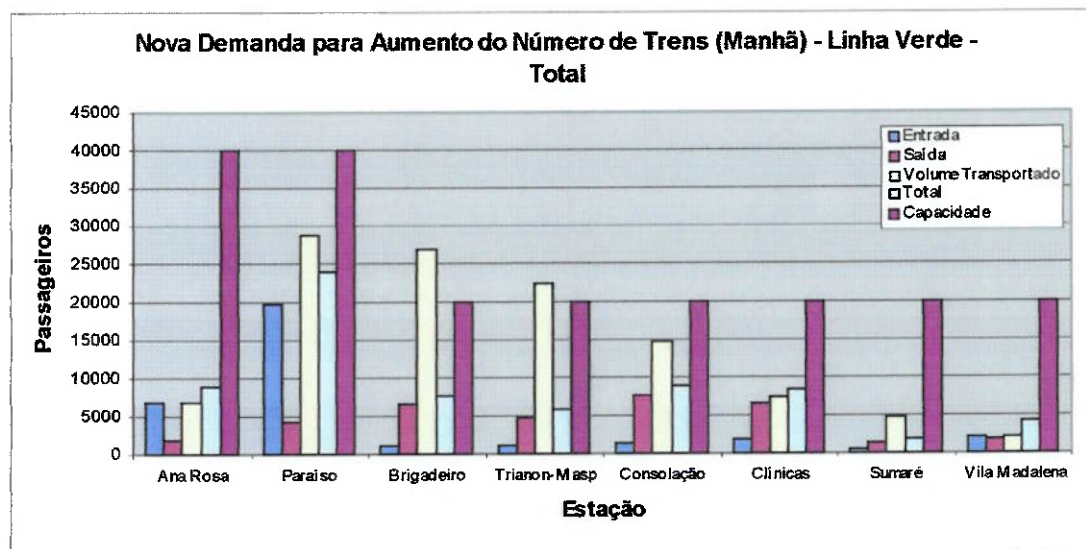


Figura 5.8 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Verde (Manhã)

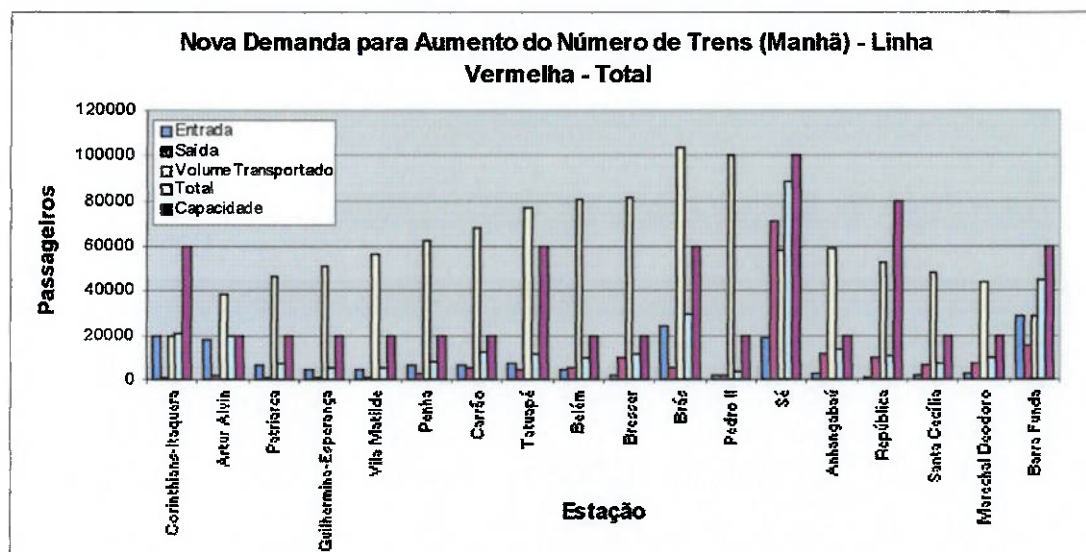


Figura 5.9 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Vermelha (Manhã)

São apresentados ainda os resultados totais referentes a este aumento de trens, para cada uma das linhas em estudo (Tabela 5-2, Tabela 5-3 e Tabela 5-4). Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao volume total de passageiros transportados nos trens, assim como o total de usuários que circulam nas plataformas das estações de cada linha (embarques e desembarques), em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-2: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Azul (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Aumento
<i>Jabaquara</i>	20000	10.512	12.670	20,53%	14.349	17.290	20,50%
<i>Conceição</i>	20000	18.272	22.050	20,68%	5.641	6.720	19,13%
<i>São Judas</i>	20000	21.712	26.145	20,42%	4.415	5.250	18,91%
<i>Saúde</i>	20000	26.251	31.599	20,37%	5.993	7.299	21,79%
<i>Praça da Árvore</i>	20000	29.029	34.758	19,74%	3.742	4.580	22,39%
<i>Santa Cruz</i>	20000	31.118	37.237	19,66%	11.567	14.077	21,70%
<i>Vila Mariana</i>	40000	38.435	46.120	19,99%	7.687	9.051	17,74%
<i>Ana Rosa</i>	40000	37.226	44.533	19,63%	13.745	16.777	22,06%
<i>Paraíso</i>	40000	42.447	50.788	19,65%	24.359	29.192	19,84%
<i>Vergueiro</i>	20000	60.144	71.958	19,64%	5.667	6.676	17,80%
<i>São Joaquim</i>	20000	61.709	73.506	19,12%	8.567	10.403	21,43%
<i>Liberdade</i>	20000	65.819	78.442	19,18%	2.535	3.039	19,88%
<i>Sé</i>	100000	70.849	84.550	19,34%	66.040	81.003	22,66%
<i>São Bento</i>	40000	36.825	42.619	15,73%	6.201	7.612	22,75%
<i>Luz</i>	40000	36.416	42.268	16,07%	3.435	4.184	21,80%
<i>Tiradentes</i>	20000	34.711	40.311	16,13%	4.947	5.951	20,30%
<i>Armênia</i>	20000	32.171	37.352	16,10%	6.193	7.322	18,23%
<i>Tiete</i>	20000	29.570	34.330	16,10%	6.430	7.712	19,94%
<i>Carandiru</i>	20000	25.236	29.123	15,40%	1.859	2.221	19,47%
<i>Santana</i>	20000	22.022	25.333	15,03%	10.484	12.252	16,86%
<i>Jardim São Paulo</i>	20000	14.230	16.319	14,68%	1.890	2.307	22,06%
<i>Parada Inglesa</i>	20000	12.537	14.314	14,17%	2.510	2.988	19,04%
<i>Tucuruvi</i>	30000	9.124	10.290	12,78%	10.478	11.830	12,90%
		Média		17,83%	Média		19,97%

Tabela 5-3: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Verde (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Aumento
<i>Ana Rosa</i>	40000	5.796	6.878	18,67%	7.334	8.835	20,47%
<i>Paraiso</i>	40000	23.993	28.624	19,30%	19.899	23.912	20,17%
<i>Brigadeiro</i>	20000	22.344	26.899	20,39%	6.440	7.763	20,54%
<i>Trianon-Masp</i>	20000	18.440	22.241	20,61%	4.769	5.733	20,21%
<i>Consolação</i>	20000	12.268	14.728	20,05%	7.316	8.923	21,97%
<i>Clinicas</i>	20000	6.209	7.410	19,34%	6.902	8.462	22,60%
<i>Sumaré</i>	20000	3.990	4.660	16,79%	1.470	1.796	22,18%
<i>Vila Madalena</i>	20000	1.851	2.191	18,37%	3.571	4.146	16,10%
		Média		19,19%	Média		20,53%

Tabela 5-4: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Vermelha (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Aumento
Corinthians-Itaquera	60000	16.804	19.464	15,83%	17.813	20.679	16,09%
Artur Alvin	20000	32.132	38.194	18,87%	15.936	19.411	21,80%
Patriarca	20000	39.051	46.202	18,31%	6.369	7.366	15,65%
Guilhermina-Esperança	20000	43.470	51.322	18,06%	4.732	5.488	15,96%
Vila Matilde	20000	47.782	56.317	17,86%	4.869	5.627	15,56%
Penha	20000	53.046	62.398	17,63%	7.258	8.494	17,02%
Carrão	20000	57.999	68.361	17,86%	10.437	12.103	15,96%
Tatuapé	60000	64.264	76.738	19,41%	9.014	11.321	25,59%
Belém	20000	67.604	80.859	19,61%	8.025	9.643	20,15%
Bresser	20000	68.278	81.716	19,68%	9.408	11.393	21,10%
Brás	60000	87.165	103.733	19,01%	23.858	29.331	22,94%
Pedro II	20000	83.994	99.941	18,98%	2.986	3.790	26,89%
Sé	100000	50.387	58.115	15,34%	71.179	88.945	24,96%
Anhangabaú	20000	50.614	59.345	17,25%	12.382	13.823	11,63%
República	80000	44.106	52.408	18,82%	9.979	10.796	8,18%
Santa Cecília	20000	41.231	48.765	18,27%	6.214	7.421	19,42%
Marechal Deodoro	20000	37.565	44.044	17,24%	8.006	9.650	20,53%
Barra Funda	60000	25.104	29.084	15,85%	37.981	44.339	16,74%
		Média		17,99%	Média		18,68%

Através destes gráficos e tabelas, é possível constatar que o aumento em 20% do número de trens no período da manhã proporciona uma elevação considerável de passageiros transportados (17,8% na Linha Azul, 19,2% na Linha Verde e 18,0% na Linha Vermelha) e que este volume de usuários excede a capacidade de algumas estações. Entretanto, estes números são proporcionados pelo aumento do número de trens em circulação, como pode ser observado pelo aumento do total de passageiros nas

estações (20,0% na Linha Azul, 20,5% na Linha Verde e 18,7% na Linha Vermelha). Portanto, estes gráficos indicam que, nesta situação, o sistema passa a operar em melhores condições se comparado com o sistema anteriormente apresentado na modelagem, isto é, proporcionando maior conforto aos usuários.

Entretanto, devido ao tráfego de trens nas vias mostrar-se mais intenso entre as estações, em alguns casos, houve esperas de trens nas vias.

- Período da Tarde:

Para o período da tarde, tem-se os novos gráficos de demanda de passageiros:

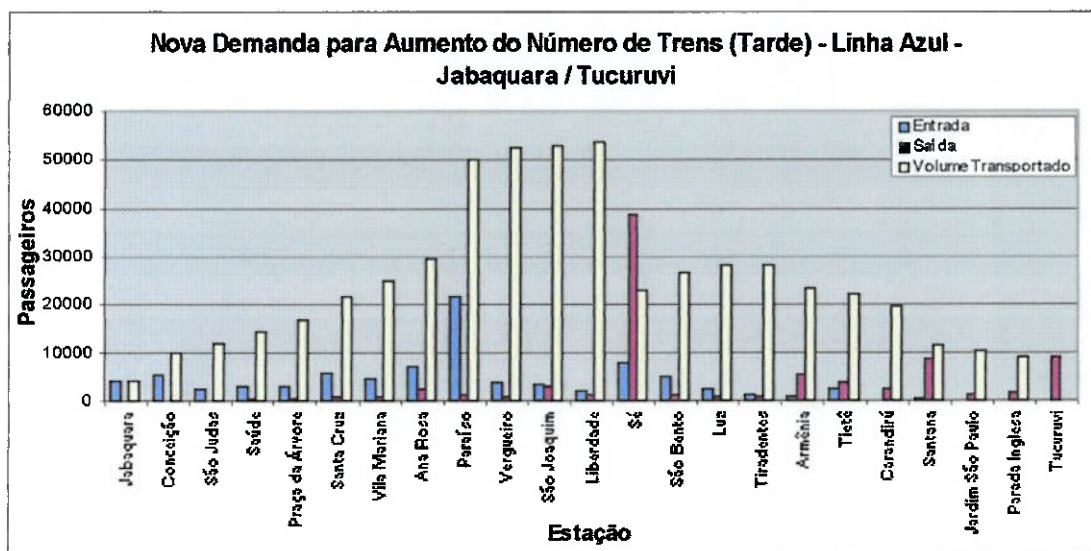


Figura 5.10 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Tarde)

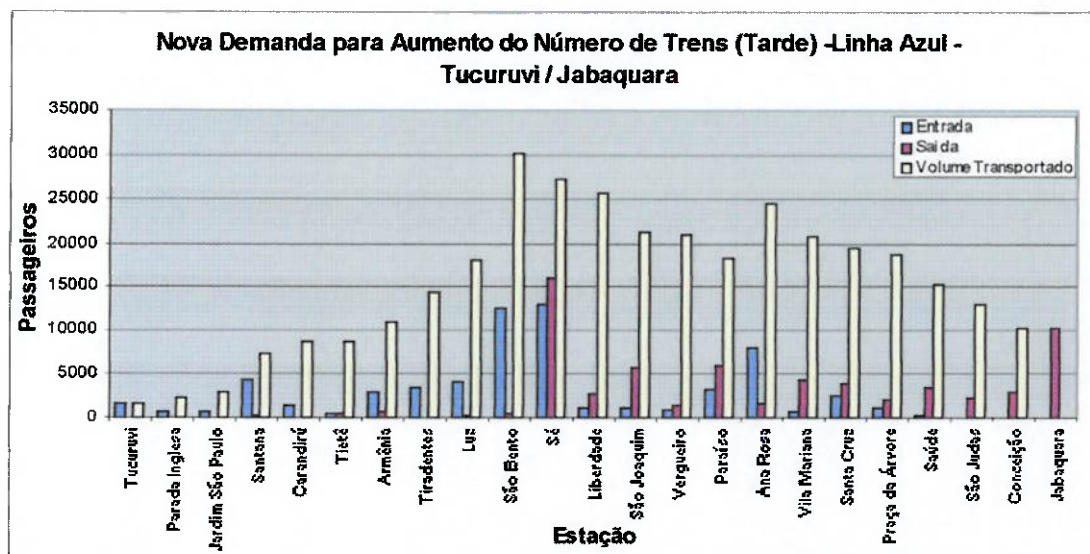


Figura 5.11 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Tarde)

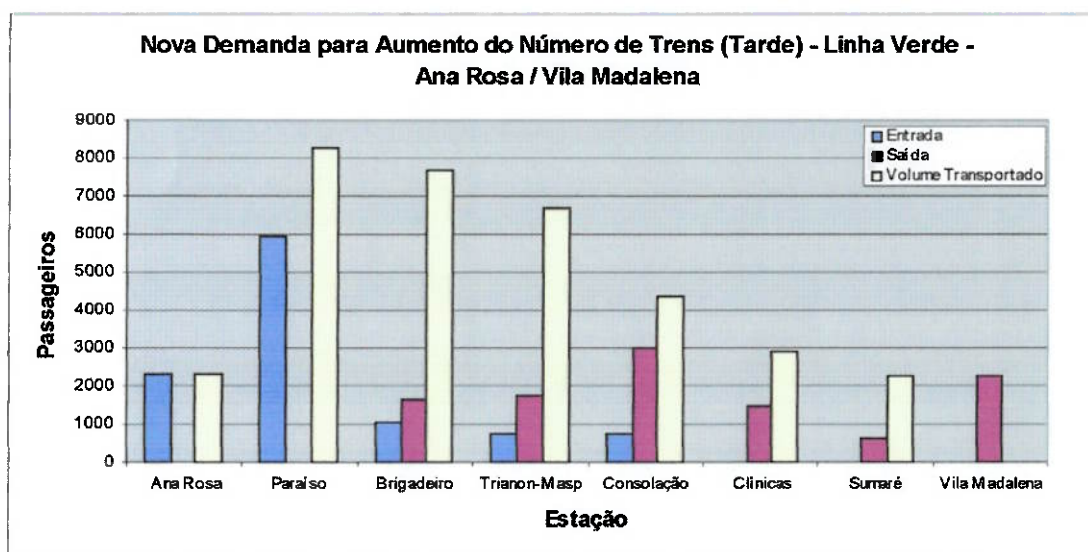


Figura 5.12 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)

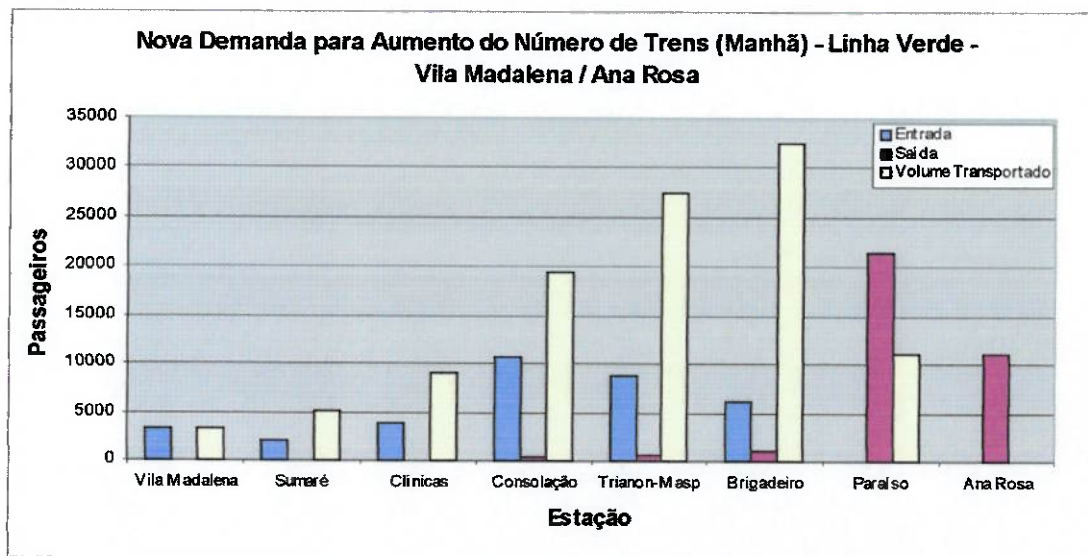


Figura 5.13 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)

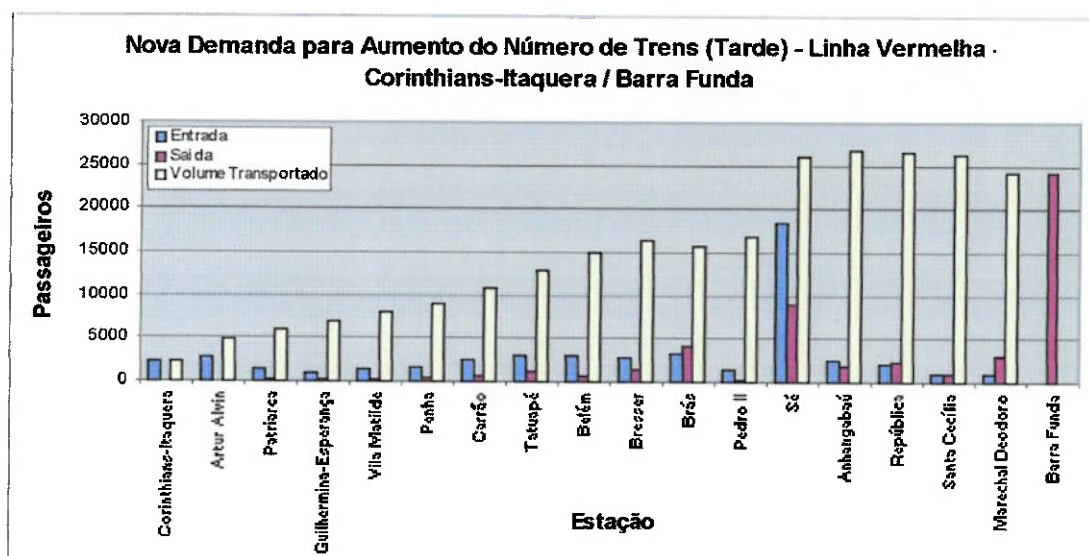


Figura 5.14 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)

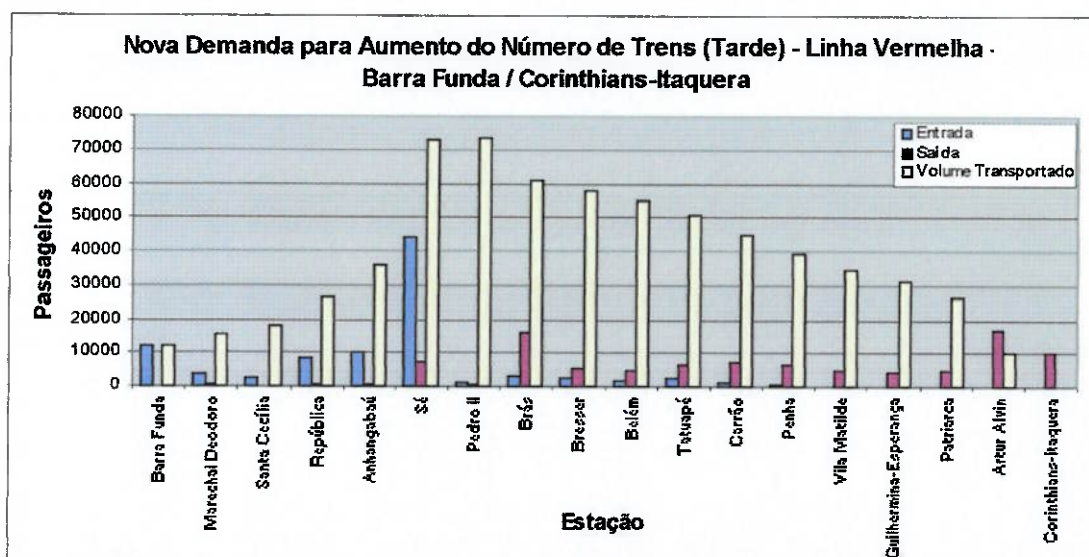


Figura 5.15 – Nova demanda para aumento de trens na Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Tarde)

Para uma análise geral, são apresentados os gráficos de demanda total por linha (Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18), nos quais se encontram representados os totais de passageiros que circulam pelas estações e as capacidades das mesmas:

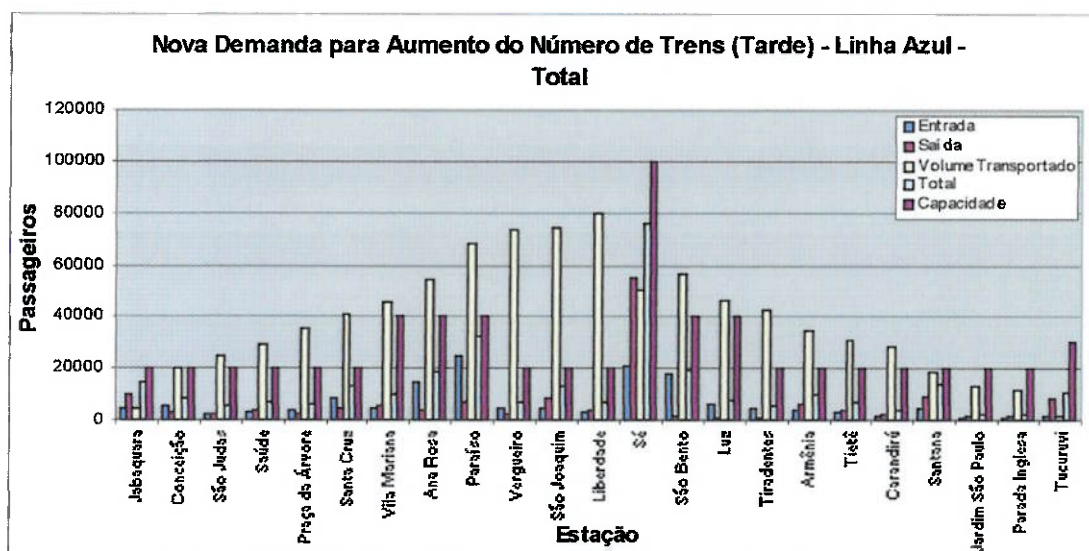


Figura 5.16 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Azul (Tarde)

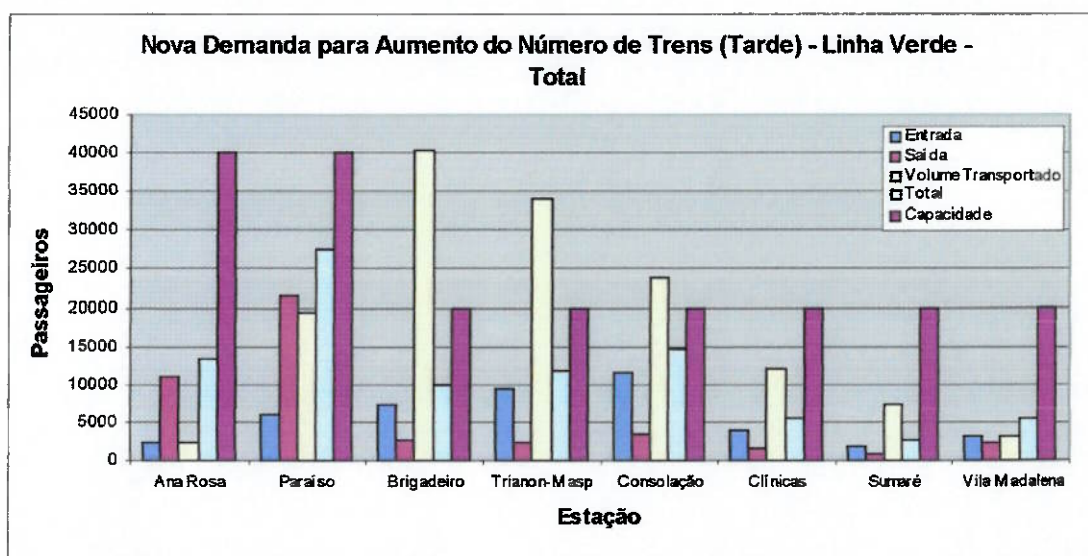


Figura 5.17 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Verde (Tarde)

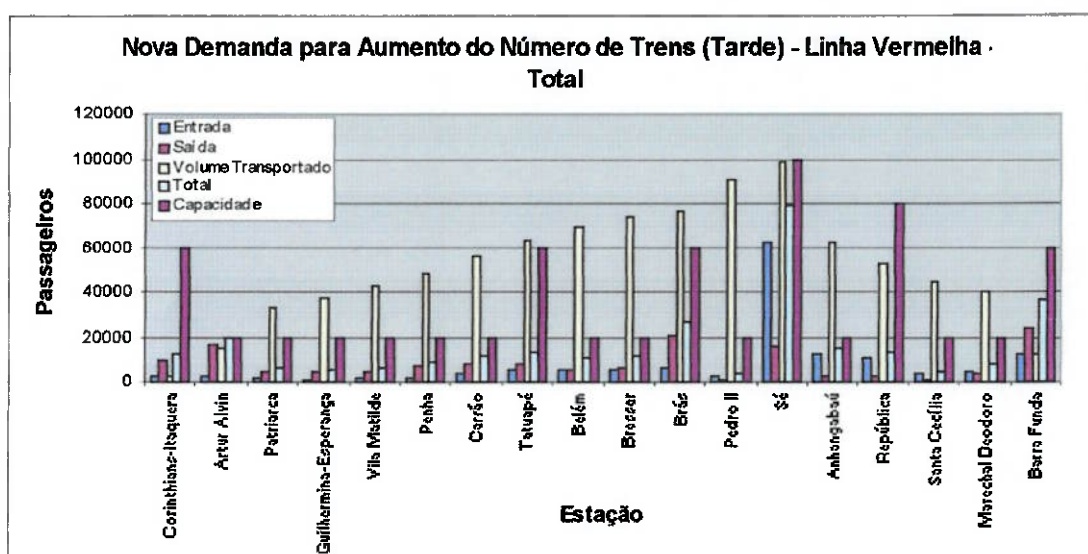


Figura 5.18 – Nova demanda total para aumento do número de trens na Linha Vermelha (Tarde)

São apresentados ainda os resultados totais referentes a este aumento de trens, para cada uma das linhas em estudo (Tabela 5-5, Tabela 5-6 e Tabela 5-7). Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao volume total de passageiros transportados nos trens, assim como o total de usuários que circulam nas plataformas

das estações de cada linha (embarques e desembarques), em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-5: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Azul (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Aumento
<i>Jabaquara</i>	20000	3.544	4.270	20,49%	12.478	14.450	15,80%
<i>Conceição</i>	20000	16.959	19.840	16,99%	7.422	8.655	16,61%
<i>São Judas</i>	20000	21.510	25.030	16,36%	4.213	5.040	19,63%
<i>Saúde</i>	20000	25.426	29.707	16,84%	5.682	6.852	20,59%
<i>Praça da Árvore</i>	20000	30.266	35.590	17,59%	4.935	6.172	25,07%
<i>Santa Cruz</i>	20000	34.973	41.251	17,95%	10.466	12.794	22,24%
<i>Vila Mariana</i>	40000	39.350	45.965	16,81%	8.490	10.138	19,41%
<i>Ana Rosa</i>	40000	45.992	53.961	17,33%	14.966	18.889	26,21%
<i>Paraiso</i>	40000	58.189	68.340	17,45%	26.702	32.216	20,65%
<i>Vergueiro</i>	20000	62.791	73.694	17,36%	5.712	6.828	19,54%
<i>São Joaquim</i>	20000	63.328	74.276	17,29%	8.327	13.027	56,44%
<i>Liberdade</i>	20000	65.574	79.642	21,45%	4.567	7.101	55,49%
<i>Sé</i>	100000	39.924	50.306	26,00%	62.702	75.765	20,83%
<i>São Bento</i>	40000	47.118	56.858	20,67%	15.397	19.247	25,00%
<i>Luz</i>	40000	39.256	46.514	18,49%	6.364	7.690	20,84%
<i>Tiradentes</i>	20000	36.226	42.788	18,11%	4.727	5.732	21,26%
<i>Armênia</i>	20000	29.413	34.520	17,36%	8.304	9.812	18,16%
<i>Tiete</i>	20000	26.461	31.090	17,49%	6.064	7.170	18,24%
<i>Carandiru</i>	20000	24.350	28.475	16,94%	3.346	4.097	22,44%
<i>Santana</i>	20000	16.363	18.728	14,45%	11.443	13.725	19,94%
<i>Jardim São Paulo</i>	20000	11.689	13.333	14,06%	1.748	2.030	16,13%
<i>Parada Inglesa</i>	20000	9.869	11.264	14,14%	1.866	2.212	18,54%
<i>Tucuruvi</i>	30000	1.512	1.715	13,43%	9.313	10.600	13,82%
		Média		17,61%	Média		23,17%

Tabela 5-6: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Verde (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Aumento
<i>Ana Rosa</i>	40000	2.009	2.294	14,19%	10.791	13.378	23,97%
<i>Paraíso</i>	40000	15.887	19.339	21,73%	22.802	27.400	20,16%
<i>Brigadeiro</i>	20000	33.124	40.193	21,34%	8.139	9.881	21,40%
<i>Trianon-Masp</i>	20000	28.131	34.084	21,16%	9.827	11.884	20,93%
<i>Consolação</i>	20000	19.638	23.727	20,82%	12.011	14.765	22,93%
<i>Clinicas</i>	20000	9.985	11.942	19,60%	4.669	5.441	16,53%
<i>Sumaré</i>	20000	6.241	7.425	18,97%	1.956	2.620	33,95%
<i>Vila Madalena</i>	20000	2.855	3.230	13,13%	4.853	5.491	13,15%
		Média		18,87%	Média		21,63%

Tabela 5-7: Dados comparativos totais para aumento de trens na Linha Vermelha (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Aumento
Corinthians-Itaquera	60000	2.124	2.376	11,86%	10.707	12.276	14,65%
Artur Alvin	20000	12.908	14.841	14,98%	17.082	19.489	14,09%
Patriarca	20000	28.403	32.553	14,61%	5.366	6.178	15,13%
Guilhermina-Esperança	20000	32.810	37.621	14,66%	4.573	5.445	19,07%
Vila Matilde	20000	37.206	42.851	15,17%	5.404	6.249	15,64%
Penha	20000	41.725	48.185	15,48%	7.378	8.839	19,80%
Carrão	20000	48.173	55.815	15,86%	9.973	11.763	17,95%
Tatuapé	60000	54.533	63.438	16,33%	11.496	13.664	18,86%
Belém	20000	59.854	69.753	16,54%	8.950	10.672	19,24%
Bresser	20000	63.583	74.180	16,67%	9.774	11.767	20,39%
Brás	60000	65.336	76.345	16,85%	22.339	26.897	20,40%
Pedro II	20000	77.039	90.436	17,39%	2.940	3.551	20,78%
Sé	100000	83.953	98.846	17,74%	65.961	78.972	19,73%
Anhangabaú	20000	53.126	62.614	17,86%	12.297	14.820	20,52%
República	80000	44.940	52.732	17,34%	11.077	12.900	16,46%
Santa Cecília	20000	37.787	44.455	17,65%	4.003	4.661	16,44%
Marechal Deodoro	20000	33.782	39.743	17,65%	6.824	8.055	18,04%
Barra Funda	60000	10.258	12.188	18,81%	30.938	36.368	17,55%
		Média		16,30%	Média		18,04%

Através destes gráficos e tabelas, é possível constatar que o aumento em 20% do número de trens no período da tarde também proporciona uma elevação considerável de passageiros transportados (17,6% na Linha Azul, 18,9% na Linha Verde e 16,3% na Linha Vermelha) e que este volume de usuários excede a capacidade de algumas estações. Entretanto, estes números são proporcionados pelo aumento do número de trens em circulação, como pode ser observado pelo aumento do total de passageiros nas

estações (23,2% na Linha Azul, 21,6% na Linha Verde e 18,0% na Linha Vermelha). Portanto, estes gráficos indicam que, nesta situação, o sistema passa a operar em melhores condições se comparado com o sistema anteriormente apresentado na modelagem, isto é, proporcionando maior conforto aos usuários.

Entretanto, assim como na simulação para o período da manhã, devido ao tráfego de trens nas vias mostrar-se mais intenso entre as estações, em alguns casos, houve esperas de trens nas vias.

5.1.2. Caso 2: Aumento de Tempo de Percurso entre Estações

Propõe-se a análise do aumento em 50% do tempo de percurso dos trens entre estações. Esta situação é muito comum em dias chuvosos ou quando o sistema operacional apresenta falhas, obrigando a operação dos trens com velocidades reduzidas.

Os resultados destas reduções são apresentados para os dois períodos em estudo:

- Período da Manhã:

Para o período da manhã, tem-se os novos gráficos de demanda de passageiros:

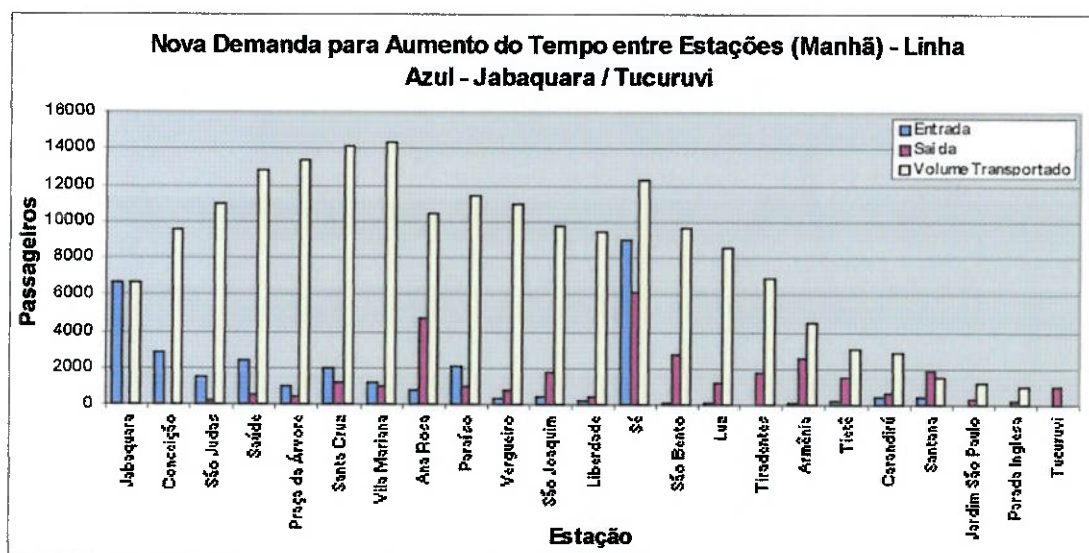


Figura 5.19 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Manhã)

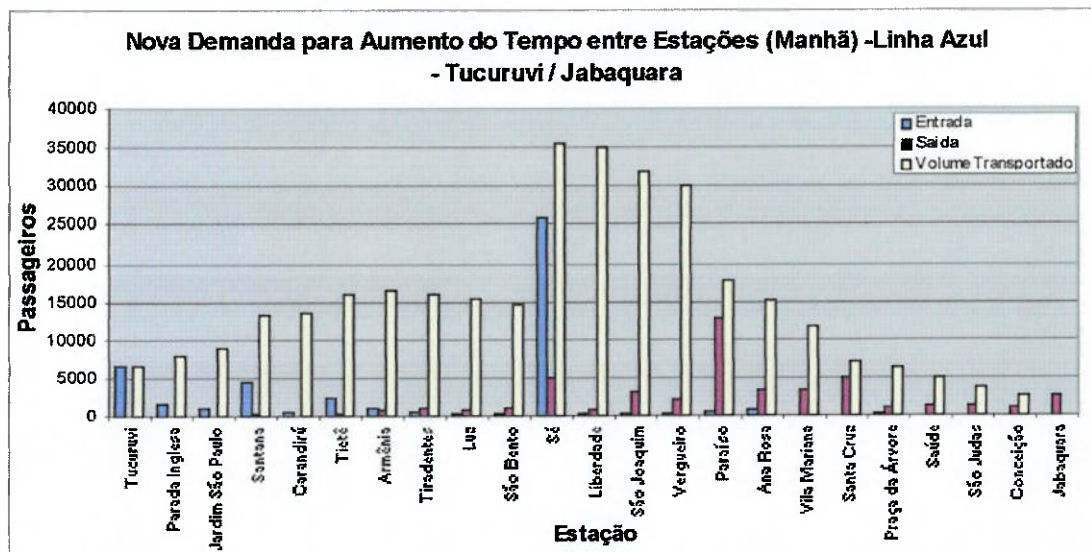


Figura 5.20 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Manhã)

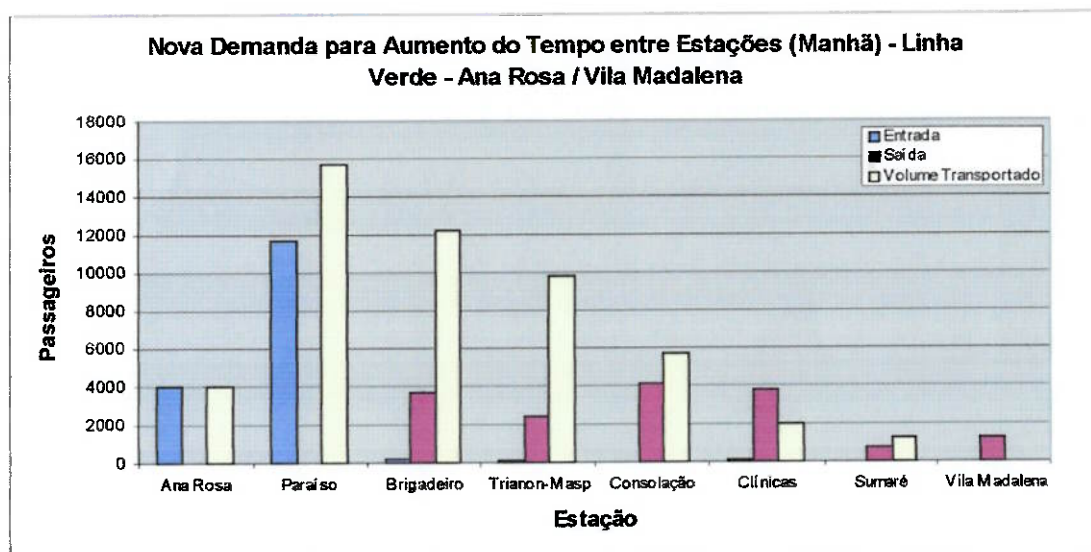


Figura 5.21 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã)

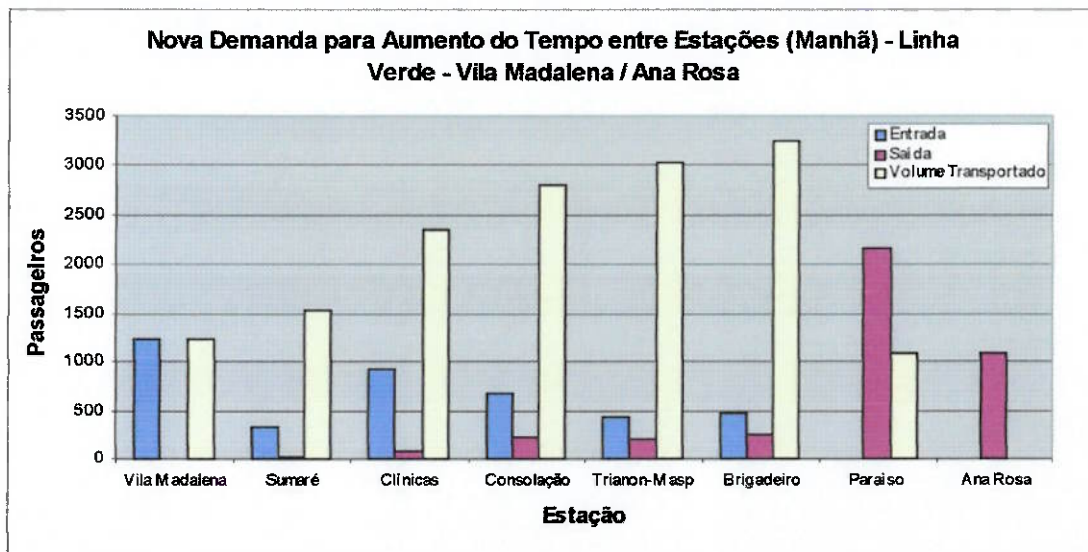


Figura 5.22 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã)

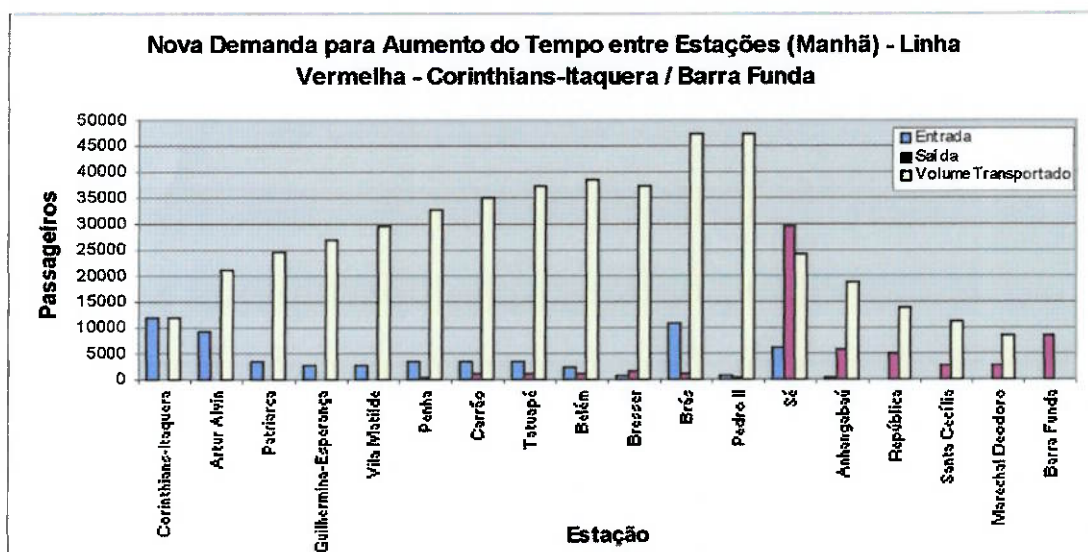


Figura 5.23 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)

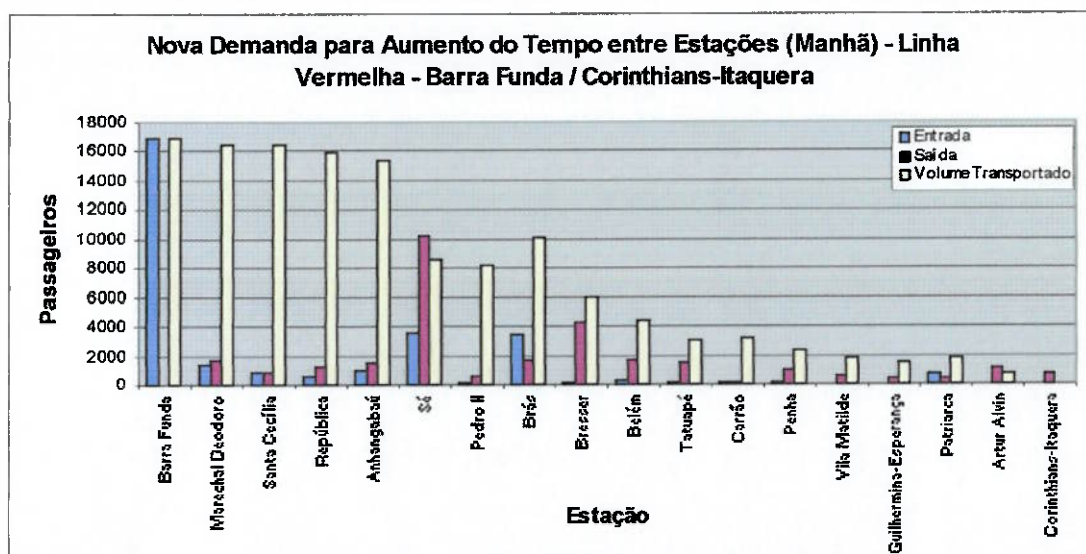


Figura 5.24 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Manhã)

Para uma análise geral, são apresentados os gráficos de demanda total por linha (Figura 5.25, Figura 5.26 e Figura 5.27), nos quais se encontram representados os totais de passageiros que circulam pelas estações e as capacidades das mesmas:

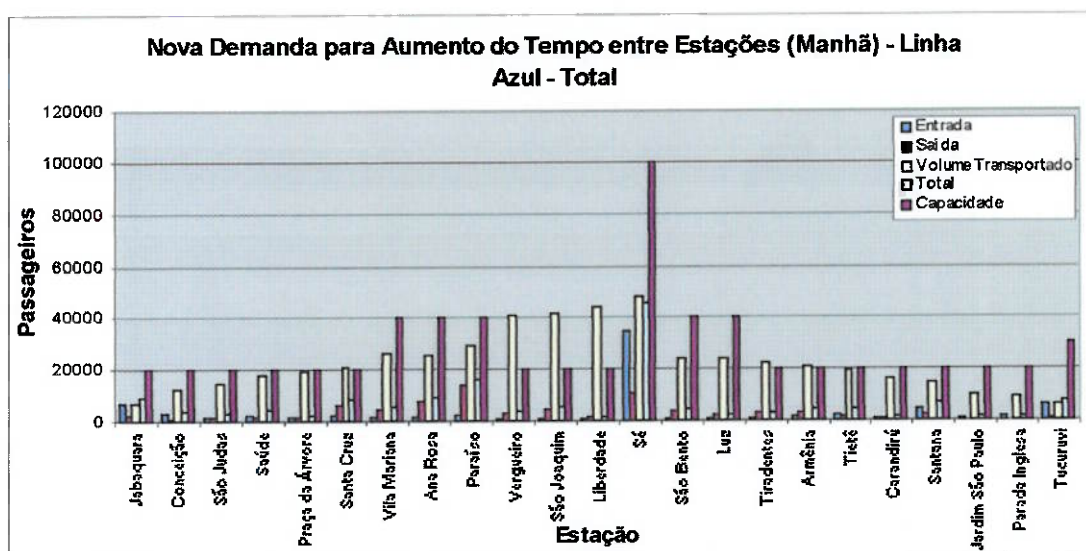


Figura 5.25 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Azul (Manhã)

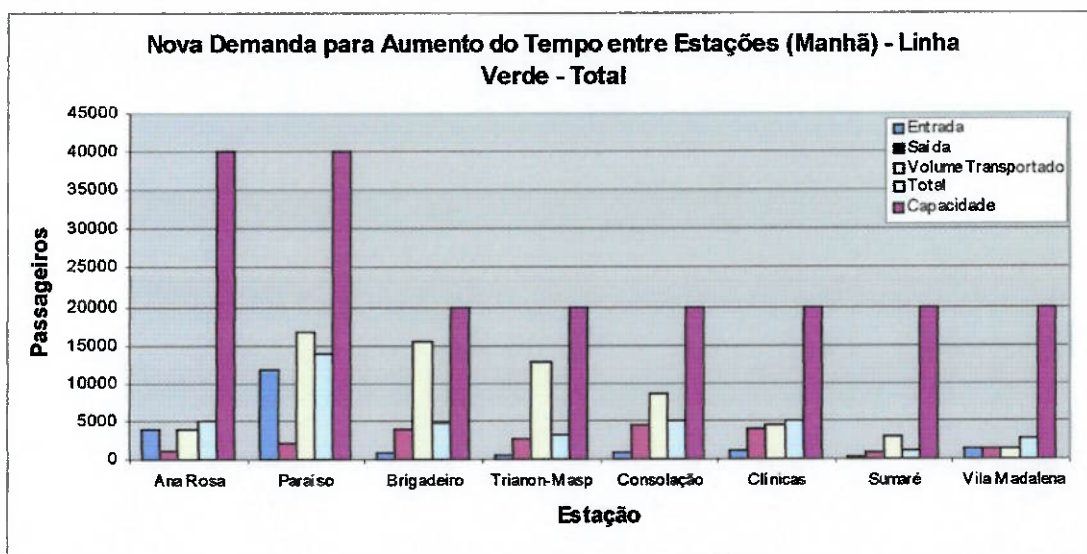


Figura 5.26 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Verde (Manhã)

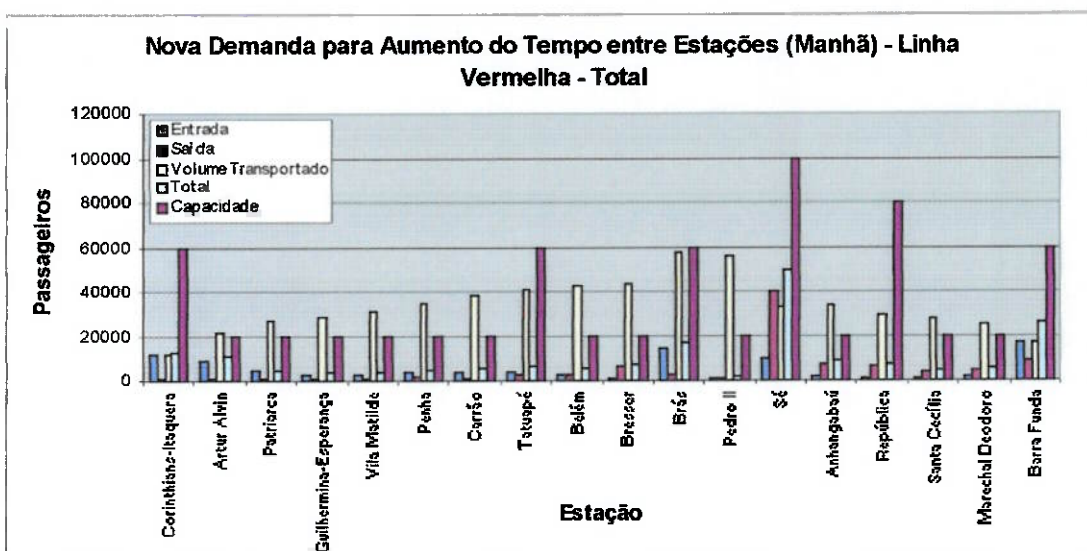


Figura 5.27 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Vermelha (Manhã)

São apresentados ainda os resultados totais referentes a este aumento do tempo entre estações, para cada uma das linhas em estudo (Tabela 5-8, Tabela 5-9 e Tabela 5-10). Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao volume total de passageiros transportados nos trens, assim como o total de usuários que circulam nas

plataformas das estações de cada linha (embarques e desembarques), em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-8: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Azul (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Redução
<i>Jabaquara</i>	20000	10.512	6.732	-35,96%	14.349	9.372	-34,69%
<i>Conceição</i>	20000	18.272	12.228	-33,08%	5.641	3.978	-29,48%
<i>São Judas</i>	20000	21.712	14.633	-32,60%	4.415	3.081	-30,22%
<i>Saúde</i>	20000	26.251	17.777	-32,28%	5.993	4.330	-27,75%
<i>Praça da Árvore</i>	20000	29.029	19.688	-32,18%	3.742	2.688	-28,17%
<i>Santa Cruz</i>	20000	31.118	21.129	-32,10%	11.567	8.142	-29,61%
<i>Vila Mariana</i>	40000	38.435	26.269	-31,65%	7.687	5.607	-27,06%
<i>Ana Rosa</i>	40000	37.226	25.590	-31,26%	13.745	9.515	-30,77%
<i>Paraíso</i>	40000	42.447	29.155	-31,31%	24.359	16.361	-32,83%
<i>Vergueiro</i>	20000	60.144	41.082	-31,69%	5.667	3.560	-37,18%
<i>São Joaquim</i>	20000	61.709	41.722	-32,39%	8.567	5.762	-32,74%
<i>Liberdade</i>	20000	65.819	44.380	-32,57%	2.535	1.645	-35,11%
<i>Sé</i>	100000	70.849	47.836	-32,48%	66.040	45.873	-30,54%
<i>São Bento</i>	40000	36.825	24.234	-34,19%	6.201	4.389	-29,22%
<i>Luz</i>	40000	36.416	23.972	-34,17%	3.435	2.440	-28,97%
<i>Tiradentes</i>	20000	34.711	22.815	-34,27%	4.947	3.368	-31,92%
<i>Armênia</i>	20000	32.171	20.875	-35,11%	6.193	4.364	-29,53%
<i>Tiete</i>	20000	29.570	19.075	-35,49%	6.430	4.428	-31,14%
<i>Carandiru</i>	20000	25.236	16.523	-34,53%	1.859	1.688	-9,20%
<i>Santana</i>	20000	22.022	14.761	-32,97%	10.484	6.990	-33,33%
<i>Jardim São Paulo</i>	20000	14.230	10.133	-28,79%	1.890	1.381	-26,93%
<i>Parada Inglesa</i>	20000	12.537	8.926	-28,80%	2.510	1.798	-28,37%
<i>Tucuruvi</i>	30000	9.124	6.468	-29,11%	10.478	7.436	-29,03%
		Média		-32,57%	Média		-29,73%

Tabela 5-9: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Verde (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Redução
<i>Ana Rosa</i>	40000	5.796	3.982	-31,30%	7.334	5.065	-30,94%
<i>Paraiso</i>	40000	23.993	16.746	-30,20%	19.899	13.851	-30,39%
<i>Brigadeiro</i>	20000	22.344	15.430	-30,94%	6.440	4.586	-28,79%
<i>Trianon-Masp</i>	20000	18.440	12.857	-30,28%	4.769	3.167	-33,59%
<i>Consolação</i>	20000	12.268	8.531	-30,46%	7.316	5.097	-30,33%
<i>Clinicas</i>	20000	6.209	4.364	-29,71%	6.902	4.860	-29,59%
<i>Sumaré</i>	20000	3.990	2.791	-30,05%	1.470	1.077	-26,73%
<i>Vila Madalena</i>	20000	1.851	1.230	-33,55%	3.571	2.495	-30,13%
		Média		-30,81%	Média		-30,06%

Tabela 5-10: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Redução
Corinthians-Itaquera	60000	16.804	11.775	-29,93%	17.813	12.450	-30,11%
Artur Alvin	20000	32.132	21.712	-32,43%	15.936	10.476	-34,27%
Patriarca	20000	39.051	26.401	-32,39%	6.369	4.843	-23,96%
Guilhermina-Esperança	20000	43.470	28.667	-34,05%	4.732	3.116	-34,16%
Vila Matilde	20000	47.782	31.504	-34,07%	4.869	3.219	-33,89%
Penha	20000	53.046	34.965	-34,09%	7.258	4.878	-32,80%
Carrão	20000	57.999	38.298	-33,97%	10.437	4.897	-53,08%
Tatuapé	60000	64.264	40.509	-36,96%	9.014	6.214	-31,07%
Belém	20000	67.604	42.814	-36,67%	8.025	5.415	-32,53%
Bresser	20000	68.278	43.348	-36,51%	9.408	6.723	-28,54%
Brás	60000	87.165	57.380	-34,17%	23.858	16.985	-28,81%
Pedro II	20000	83.994	55.630	-33,77%	2.986	2.086	-30,16%
Sé	100000	50.387	32.819	-34,87%	71.179	49.687	-30,19%
Anhangabaú	20000	50.614	34.091	-32,65%	12.382	8.777	-29,12%
República	80000	44.106	29.676	-32,72%	9.979	7.002	-29,83%
Santa Cecília	20000	41.231	27.647	-32,95%	6.214	4.487	-27,79%
Marechal Deodoro	20000	37.565	25.153	-33,04%	8.006	5.670	-29,18%
Barra Funda	60000	25.104	16.847	-32,89%	37.981	25.461	-32,96%
		Média		-33,78%	Média		-31,80%

Através destes gráficos e tabelas, é possível constatar que o aumento em 50% do tempo de percurso entre estações consecutivas no período da manhã acarreta em uma redução considerável de passageiros transportados (32,6% na Linha Azul, 30,8% na Linha Verde e 33,8% na Linha Vermelha). Tal fato indica que grande volume de passageiros que, em condições normais de operação, eram transportados, permanece nas plataformas de embarque das estações. Outro fator que indica o aumento de usuários nas plataformas de embarque é a redução no número total de embarques e de desembarques,

representado pelo total de passageiros (29,7% na Linha Azul, 30,1% na Linha Verde e 31,8% na Linha Vermelha). Portanto, estes gráficos indicam que, nesta situação, o sistema passa a operar em piores condições se comparado com o sistema atualmente em vigor, acarretando em serviços inferiores de conforto aos usuários.

Devido ao tráfego de trens nas vias mostrar-se mais lento entre as estações, em alguns casos, houve esperas de trens nas vias.

- Período da Tarde:

Para o período da tarde, tem-se os novos gráficos de demanda de passageiros:

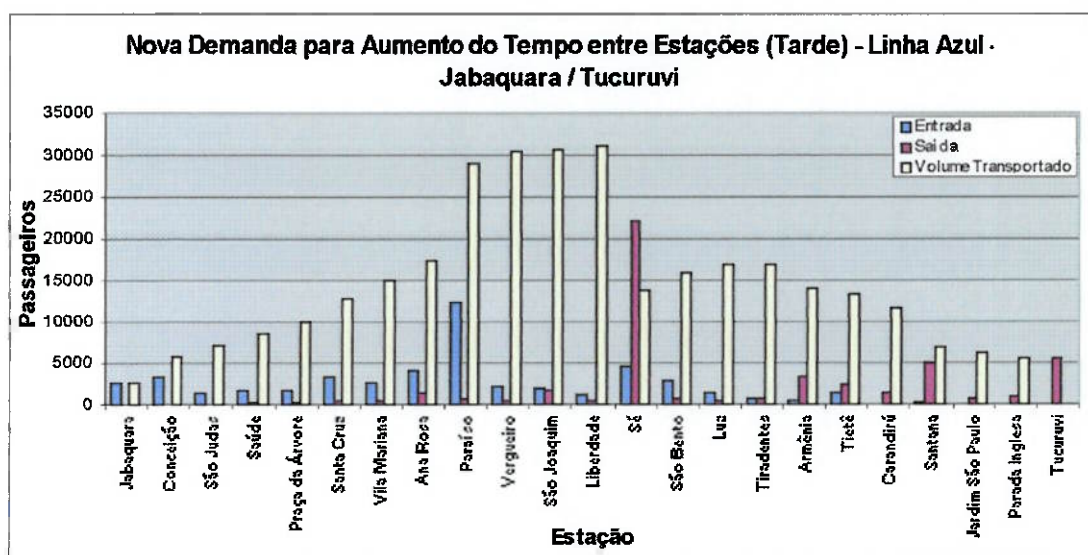


Figura 5.28 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Tarde)

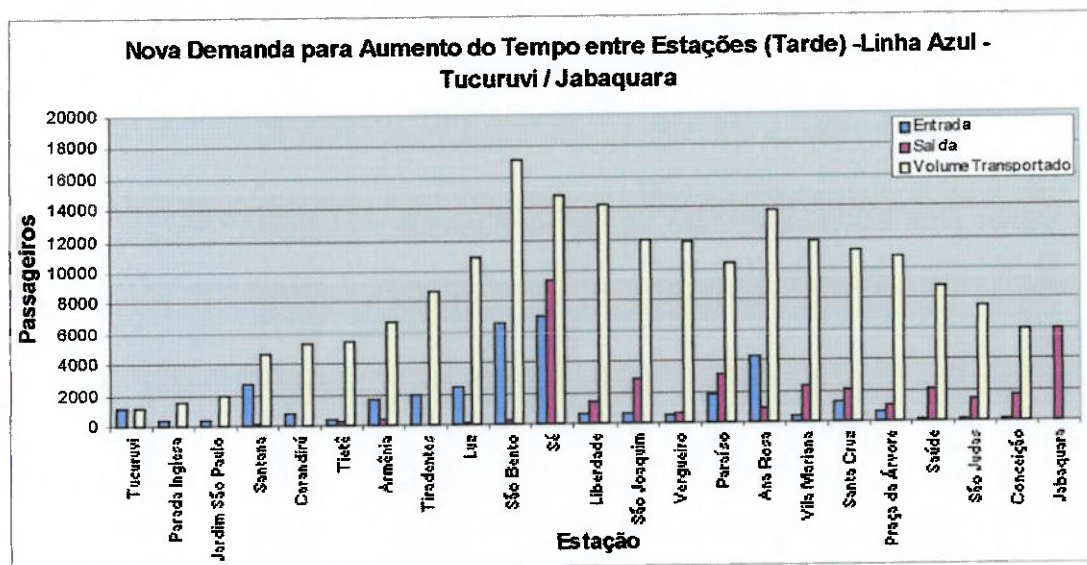


Figura 5.29 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Tarde)

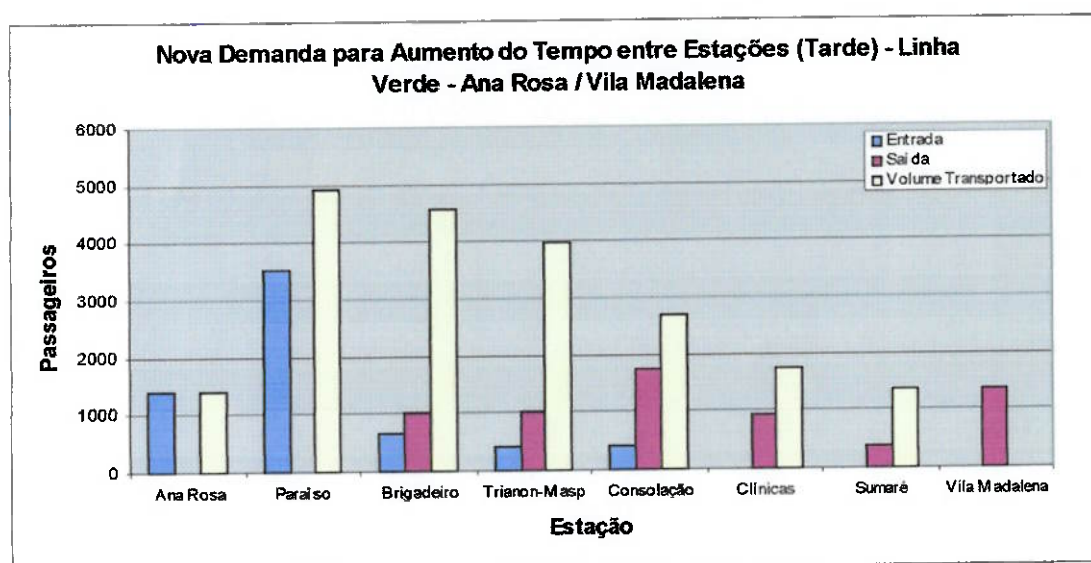


Figura 5.30 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)

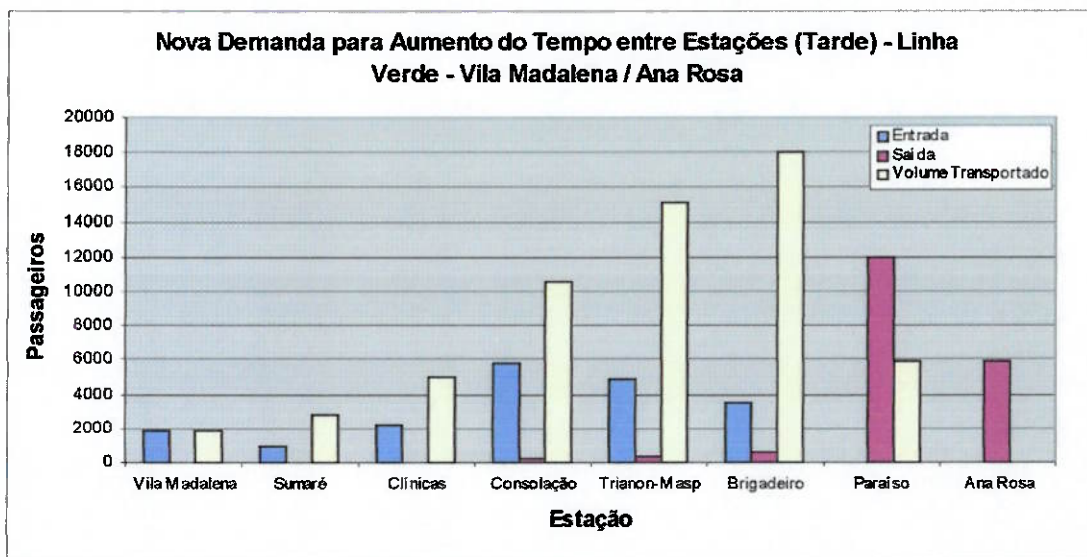


Figura 5.31 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)

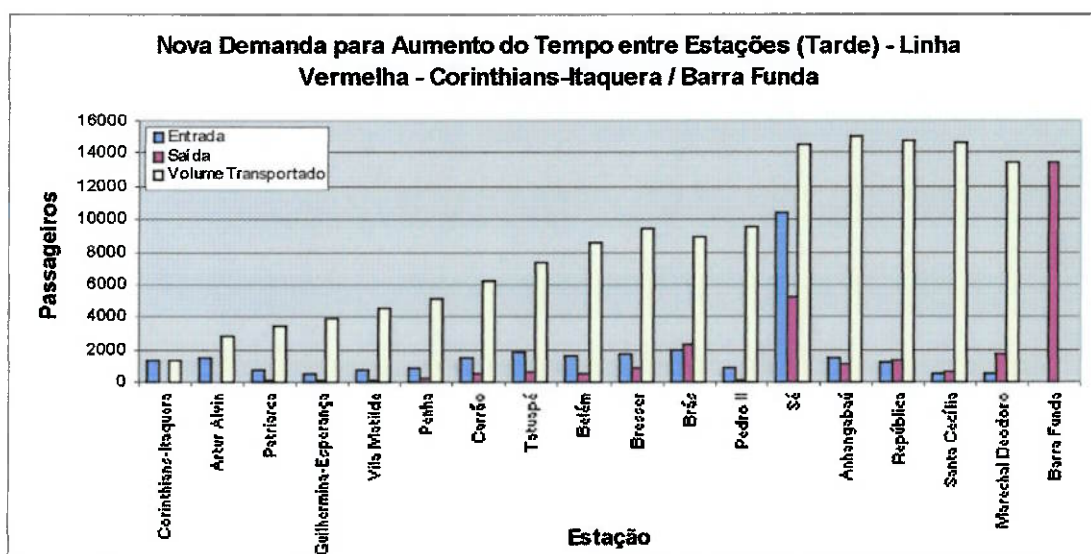


Figura 5.32 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)

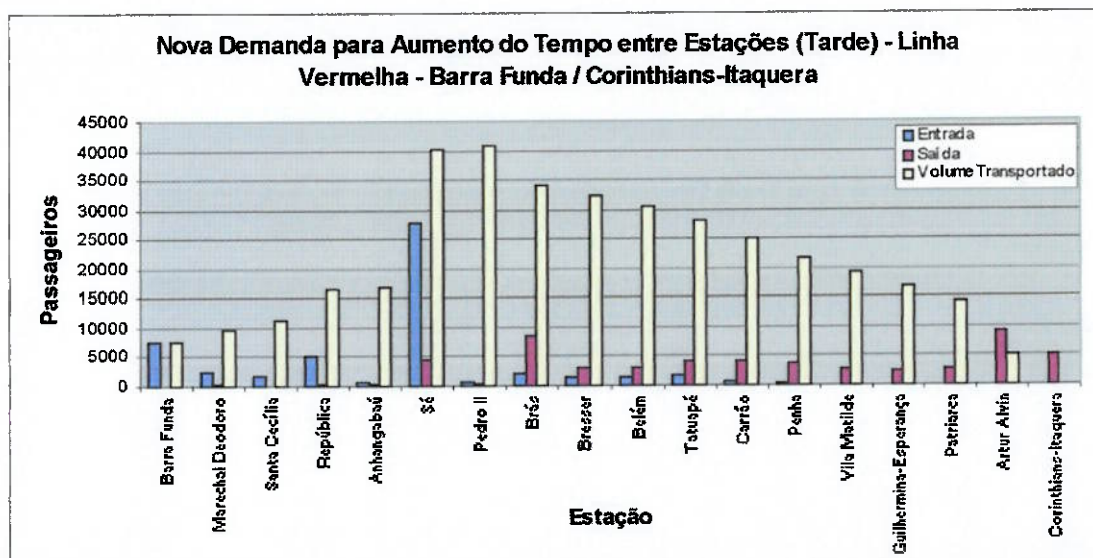


Figura 5.33 – Nova demanda para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Tarde)

Para uma análise geral, são apresentados os gráficos de demanda total por linha (Figura 5.34, Figura 5.35 e Figura 5.36), nos quais se encontram representados os totais de passageiros que circulam pelas estações e as capacidades das mesmas:

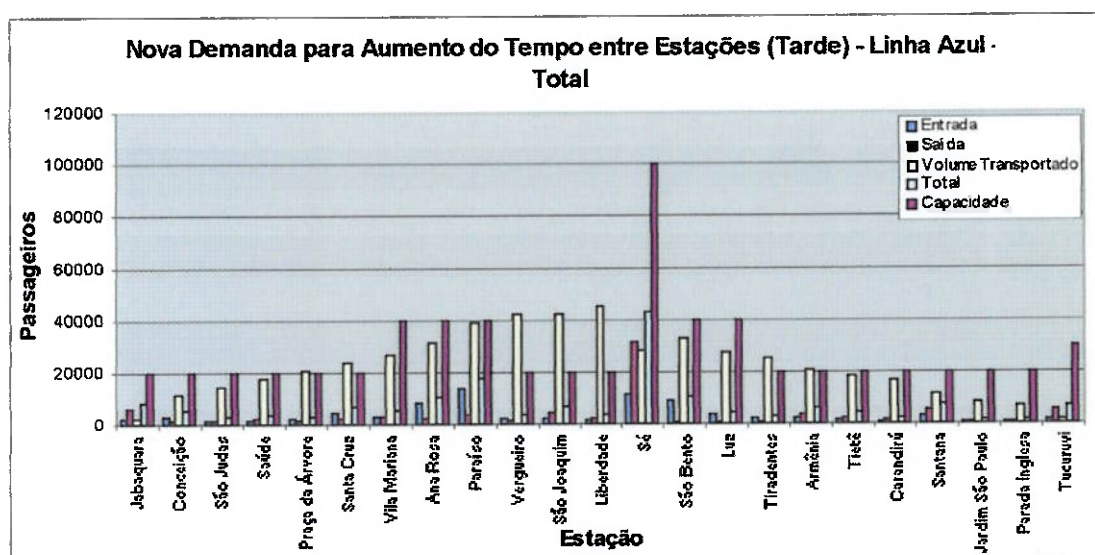


Figura 5.34 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Azul (Tarde)

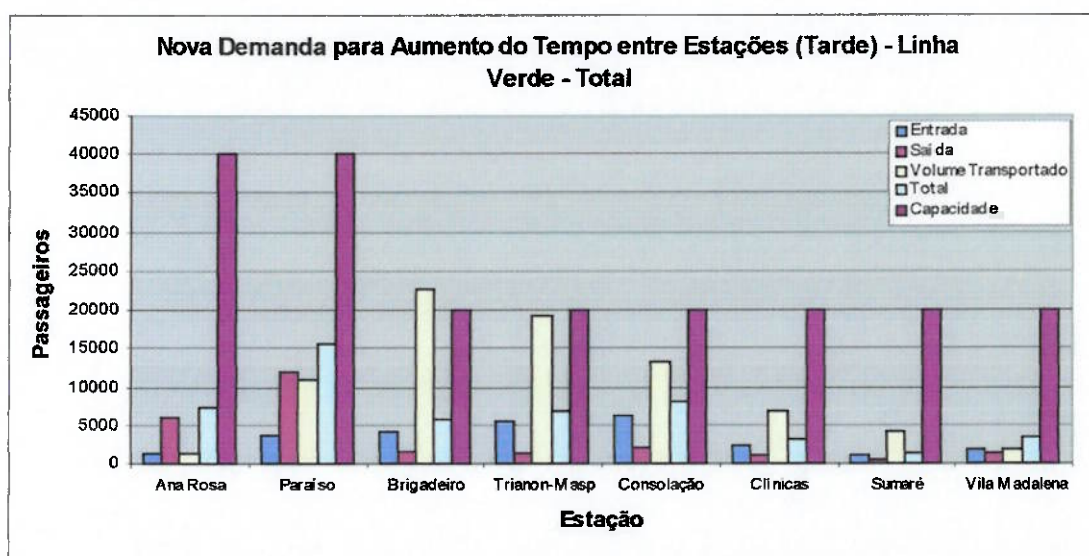


Figura 5.35 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Verde (Tarde)

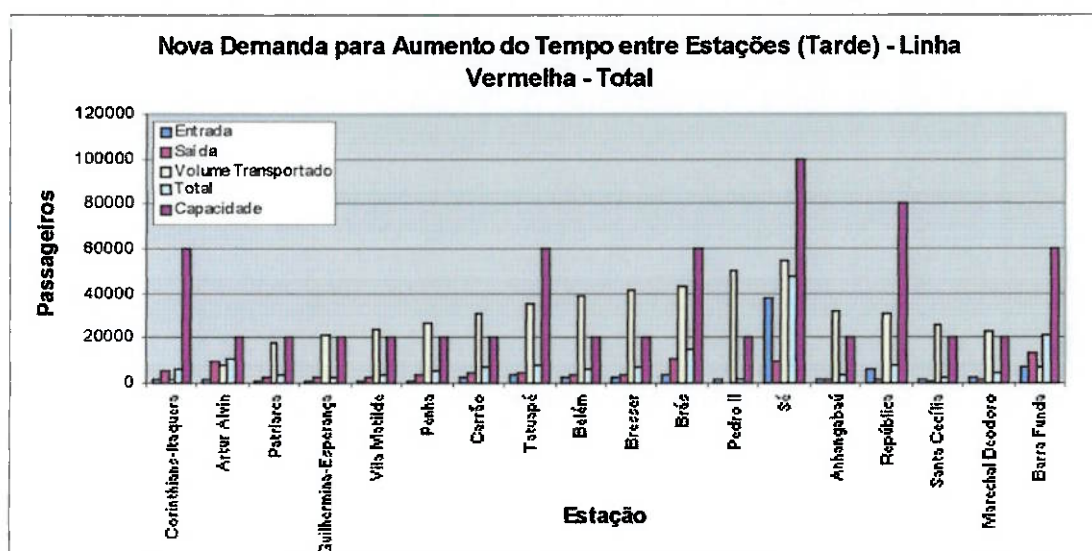


Figura 5.36 – Nova demanda total para aumento do tempo entre estações na Linha Vermelha (Tarde)

São apresentados ainda os resultados totais referentes a este aumento do tempo entre estações, para cada uma das linhas em estudo (Tabela 5-11, Tabela 5-12 e Tabela 5-13). Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao volume total de passageiros transportados nos trens, assim como o total de usuários que circulam nas

plataformas das estações de cada linha (embarques e desembarques), em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-11: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Azul (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Redução
<i>Jabaquara</i>	20000	3.544	2.562	-27,71%	12.478	8.522	-31,70%
<i>Conceição</i>	20000	16.959	11.756	-30,68%	7.422	5.028	-32,26%
<i>São Judas</i>	20000	21.510	14.691	-31,70%	4.213	3.034	-27,98%
<i>Saúde</i>	20000	25.426	17.443	-31,40%	5.682	3.963	-30,25%
<i>Praça da Árvore</i>	20000	30.266	20.780	-31,34%	4.935	3.434	-30,42%
<i>Santa Cruz</i>	20000	34.973	24.005	-31,36%	10.466	7.218	-31,03%
<i>Vila Mariana</i>	40000	39.350	26.819	-31,84%	8.490	5.714	-32,70%
<i>Ana Rosa</i>	40000	45.992	31.205	-32,15%	14.966	10.554	-29,48%
<i>Paraiso</i>	40000	58.189	39.466	-32,18%	26.702	17.811	-33,30%
<i>Vergueiro</i>	20000	62.791	42.286	-32,66%	5.712	3.837	-32,83%
<i>São Joaquim</i>	20000	63.328	42.573	-32,77%	8.327	7.042	-15,43%
<i>Liberdade</i>	20000	65.574	45.391	-30,78%	4.567	3.854	-15,61%
<i>Sé</i>	100000	39.924	28.578	-28,42%	62.702	43.034	-31,37%
<i>São Bento</i>	40000	47.118	33.114	-29,72%	15.397	10.514	-31,71%
<i>Luz</i>	40000	39.256	27.811	-29,15%	6.364	4.542	-28,63%
<i>Tiradentes</i>	20000	36.226	25.601	-29,33%	4.727	3.202	-32,26%
<i>Armênia</i>	20000	29.413	20.817	-29,23%	8.304	5.846	-29,60%
<i>Tietê</i>	20000	26.461	18.738	-29,19%	6.064	4.335	-28,51%
<i>Carandiru</i>	20000	24.350	17.123	-29,68%	3.346	2.407	-28,06%
<i>Santana</i>	20000	16.363	11.597	-29,13%	11.443	8.062	-29,55%
<i>Jardim São Paulo</i>	20000	11.689	8.255	-29,38%	1.748	1.211	-30,72%
<i>Parada Inglesa</i>	20000	9.869	6.998	-29,09%	1.866	1.344	-27,97%
<i>Tucuruvi</i>	30000	1.512	1.178	-22,09%	9.313	6.600	-29,13%
		Média		-30,04%	Média		-29,15%

Tabela 5-12: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Verde (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Redução
<i>Ana Rosa</i>	40000	2.009	1.386	-31,01%	10.791	7.351	-31,88%
<i>Paraiso</i>	40000	15.887	10.881	-31,51%	22.802	15.540	-31,85%
<i>Brigadeiro</i>	20000	33.124	22.550	-31,92%	8.139	5.739	-29,49%
<i>Trianon-Masp</i>	20000	28.131	19.159	-31,89%	9.827	6.764	-31,17%
<i>Consolação</i>	20000	19.638	13.309	-32,23%	12.011	8.172	-31,96%
<i>Clinicas</i>	20000	9.985	6.816	-31,74%	4.669	3.193	-31,61%
<i>Sumaré</i>	20000	6.241	4.209	-32,56%	1.956	1.364	-30,27%
<i>Vila Madalena</i>	20000	2.855	1.900	-33,45%	4.853	3.263	-32,76%
		Média		-32,04%	Média		-31,37%

Tabela 5-13: Dados comparativos totais para aumento do tempo entre estações da Linha Vermelha (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Redução
Corinthians-Itaquera	60000	2.124	1.350	-36,44%	10.707	6.550	-38,83%
Artur Alvin	20000	12.908	7.975	-38,22%	17.082	10.901	-36,18%
Patriarca	20000	28.403	17.897	-36,99%	5.366	3.556	-33,73%
Guilhermina-Esperança	20000	32.810	20.818	-36,55%	4.573	3.043	-33,46%
Vila Matilde	20000	37.206	23.755	-36,15%	5.404	3.660	-32,27%
Penha	20000	41.725	26.866	-35,61%	7.378	5.065	-31,35%
Carrão	20000	48.173	31.262	-35,10%	9.973	6.798	-31,84%
Tatuapé	60000	54.533	35.611	-34,70%	11.496	7.984	-30,55%
Belém	20000	59.854	39.185	-34,53%	8.950	6.326	-29,32%
Bresser	20000	63.583	41.702	-34,41%	9.774	6.928	-29,12%
Brás	60000	65.336	42.993	-34,20%	22.339	14.858	-33,49%
Pedro II	20000	77.039	50.371	-34,62%	2.940	2.082	-29,18%
Sé	100000	83.953	54.841	-34,68%	65.961	47.806	-27,52%
Anhangabaú	20000	53.126	31.678	-40,37%	12.297	3.458	-71,88%
República	80000	44.940	31.141	-30,71%	11.077	8.000	-27,78%
Santa Cecília	20000	37.787	25.882	-31,51%	4.003	2.899	-27,58%
Marechal Deodoro	20000	33.782	23.010	-31,89%	6.824	4.840	-29,07%
Barra Funda	60000	10.258	7.479	-27,09%	30.938	20.910	-32,41%
		Média		-34,65%	Média		-33,64%

Através destes gráficos e tabelas, é possível constatar que o aumento em 50% do tempo de percurso entre estações consecutivas no período da tarde também acarreta em uma redução considerável de passageiros transportados (30,0% na Linha Azul, 32,0% na Linha Verde e 34,7% na Linha Vermelha). Tal fato indica que grande volume de passageiros que, em condições normais de operação, eram transportados, permanece nas plataformas de embarque das estações. Outro fator que indica o aumento de usuários nas plataformas de embarque é a redução no número total de embarques e de desembarques,

representado pelo total de passageiros (29,2% na Linha Azul, 31,4% na Linha Verde e 33,7% na Linha Vermelha). Portanto, estes gráficos indicam que, nesta situação, o sistema passa a operar em piores condições se comparado com o sistema atualmente em vigor, acarretando em serviços inferiores de conforto aos usuários.

Devido ao tráfego de trens nas vias mostrar-se mais lento entre as estações, assim como para o período da manhã, em alguns casos, houve esperas de trens nas vias.

5.1.3. Caso 3: Redução do Tempo de Percurso entre Estações

Devido à crescente demanda de usuários nos períodos de pico, propõe-se o estudo da redução do tempo entre estações, pelo aumento da velocidade de trens. Uma redução de 20% no tempo entre estações foi simulado nos modelos em HPSim para os períodos de pico da manhã e da tarde, sendo os resultados apresentados abaixo:

- Período da Manhã:

Para o período da manhã, tem-se os novos gráficos de demanda de passageiros:

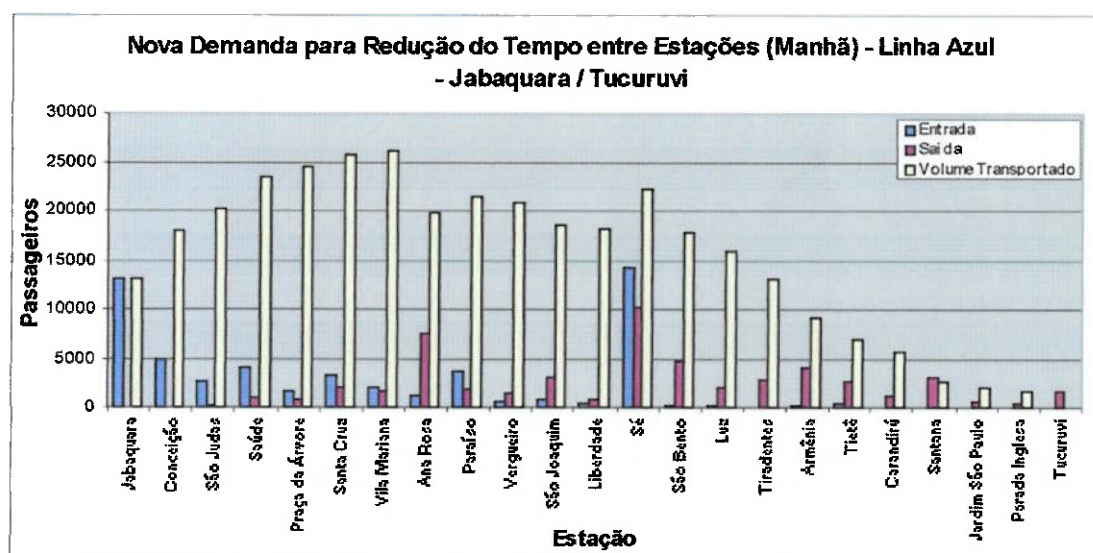


Figura 5.37 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Manhã)

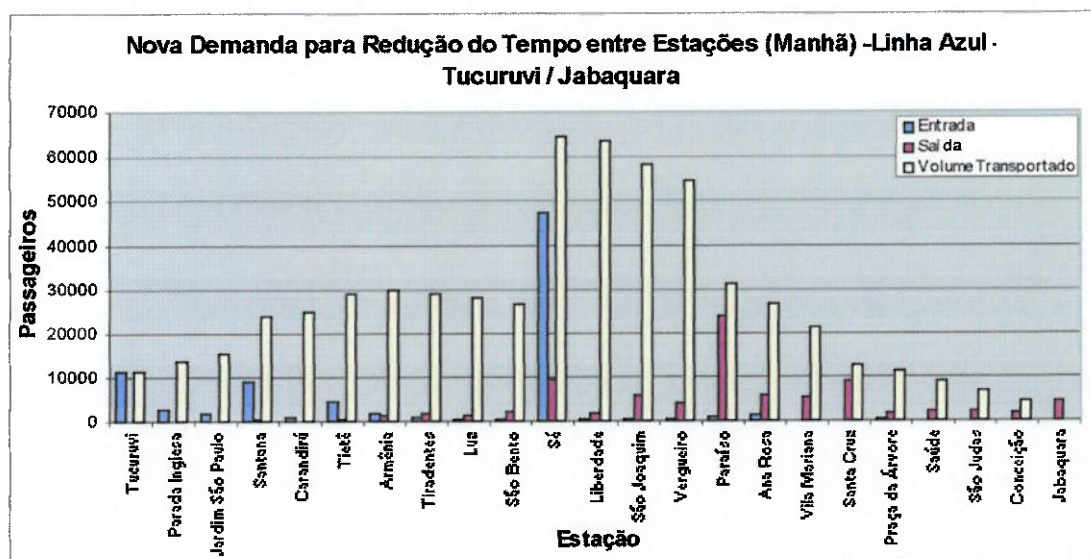


Figura 5.38 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Manhã)

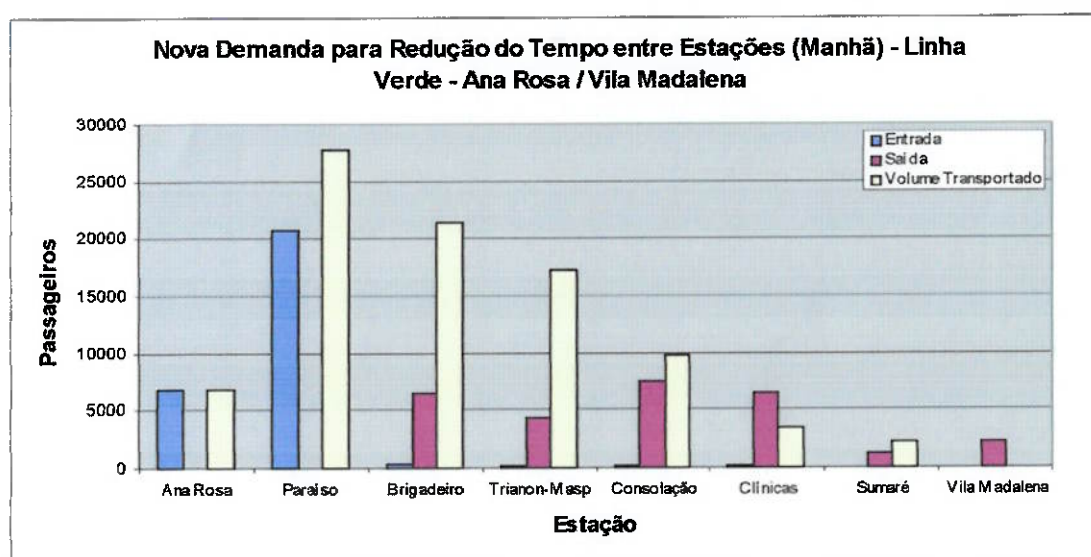


Figura 5.39 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Manhã)

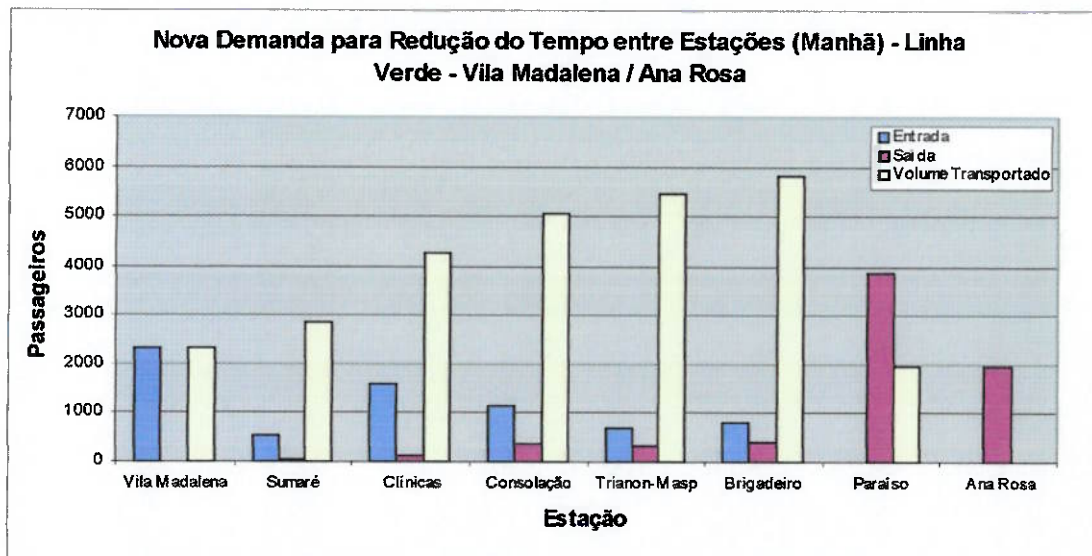


Figura 5.40 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Manhã)

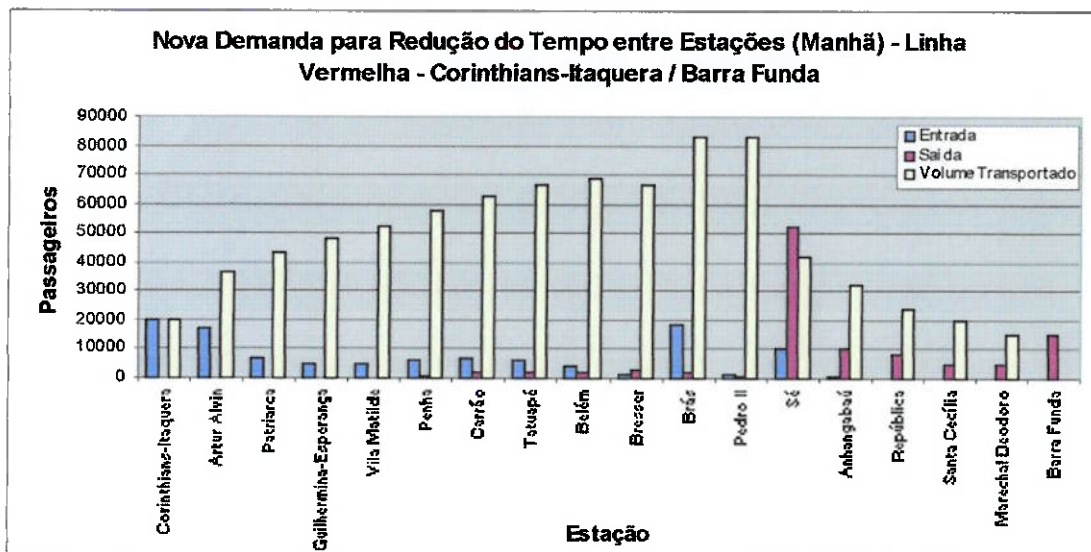


Figura 5.41 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Manhã)

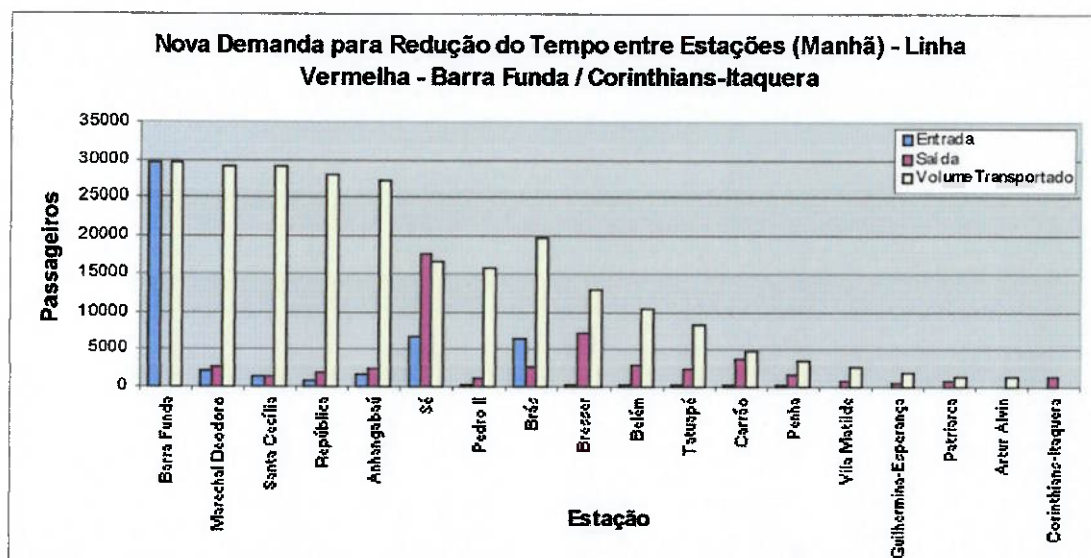


Figura 5.42 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Manhã)

Para uma análise geral, são apresentados os gráficos de demanda total por linha (Figura 5.43, Figura 5.44 e Figura 5.45), nos quais se encontram representados os totais de passageiros que circulam pelas estações e as capacidades das mesmas:

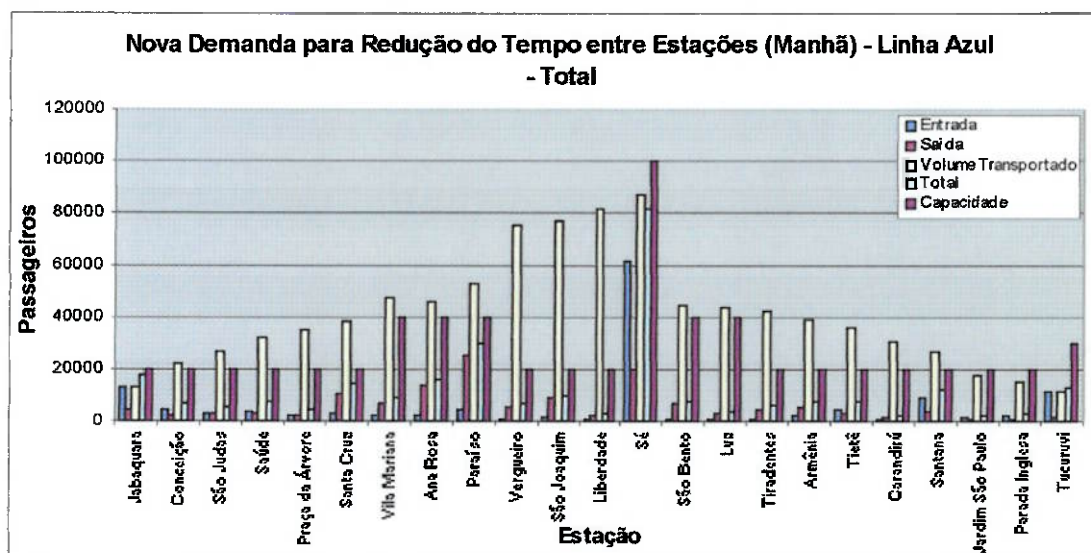


Figura 5.43 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Azul (Manhã)

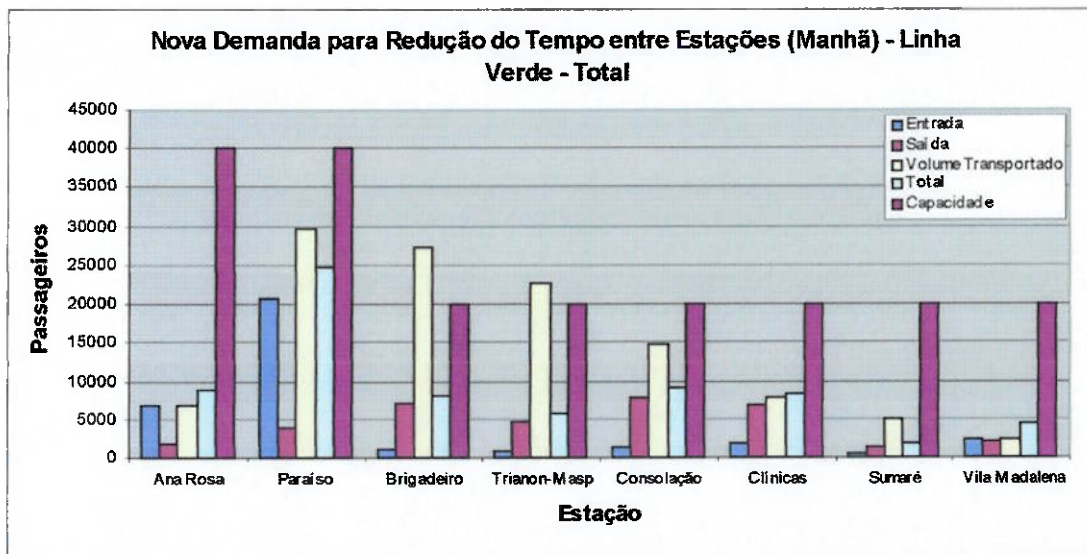


Figura 5.44 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Verde (Manhã)

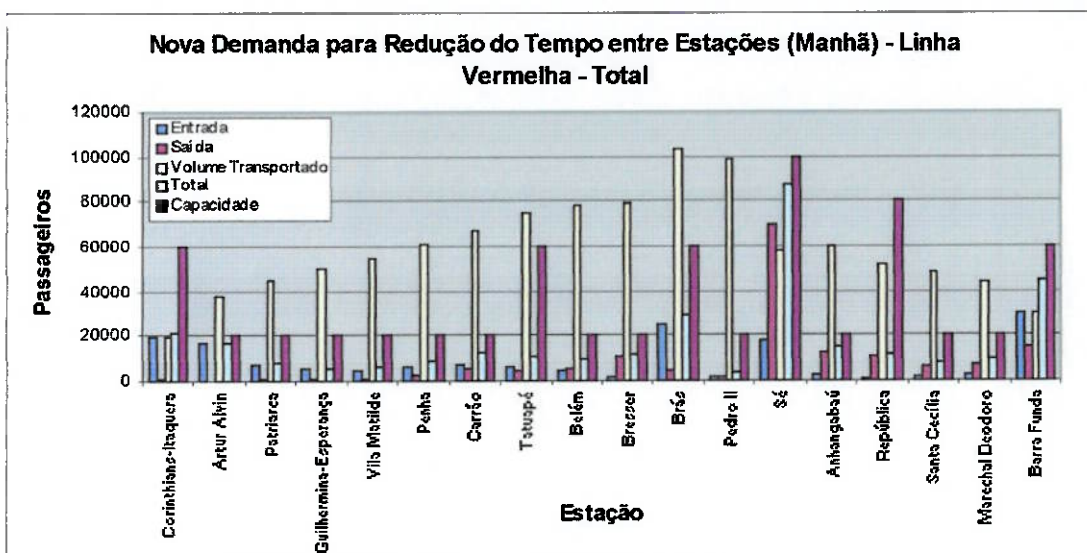


Figura 5.45 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Vermelha (Manhã)

São apresentados ainda os resultados totais referentes a esta redução do tempo entre estações, para cada uma das linhas em estudo (Tabela 5-14, Tabela 5-15 e Tabela 5-16). Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao volume total de passageiros transportados nos trens, assim como o total de usuários que circulam nas

plataformas das estações de cada linha (embarques e desembarques), em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-14: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Azul (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Aumento
<i>Jabaquara</i>	20000	10.512	13.032	23,97%	14.349	17.784	23,94%
<i>Conceição</i>	20000	18.272	22.680	24,12%	5.641	6.912	22,53%
<i>São Judas</i>	20000	21.712	26.892	23,86%	4.415	5.400	22,31%
<i>Saúde</i>	20000	26.251	32.411	23,47%	5.993	7.405	23,56%
<i>Praça da Árvore</i>	20000	29.029	35.674	22,89%	3.742	4.637	23,92%
<i>Santa Cruz</i>	20000	31.118	38.186	22,71%	11.567	14.331	23,90%
<i>Vila Mariana</i>	40000	38.435	47.435	23,42%	7.687	9.253	20,37%
<i>Ana Rosa</i>	40000	37.226	46.480	24,86%	13.745	16.199	17,85%
<i>Paraiso</i>	40000	42.447	52.853	24,52%	24.359	30.235	24,12%
<i>Vergueiro</i>	20000	60.144	75.133	24,92%	5.667	6.623	16,87%
<i>São Joaquim</i>	20000	61.709	76.739	24,36%	8.567	10.301	20,24%
<i>Liberdade</i>	20000	65.819	81.697	24,12%	2.535	3.034	19,68%
<i>Sé</i>	100000	70.849	86.854	22,59%	66.040	81.186	22,93%
<i>São Bento</i>	40000	36.825	44.528	20,92%	6.201	7.486	20,72%
<i>Luz</i>	40000	36.416	44.177	21,31%	3.435	4.184	21,80%
<i>Tiradentes</i>	20000	34.711	42.220	21,63%	4.947	5.961	20,50%
<i>Armênia</i>	20000	32.171	39.171	21,76%	6.193	7.505	21,19%
<i>Tietê</i>	20000	29.570	36.054	21,93%	6.430	7.922	23,20%
<i>Carandiru</i>	20000	25.236	30.675	21,55%	1.859	2.312	24,37%
<i>Santana</i>	20000	22.022	26.782	21,61%	10.484	12.590	20,09%
<i>Jardim São Paulo</i>	20000	14.230	17.518	23,11%	1.890	2.421	28,10%
<i>Parada Inglesa</i>	20000	12.537	15.399	22,83%	2.510	3.085	22,91%
<i>Tucuruvi</i>	30000	9.124	11.172	22,45%	10.478	12.844	22,58%
		Média		23,00%	Média		22,07%

Tabela 5-15: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Verde (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Aumento
<i>Ana Rosa</i>	40000	5.796	6.878	18,67%	7.334	8.815	20,19%
<i>Paraliso</i>	40000	23.993	29.635	23,52%	19.899	24.706	24,16%
<i>Brigadeiro</i>	20000	22.344	27.337	22,35%	6.440	8.075	25,39%
<i>Trianon-Masp</i>	20000	18.440	22.711	23,16%	4.769	5.595	17,32%
<i>Consolação</i>	20000	12.268	14.907	21,51%	7.316	9.153	25,11%
<i>Clinicas</i>	20000	6.209	7.743	24,71%	6.902	8.339	20,82%
<i>Sumaré</i>	20000	3.990	5.016	25,71%	1.470	1.843	25,37%
<i>Vila Madalena</i>	20000	1.851	2.337	26,26%	3.571	4.522	26,63%
		Média		23,23%	Média		23,12%

Tabela 5-16: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha (Manhã)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Aumento
Corinthians-Itaquera	60000	16.804	19.826	17,98%	17.813	21.068	18,27%
Artur Alvin	20000	32.132	37.950	18,11%	15.936	17.105	7,33%
Patriarca	20000	39.051	44.567	14,12%	6.369	7.664	20,33%
Guilhermina-Esperança	20000	43.470	49.887	14,76%	4.732	5.704	20,53%
Vila Matilde	20000	47.782	54.984	15,07%	4.869	5.737	17,82%
Penha	20000	53.046	61.286	15,53%	7.258	8.740	20,40%
Carrão	20000	57.999	67.220	15,90%	10.437	12.568	20,41%
Tatuapé	60000	64.264	74.820	16,43%	9.014	10.816	19,98%
Belém	20000	67.604	78.776	16,52%	8.025	9.660	20,36%
Bresser	20000	68.278	79.466	16,39%	9.408	11.693	24,29%
Brás	60000	87.165	102.865	18,01%	23.858	29.202	22,40%
Pedro II	20000	83.994	99.185	18,08%	2.986	3.588	20,13%
Sé	100000	50.387	58.344	15,79%	71.179	87.189	22,49%
Anhangabaú	20000	50.614	59.826	18,20%	12.382	14.805	19,56%
República	80000	44.106	52.341	18,67%	9.979	11.722	17,46%
Santa Cecília	20000	41.231	48.845	18,47%	6.214	7.544	21,40%
Marechal Deodoro	20000	37.565	44.433	18,28%	8.006	9.656	20,61%
Barra Funda	60000	25.104	29.745	18,49%	37.981	44.939	18,32%
		Média		16,93%	Média		19,56%

Através destes gráficos e tabelas, é possível constatar que a redução em 20% do tempo de percurso entre estações consecutivas no período da manhã acarreta em um aumento considerável de passageiros transportados (23,0% na Linha Azul, 23,2% na Linha Verde e 16,9% na Linha Vermelha). Tal fato indica que grande volume de passageiros adicionais, se comparado a condições normais de operação, são transportados. Outro fator que indica este aumento de usuários atendidos pelo sistema é a elevação no número total de embarques e de desembarques, representada pelo total de

passageiros (22,1% na Linha Azul, 23,1% na Linha Verde e 19,6% na Linha Vermelha). Portanto, estes gráficos indicam que, nesta situação, o sistema passa a operar em melhores condições se comparado com o sistema atualmente em vigor, reduzindo o total de passageiros nas plataformas de embarque das estações. Apesar do tráfego de trens nas vias mostrar-se mais eficaz entre as estações, mas o modelo ainda apresenta, em alguns casos, esperas de trens nas vias.

- Período da Tarde:

Para o período da tarde, tem-se os novos gráficos de demanda de passageiros:

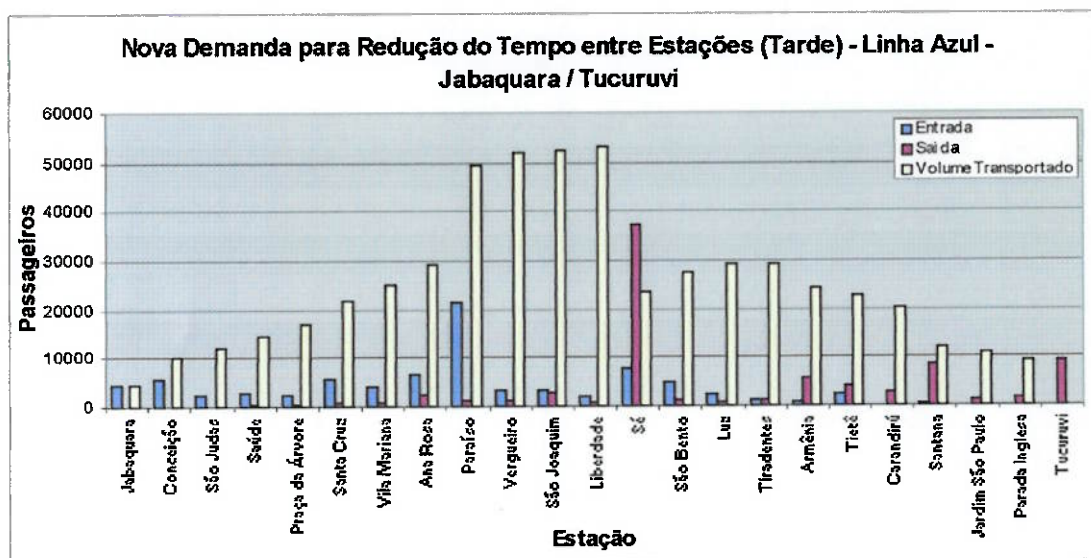


Figura 5.46 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Jabaquara / Tucuruvi (Tarde)

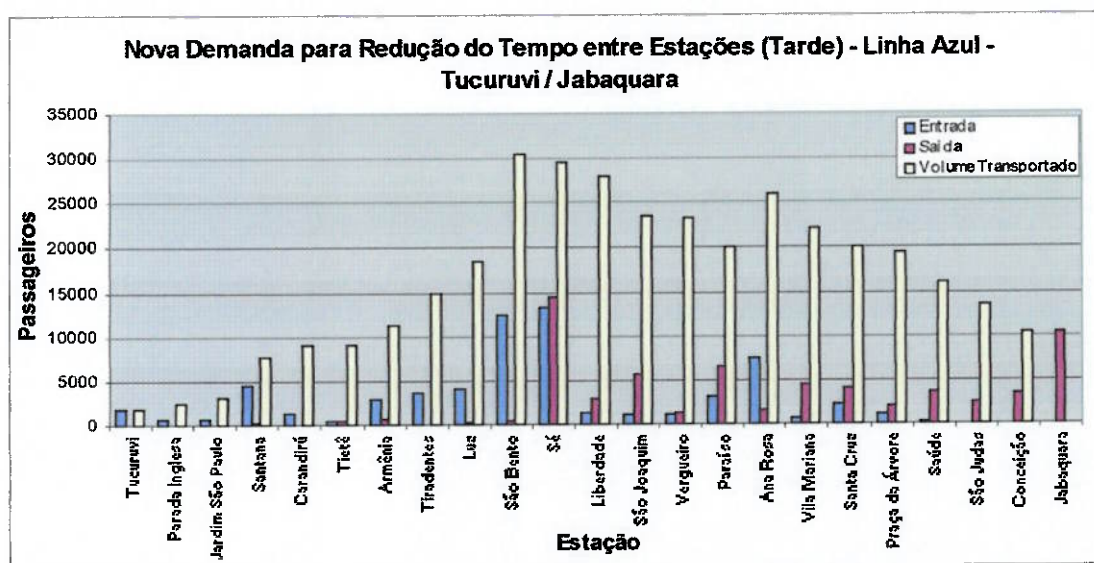


Figura 5.47 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Azul sentido Tucuruvi / Jabaquara (Tarde)

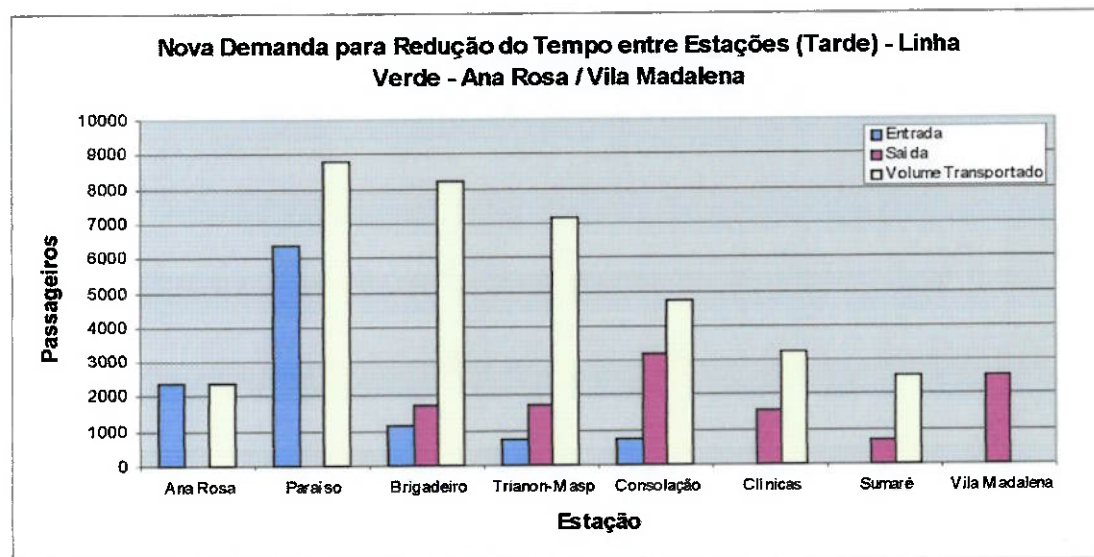


Figura 5.48 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Ana Rosa / Vila Madalena (Tarde)

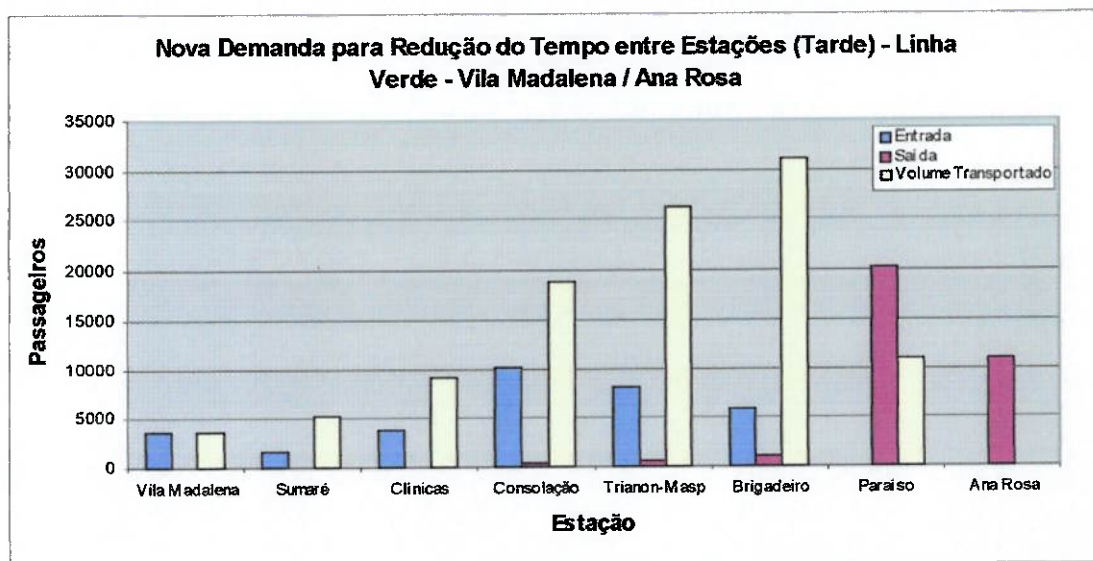


Figura 5.49 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Verde sentido Vila Madalena / Ana Rosa (Tarde)

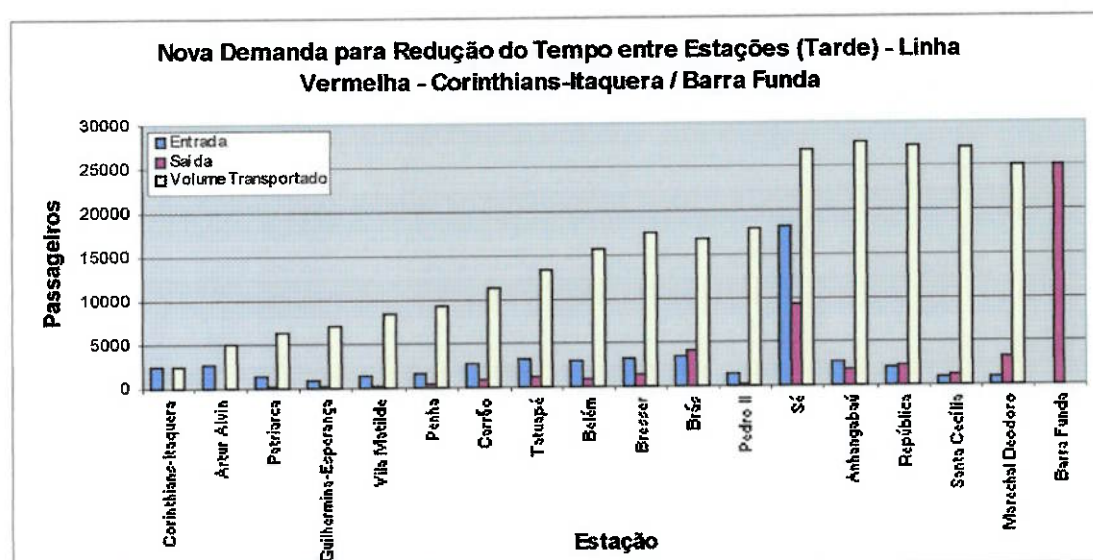


Figura 5.50 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Corinthians-Itaquera / Barra Funda (Tarde)

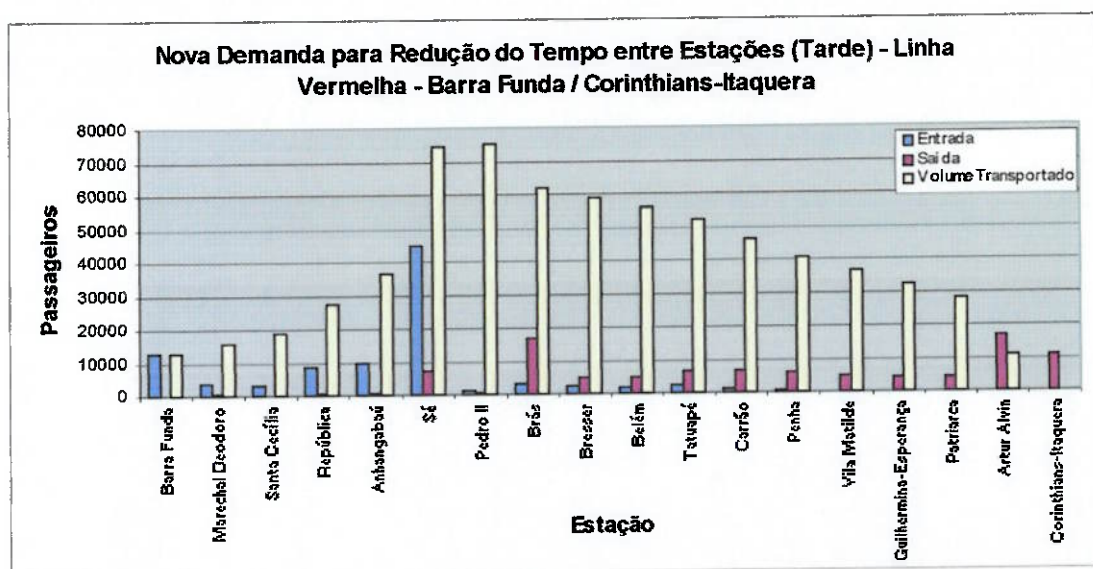


Figura 5.51 – Nova demanda para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha sentido Barra Funda / Corinthians-Itaquera (Tarde)

Para uma análise geral, são apresentados os gráficos de demanda total por linha (Figura 5.52, Figura 5.53 e Figura 5.54), nos quais se encontram representados os totais de passageiros que circulam pelas estações e as capacidades das mesmas:

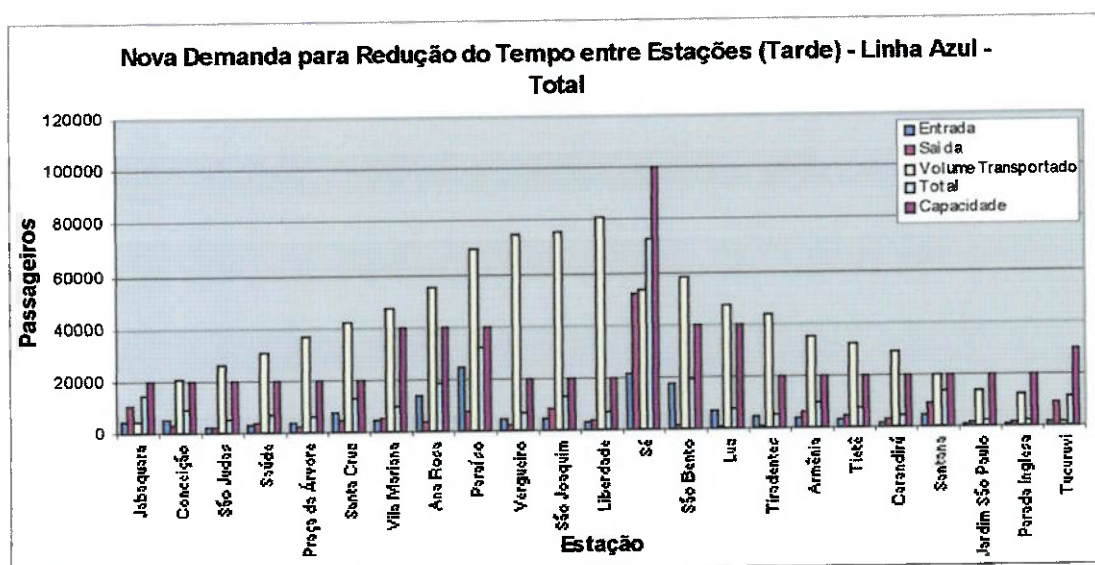


Figura 5.52 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Azul (Tarde)

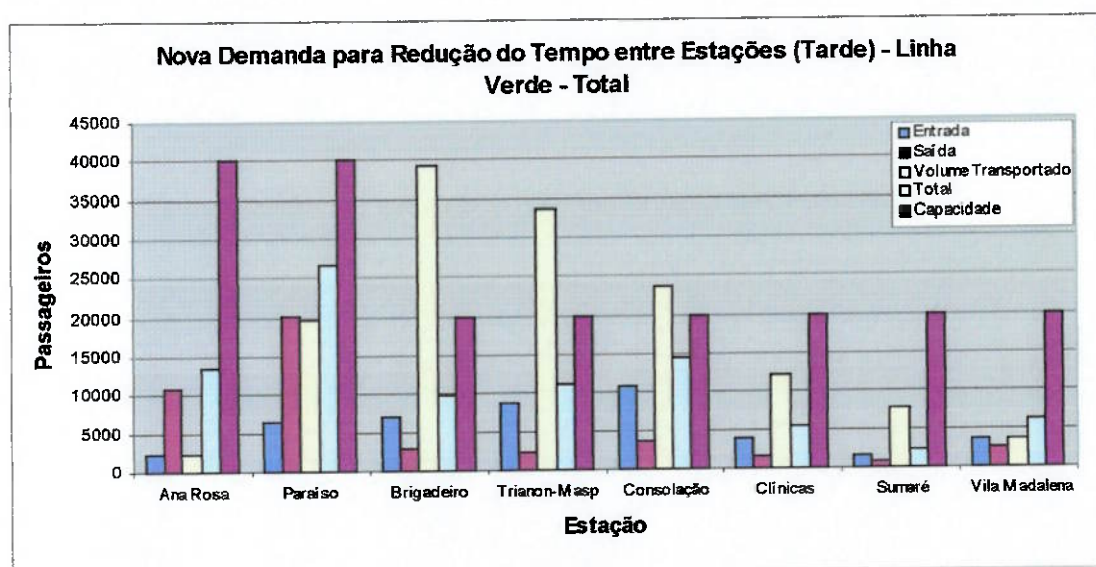


Figura 5.53 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Verde (Tarde)

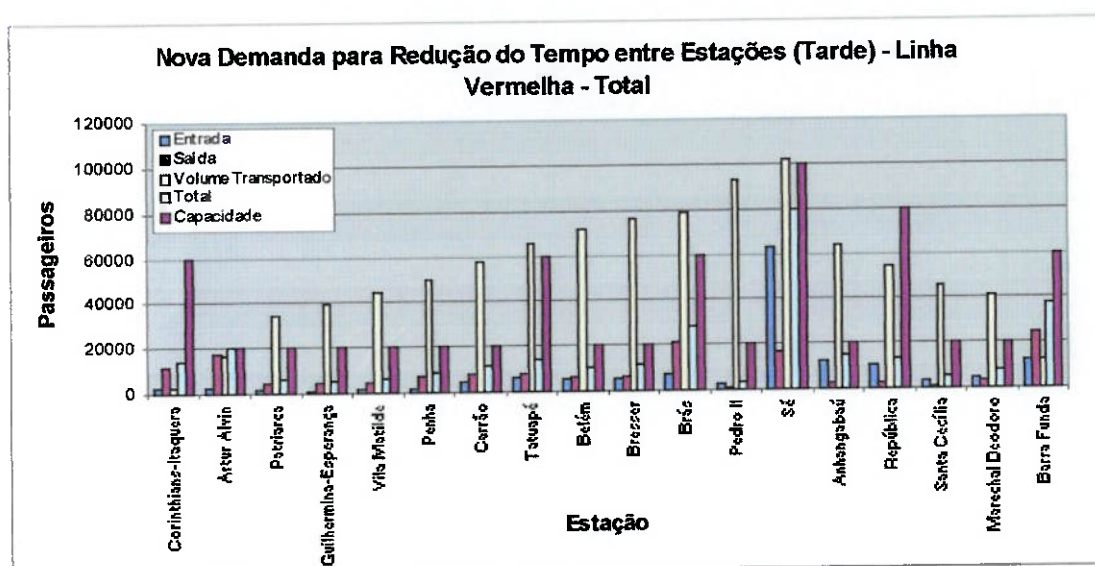


Figura 5.54 – Nova demanda total para redução do tempo entre estações na Linha Vermelha (Tarde)

São apresentados ainda os resultados totais referentes a esta redução do tempo entre estações, para cada uma das linhas em estudo (Tabela 5-17, Tabela 5-18 e Tabela 5-19). Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao volume total de passageiros transportados nos trens, assim como o total de usuários que circulam nas

plataformas das estações de cada linha (embarques e desembarques), em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-17: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Azul (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Aumento
Jabaquara	20000	3.544	4.392	23,76%	14.349	12.478	18,44%
Conceição	20000	16.959	20.323	19,75%	5.641	7.422	22,72%
São Judas	20000	21.510	25.867	20,55%	4.415	4.213	23,05%
Saúde	20000	25.426	30.609	20,86%	5.993	5.682	22,46%
Praça da Árvore	20000	30.266	36.438	21,09%	3.742	4.935	23,75%
Santa Cruz	20000	34.973	42.120	20,94%	11.567	10.466	21,94%
Vila Mariana	40000	39.350	47.388	20,93%	7.687	8.490	19,34%
Ana Rosa	40000	45.992	55.296	21,07%	13.745	14.966	20,03%
Paraiso	40000	58.189	69.657	20,44%	24.359	26.702	20,92%
Vergueiro	20000	62.791	75.046	20,06%	5.667	5.712	24,37%
São Joaquim	20000	63.328	75.744	20,13%	8.567	8.327	53,02%
Liberdade	20000	65.574	81.220	24,32%	2.535	4.567	57,98%
Sé	100000	39.924	53.293	34,10%	66.040	62.702	16,40%
São Bento	40000	47.118	57.976	22,64%	6.201	15.397	25,00%
Luz	40000	39.256	47.632	20,85%	3.435	6.364	20,84%
Tiradentes	20000	36.226	43.906	20,92%	4.947	4.727	21,26%
Armênia	20000	29.413	35.510	20,82%	6.193	8.304	21,09%
Tietê	20000	26.461	31.966	20,88%	6.430	6.064	21,37%
Carandiru	20000	24.350	29.218	20,04%	1.859	3.346	27,82%
Santana	20000	16.363	19.612	19,96%	10.484	11.443	19,67%
Jardim São Paulo	20000	11.689	14.068	20,29%	1.890	1.748	20,54%
Parada Inglesa	20000	9.869	11.883	20,42%	2.510	1.866	24,06%
Tucuruvi	30000	1.512	1.862	22,69%	10.478	9.313	20,26%
		Média		21,63%	Média		24,62%

Tabela 5-18: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Verde (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Aumento
<i>Ana Rosa</i>	40000	2.009	2.394	18,82%	10.791	13.358	23,79%
<i>Paraiso</i>	40000	15.887	19.738	24,10%	22.802	26.638	16,82%
<i>Brigadeiro</i>	20000	33.124	39.407	18,94%	8.139	9.861	21,16%
<i>Trianon-Masp</i>	20000	28.131	33.498	19,06%	9.827	11.183	13,80%
<i>Consolação</i>	20000	19.638	23.647	20,42%	12.011	14.474	20,51%
<i>Clinicas</i>	20000	9.985	12.276	22,99%	4.669	5.479	17,35%
<i>Sumaré</i>	20000	6.241	7.773	24,74%	1.956	2.356	20,45%
<i>Vila Madalena</i>	20000	2.855	3.610	26,62%	4.853	6.139	26,50%
		Média		21,96%	Média		20,05%

Tabela 5-19: Dados comparativos totais para redução do tempo entre estações da Linha Vermelha (Tarde)

	Capacidade	Volume Transportado			Total		
		Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Aumento
Corinthians-Itaquera	60000	2.124	2.484	17,80%	10.707	13.604	27,06%
Artur Alvin	20000	12.908	16.226	25,71%	17.082	19.917	16,60%
Patriarca	20000	28.403	34.349	20,87%	5.366	6.247	16,42%
Guilhermina-Esperança	20000	32.810	39.446	20,19%	4.573	5.428	18,70%
Vila Matilde	20000	37.206	44.663	19,95%	5.404	6.315	16,86%
Penha	20000	41.725	50.045	19,81%	7.378	8.786	19,08%
Carrão	20000	48.173	57.681	19,64%	9.973	11.822	18,54%
Tatuapé	60000	54.533	65.271	19,56%	11.496	13.658	18,81%
Belém	20000	59.854	71.597	19,38%	8.950	10.696	19,51%
Bresser	20000	63.583	76.259	19,70%	9.774	11.711	19,82%
Brás	60000	65.336	78.433	19,78%	22.339	27.717	24,07%
Pedro II	20000	77.039	93.279	20,84%	2.940	3.542	20,48%
Sé	100000	83.953	101.409	20,87%	65.961	79.832	21,03%
Anhangabaú	20000	53.126	64.232	21,05%	12.297	14.917	21,31%
República	80000	44.940	54.350	21,02%	11.077	13.294	20,01%
Santa Cecília	20000	37.787	45.702	21,02%	4.003	4.830	20,66%
Marechal Deodoro	20000	33.782	40.826	20,88%	6.824	8.234	20,66%
Barra Funda	60000	10.258	12.465	21,60%	30.938	37.376	20,81%
		Média		20,54%	Média		20,02%

Através destes gráficos e tabelas, é possível constatar que a redução em 20% do tempo de percurso entre estações consecutivas no período da tarde também acarreta em um aumento considerável de passageiros transportados (21,6% na Linha Azul, 22,0% na Linha Verde e 20,5% na Linha Vermelha). Tal fato indica que grande volume de passageiros adicionais, se comparado a condições normais de operação, são transportados. Outro fator que indica este aumento de usuários atendidos pelo sistema é a elevação no número total de embarques e de desembarques, representada pelo total de

passageiros (24,6% na Linha Azul, 20,1% na Linha Verde e 20,0% na Linha Vermelha). Portanto, estes gráficos indicam que, nesta situação, o sistema passa a operar em melhores condições se comparado com o sistema atualmente em vigor, reduzindo o total de passageiros nas plataformas de embarque das estações. Apesar do tráfego de trens nas vias mostrar-se mais eficaz entre as estações, assim como para o período da manhã, o modelo ainda apresenta, em alguns casos, esperas de trens nas vias.

5.2. Análise com Modelos em ProModel

5.2.1. Caso 1: Aumento da Capacidade dos Trens

O propósito desta simulação é verificar a influência do aumento da capacidade dos trens em circulação. Este aumento acarreta em um maior número de passageiros transportados por trem. Atualmente, esta mudança pode ser observada nos trens da Linha Verde, nos quais o número de assentos foi diminuído, aumentando-se o espaço interno para passageiros em pé.

Assim, a capacidade dos trens foi aumentada em 20%, obtendo-se a seguinte configuração:

- Capacidade Máxima do Trem: 2160 passageiros;
- Tempo entre duas estações consecutivas:
 - Linha Azul: 108 segundos;
 - Linha Verde: 158 segundos;
 - Linha Vermelha: 101 segundos;
- Tempo de parada dos trens nas estações: 20 segundos;

Simulando-se o sistema, obteve-se os seguintes resultados:

- O modelo foi simulado por um período de 73 minutos;

- O número de trens que passou por uma estação, durante a simulação, foi, em média:
 - Linha Azul → 28 trens/hora
 - Linha Verde → 20 trens/hora
 - Linha Vermelha → 29 trens/hora
- Simulando-se o modelo em ProModel com os dados anteriores, obtém-se os resultados da Figura 5.55, Figura 5.56 e Figura 5.57 para as Linhas Azul, Vermelha e Verde respectivamente. Estes gráficos apresentam a entrada e saída de passageiros de cada estação, durante o período de simulação, bem como o volume de passageiros transportados nas estações, o total de passageiros que entrou ou saiu, e a capacidade máxima de cada estação;

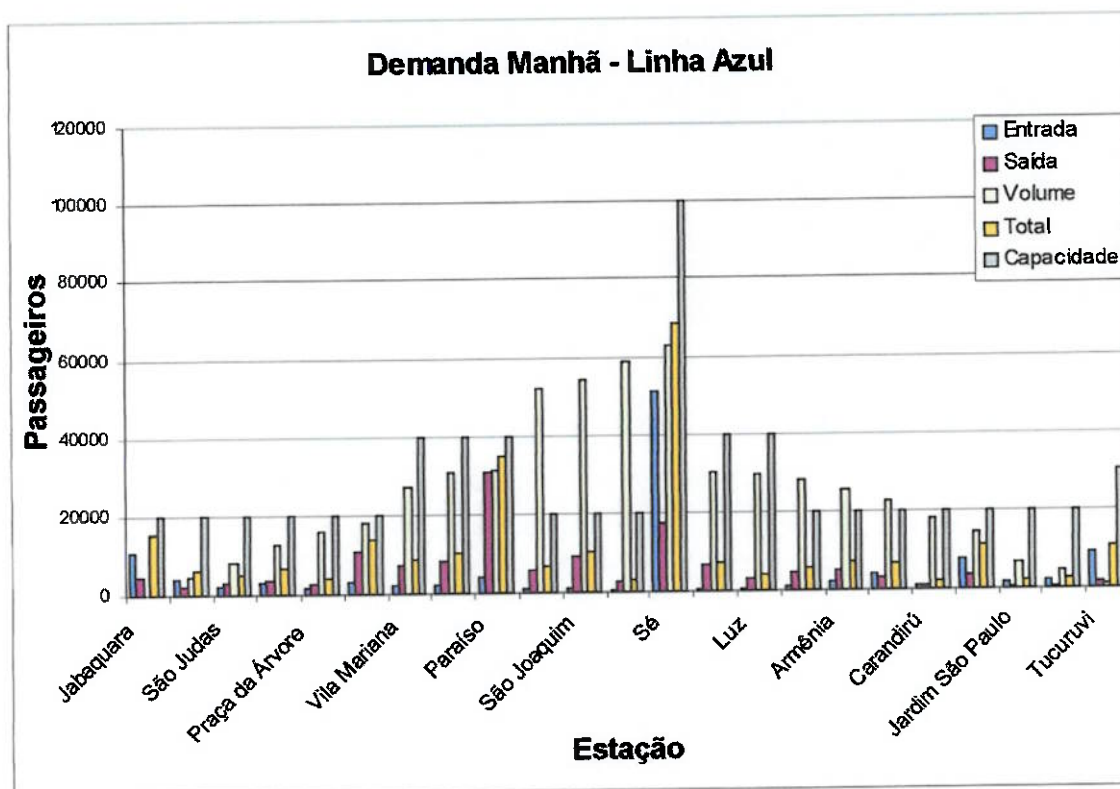


Figura 5.55 – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Azul

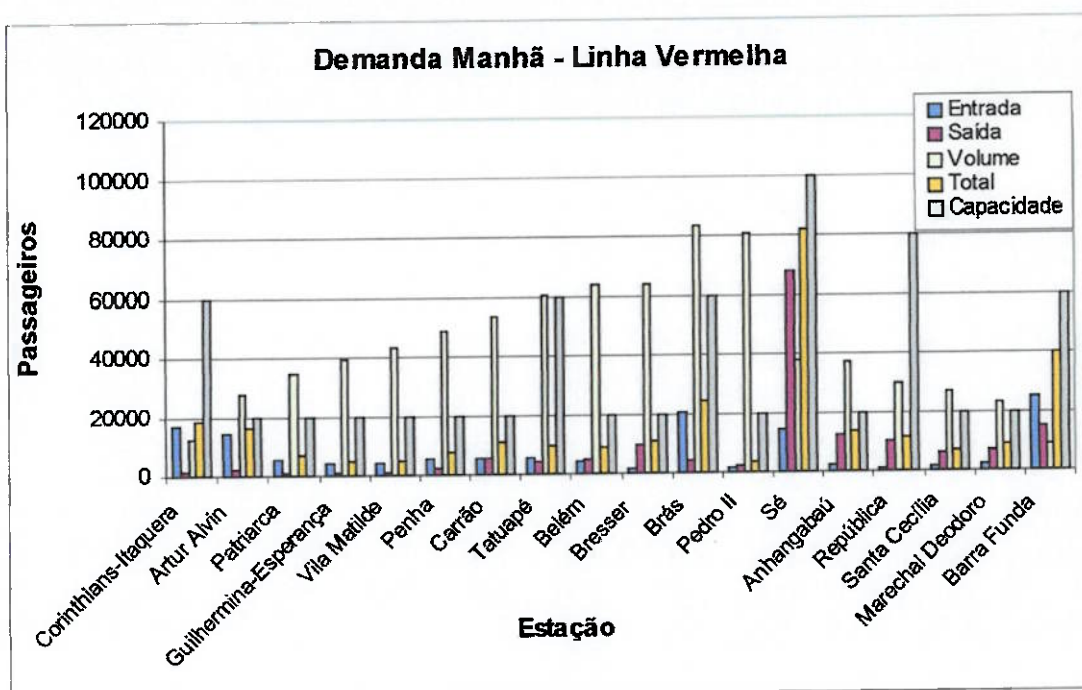


Figura 5.56 – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Vermelha

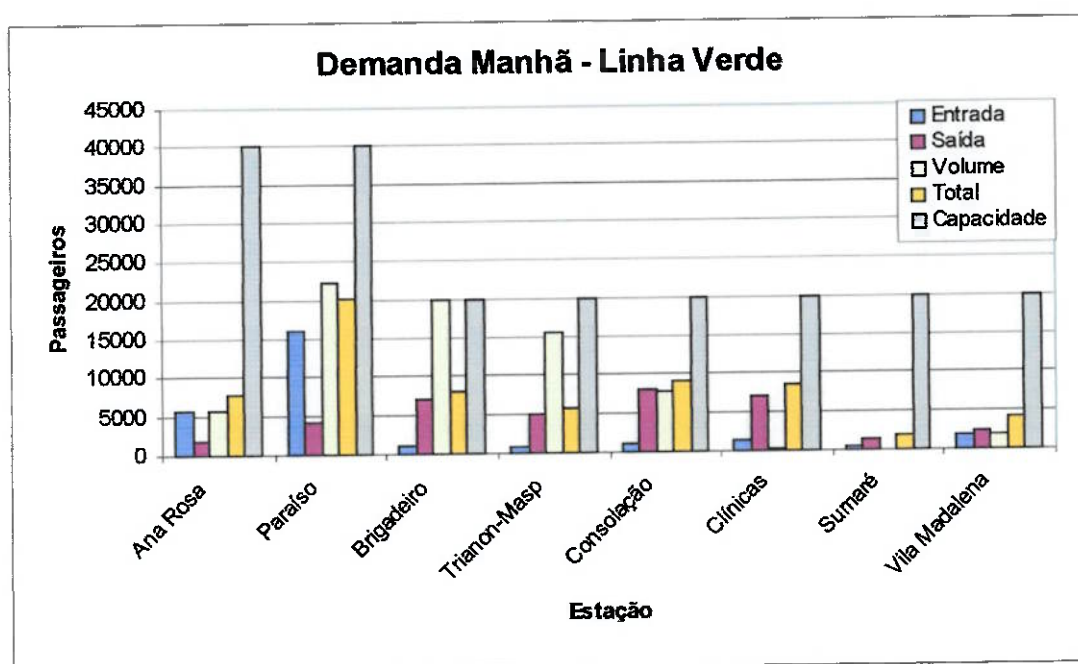


Figura 5.57 – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Verde

A partir destes gráficos, pode-se verificar que o total de passageiros nas estações diminuiu de maneira considerável. A Tabela 5-20, Tabela 5-21 e Tabela 5-22 ilustra as diferenças médias do resultado do aumento da capacidade dos trens, em relação à sua operação normal, para a Linha Azul, Linha Vermelha e Linha Verde respectivamente. Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao total se desembarques nas estações, assim como o volume total de passageiros transportados nos trens, em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-20: Aumento da Capacidade - Linha Azul

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Redução
Jabaquara	3.837	4.604	20%	10.512	1.250	-88%
Conceição	1.645	2.043	24%	18.272	4.390	-76%
São Judas	2.259	2.812	24%	21.712	8.147	-62%
Saúde	2.685	3.361	25%	26.251	12.965	-51%
Praça da Árvore	1.958	2.454	25%	29.029	16.042	-45%
Santa Cruz	8.703	10.724	23%	31.118	18.119	-42%
Vila Mariana	5.851	7.021	20%	38.435	26.851	-30%
Ana Rosa	6.743	8.116	20%	41.851	30.814	-26%
Paraíso	25.410	30.708	21%	42.447	31.037	-27%
Vergueiro	4.783	5.603	17%	60.144	52.316	-13%
São Joaquim	7.383	8.956	21%	61.709	53.900	-13%
Liberdade	1.943	2.359	21%	65.819	58.904	-11%
Sé	15.843	17.357	10%	70.849	63.045	-11%
São Bento	5.537	6.564	19%	36.825	29.973	-19%
Luz	2.831	3.316	17%	36.416	29.739	-18%
Tiradentes	3.987	4.668	17%	34.711	27.988	-19%
Armênia	4.365	5.114	17%	32.171	25.281	-21%
Tietê	2.474	2.899	17%	29.570	22.535	-24%
Carandirú	1.051	1.261	20%	25.236	18.086	-28%
Santana	2.840	3.429	21%	22.022	14.377	-35%
Jardim São Paulo	490	572	17%	14.230	6.582	-54%
Parada Inglesa	394	463	18%	12.537	4.838	-61%
Tucuruvi	1.354	1.625	20%	9.124	1.165	-87%
	Média		20%	Média		-37%

Tabela 5-21: Aumento da Capacidade - Linha Vermelha

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Redução
Corinthians-Itaquera	982	1.179	20%	20.459	12.138	-41%
Artur Alvin	1.511	1.813	20%	35.764	27.627	-23%
Patriarca	729	875	20%	42.647	34.777	-18%
Guilhermina-Esperança	656	788	20%	47.036	39.261	-17%
Vila Matilde	831	997	20%	51.322	43.634	-15%
Penha	1.854	2.225	20%	56.562	48.908	-14%
Carrão	4.547	5.456	20%	61.491	53.770	-13%
Tatuapé	3.606	4.327	20%	67.595	60.142	-11%
Belém	4.166	5.000	20%	70.827	63.397	-10%
Bresser	8.036	9.643	20%	71.378	63.930	-10%
Brás	3.488	4.186	20%	90.112	83.520	-7%
Pedro II	1.621	1.946	20%	86.851	80.513	-7%
Sé	56.543	67.852	20%	52.661	38.104	-28%
Anhangabaú	9.978	11.974	20%	50.788	37.310	-27%
República	8.564	10.277	20%	44.605	30.112	-32%
Santa Cecília	4.878	5.854	20%	41.789	26.860	-36%
Marechal Deodoro	5.906	7.087	20%	38.195	22.736	-40%
Barra Funda	12.539	15.047	20%	26.015	8.480	-67%
	Média		20%	Média		-23%

Tabela 5-22: Aumento da Capacidade - Linha Verde

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 1	Aumento	Atual	Caso 1	Redução
Ana Rosa	1.595	1.914	20%	5.757	5.757	0%
Paraiso	3.346	4.016	20%	23.127	22.206	-4%
Brigadeiro	5.844	7.013	20%	21.367	20.040	-6%
Trianon-Masp	4.013	4.816	20%	17.463	15.465	-11%
Consolação	6.660	7.992	20%	10.895	7.693	-29%
Clínicas	5.912	7.094	20%	4.474	179	-96%
Sumaré	1.092	1.310	20%	2.188	2.010	-8%
Vila Madalena	1.835	2.202	20%	1.851	1.851	0%
	Média		20%	Média		-19%

Pode-se observar que:

- A saída de passageiros das estações aumentou, em média, de 20%;
- O Volume de passageiros transportados nas estações das linhas Azul e Verde diminuiu, em média, de 42%;

- O Volume de passageiros transportados nas estações da linha Vermelha diminuiu, em média, de 23%.

Os gráficos, a seguir, apresentam o total de passageiros, em média, nos trens em circulação, em algumas estações do Metrô.

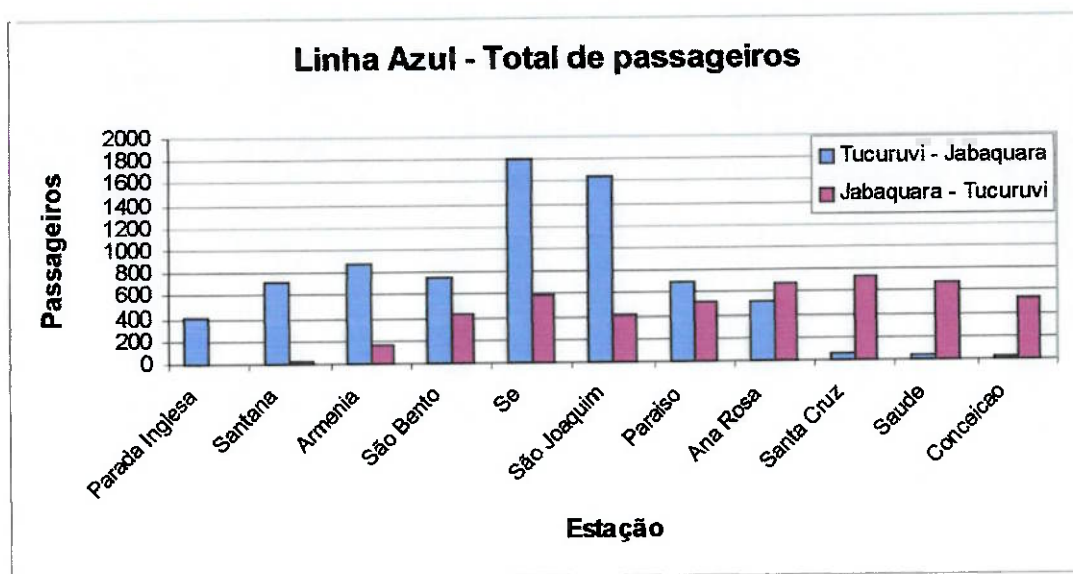


Figura 5.58 – Total de passageiros – Aumento da Capacidade dos trens –Linha Azul

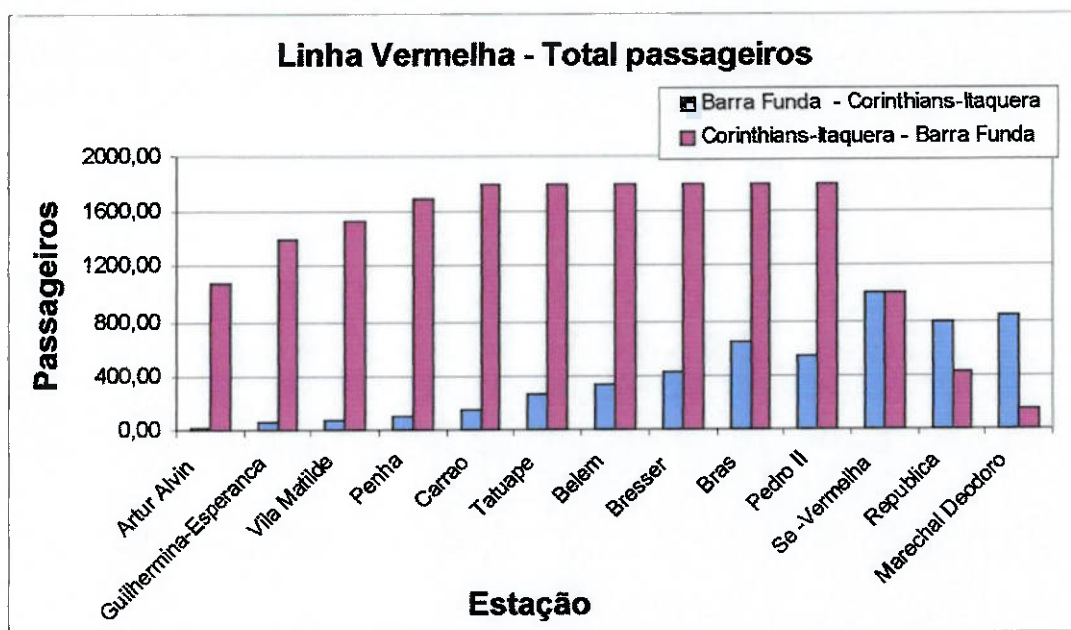


Figura 5.59 – Total de passageiros – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Vermelha

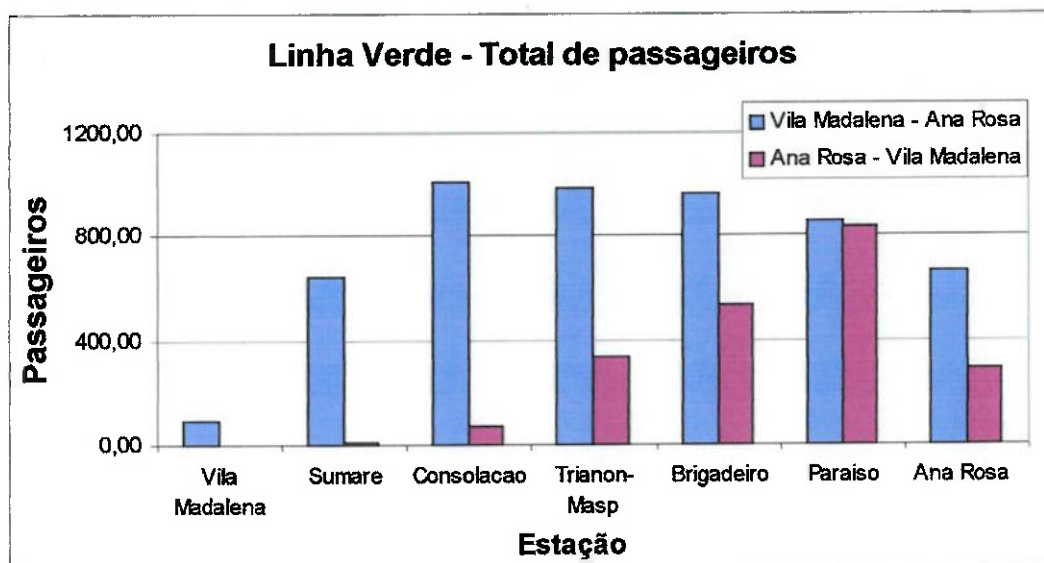


Figura 5.60 – Total de passageiro – Aumento da Capacidade dos Trens – Linha Verde

A Tabela 5-23 ilustra a diminuição média de passageiros nos trens em circulação, nas três linhas do Metrô, sendo que:

- Linha Azul:
 - Sentido 1: Tucuruvi – Jabaquara

- Sentido 2: Jabaquara – Tucuruvi
- Linha Verde:
 - Sentido 1: Vila Madalena – Ana Rosa
 - Sentido 2: Ana Rosa – Vila Madalena
- Linha Vermelha:
 - Sentido 1: Barra Funda – Corinthians-Itaquera
 - Sentido 2: Corinthians-Itaquera – Barra Funda

Tabela 5-23: Resultado do aumento da capacidade dos trens

	Sentido 1	Sentido 2
<i>Linha Azul</i>	-30%	-35%
<i>Linha Verde</i>	-23%	-58%
<i>Linha Vermelha</i>	-51%	-12%

Analisando-se esta tabela, pode-se observar que:

- Linha Azul:
 - Nos dois sentidos, a quantidade de passageiros nos trens em circulação apresentou uma boa diminuição, sendo em média 32%;
- Linha Verde:
 - O sentido 1 apresentou uma diminuição de 23% na quantidade de passageiros nos trens em circulação;
 - O sentido 2 apresentou uma diminuição de 58% na quantidade de passageiros nos trens em circulação;
 - A diminuição do intervalo de tempo entre estações é sentido com uma maior intensidade pelos passageiros que utilizam os trens do sentido Ana Rosa – Vila Madalena.
- Linha Vermelha:

- No sentido 1, a quantidade de passageiros nos trens em circulação diminuiu em 51%;
- No sentido 2, a quantidade de passageiros nos trens em circulação diminuiu em 12%;
- A diminuição do intervalo de tempo entre estações é sentido com uma maior intensidade pelos passageiros que utilizam os trens do sentido Barra Funda – Corinthians-Itaquera.

Portanto, o aumento da capacidade dos trens acarreta no aumento do número de passageiros transportados nos trens em circulação, sendo que, com esta configuração, apenas em algumas estações da Linha Vermelha, no sentido Corinthians-Itaquera – Barra Funda, os trens circulam perto de sua capacidade máxima de passageiros.

5.2.2. Caso 2: Aumento de Tempo de Percurso entre Estações

O propósito desta simulação é verificar a influência do aumento do tempo entre duas estações consecutivas do Metrô. Em uma situação real, isto pode ocorrer quando acontece alguma falha no sistema metroviário, causando um maior intervalo entre trens, ou mesmo durante uma situação de chuva, quando os trens trafegam com uma velocidade reduzida.

Assim, o tempo entre duas estações consecutivas foi aumentado em 50%, obtendo-se a seguinte configuração:

- Capacidade Máxima do Trem: 1800 passageiros;
- Tempo entre duas estações consecutivas:
 - Linha Azul: 162 segundos;
 - Linha Verde: 237 segundos;
 - Linha Vermelha: 152 segundos;
- Tempo de parada dos trens nas estações: 20 segundos;
- Chegada de passageiros/hora inalterada;

Simulando-se o sistema, obteve-se os seguintes resultados:

- O modelo foi simulado por um período de 71 minutos;
- O número de trens que passou por uma estação, durante a simulação, foi, em média:
 - Linha Azul → 20 trens/hora
 - Linha Verde → 14 trens/hora
 - Linha Vermelha → 21 trens/hora
- Simulando-se o modelo em ProModel com os dados anteriores, obtém-se o resultado da Figura 5.61, Figura 5.62 e Figura 5.63 para a Linhas Azul, Vermelha e Verde respectivamente. Estes gráficos apresentam a entrada e saída de passageiros de cada estação, durante o período de simulação, bem como o volume de passageiros transportados nas estações, o total de passageiros que entrou ou saiu, e a capacidade máxima de cada estação;

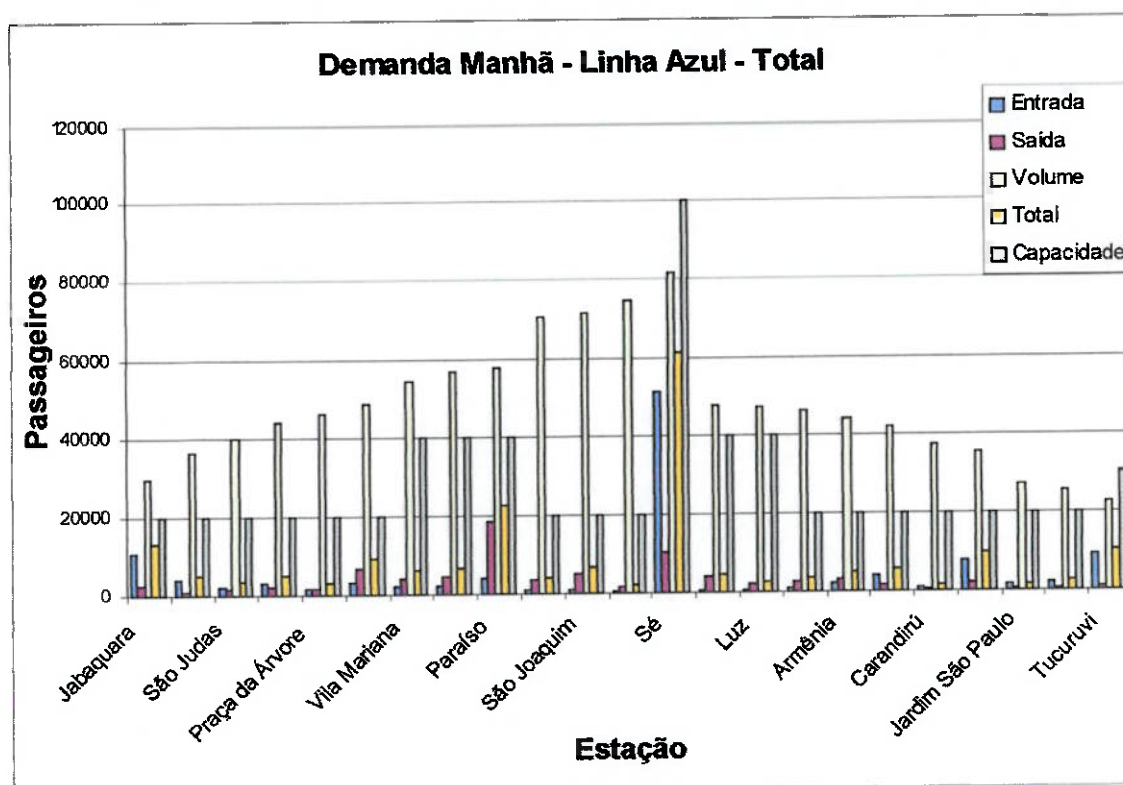


Figura 5.61 – Aumento do tempo entre estações – Linha Azul

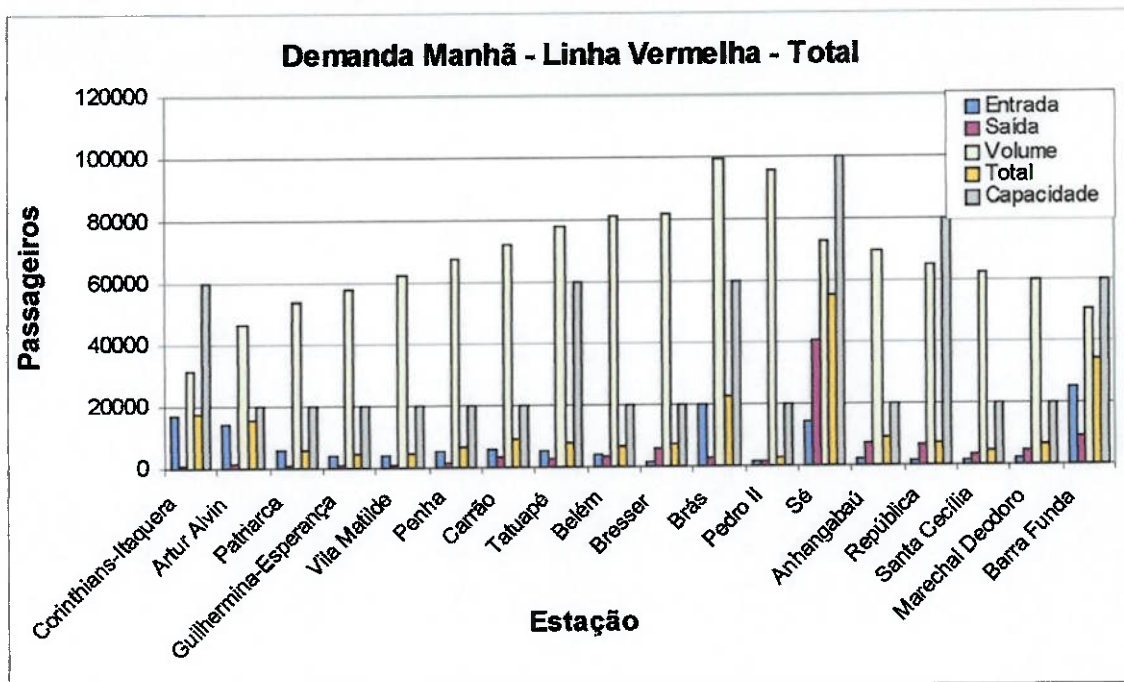


Figura 5.62 – Aumento do tempo entre estações – Linha Vermelha

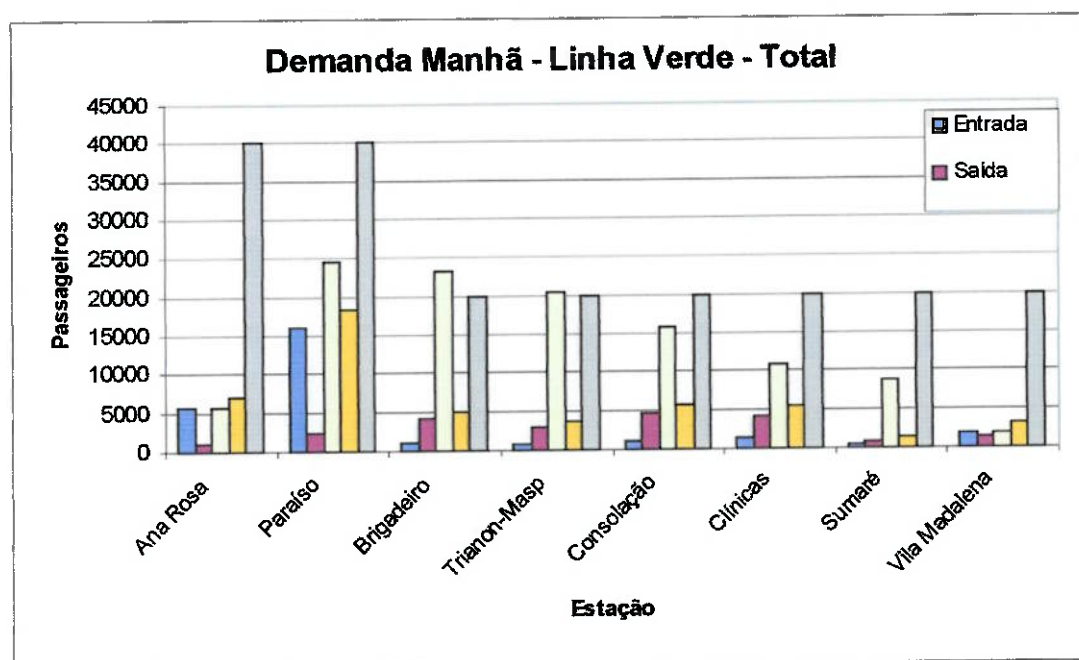


Figura 5.63 – Aumento do tempo entre estações – Linha Verde

A partir destes gráficos, pode-se verificar que o total de passageiros nas estações aumentou consideravelmente. A Tabela 5-24, Tabela 5-25 e Tabela 5-26 ilustra as diferenças médias do resultado do aumento do intervalo de tempo entre as estações, em relação aos resultados obtidos simulando-se o sistema em sua operação normal, para a Linha Azul, Linha Vermelha e Linha Verde respectivamente. Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao total se desembarques nas estações, assim como o volume total de passageiros transportados nos trens, em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-24: Aumento do Tempo – Linha Azul

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Aumento
<i>Jabaquara</i>	3.837	2.741	-29%	10.512	29.832	184%
<i>Conceição</i>	1.645	1.216	-26%	18.272	36.505	100%
<i>São Judas</i>	2.259	1.674	-26%	21.712	39.582	82%
<i>Saúde</i>	2.685	2.001	-25%	26.251	43.764	67%
<i>Praça da Árvore</i>	1.958	1.461	-25%	29.029	46.173	59%
<i>Santa Cruz</i>	8.703	6.383	-27%	31.118	48.390	56%
<i>Vila Mariana</i>	5.851	4.179	-29%	38.435	54.252	41%
<i>Ana Rosa</i>	6.743	4.831	-28%	41.851	56.920	36%
<i>Paraíso</i>	25.410	18.279	-28%	42.447	57.879	36%
<i>Vergueiro</i>	4.783	3.335	-30%	60.144	70.396	17%
<i>São Joaquim</i>	7.383	5.331	-28%	61.709	71.461	16%
<i>Liberdade</i>	1.943	1.404	-28%	65.819	74.346	13%
<i>Sé</i>	15.843	10.332	-35%	70.849	81.908	16%
<i>São Bento</i>	5.537	3.907	-29%	36.825	47.271	28%
<i>Luz</i>	2.831	1.974	-30%	36.416	46.999	29%
<i>Tiradentes</i>	3.987	2.779	-30%	34.711	45.808	32%
<i>Armênia</i>	4.365	3.044	-30%	32.171	43.886	36%
<i>Tietê</i>	2.474	1.725	-30%	29.570	41.657	41%
<i>Carandirú</i>	1.051	751	-29%	25.236	37.512	49%
<i>Santana</i>	2.840	2.041	-28%	22.022	35.003	59%
<i>Jardim São Paulo</i>	490	340	-31%	14.230	27.296	92%
<i>Parada Inglesa</i>	394	275	-30%	12.537	25.705	105%
<i>Tucuruvi</i>	1.354	967	-29%	9.124	22.669	148%
	Média		-29%	Média		58%

Tabela 5-25: Aumento do Tempo – Linha Vermelha

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Aumento
<i>Corinthians-Itaquera</i>	982	711	-28%	20.459	31.963	56%
<i>Artur Alvin</i>	1.511	1.094	-28%	35.764	47.014	31%
<i>Patriarca</i>	729	528	-28%	42.647	53.529	26%
<i>Guilhermina-Esperança</i>	656	475	-28%	47.036	57.787	23%
<i>Vila Matilde</i>	831	602	-28%	51.322	61.953	21%
<i>Penha</i>	1.854	1.343	-28%	56.562	67.147	19%
<i>Carrão</i>	4.547	3.293	-28%	61.491	72.167	17%
<i>Tatuapé</i>	3.606	2.611	-28%	67.595	77.902	15%
<i>Belém</i>	4.166	3.017	-28%	70.827	81.103	15%
<i>Bresser</i>	8.036	5.819	-28%	71.378	81.679	14%
<i>Brás</i>	3.488	2.526	-28%	90.112	99.232	10%
<i>Pedro II</i>	1.621	1.174	-28%	86.851	95.619	10%
<i>Sé</i>	56.543	40.945	-28%	52.661	72.851	38%
<i>Anhangabaú</i>	9.978	7.226	-28%	50.788	69.462	37%
<i>República</i>	8.564	6.201	-28%	44.605	64.681	45%
<i>Santa Cecília</i>	4.878	3.532	-28%	41.789	62.465	49%
<i>Marechal Deodoro</i>	5.906	4.276	-28%	38.195	59.601	56%
<i>Barra Funda</i>	12.539	9.080	-28%	26.015	50.285	93%
	Média		-28%	Média		32%

Tabela 5-26: Aumento do Tempo – Linha Verde

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 2	Redução	Atual	Caso 2	Aumento
<i>Ana Rosa</i>	1.595	1.116	-30%	5.757	5.757	0%
<i>Paraíso</i>	3.346	2.343	-30%	23.127	24.464	6%
<i>Brigadeiro</i>	5.844	4.091	-30%	21.367	23.356	9%
<i>Trianon-Masp</i>	4.013	2.809	-30%	17.463	20.460	17%
<i>Consolação</i>	6.660	4.662	-30%	10.895	15.698	44%
<i>Clinicas</i>	5.912	4.138	-30%	4.474	10.915	144%
<i>Sumaré</i>	1.092	764	-30%	2.188	8.912	307%
<i>Vila Madalena</i>	1.835	1.284	-30%	1.851	1.851	0%
	Média		-30%	Média		66%

Pode-se observar que:

- A saída de passageiros das estações diminuiu, em média, de 30%;
- O Volume de passageiros que passou pelas estações das linhas Azul e Verde aumentou, em média, de 60%;

- O Volume de passageiros que passou pelas estações da linha Vermelha aumentou, em média, de 32%;

Os gráficos a seguir apresentam o total de passageiros, em média, nos trens em circulação, em algumas estações do Metrô.

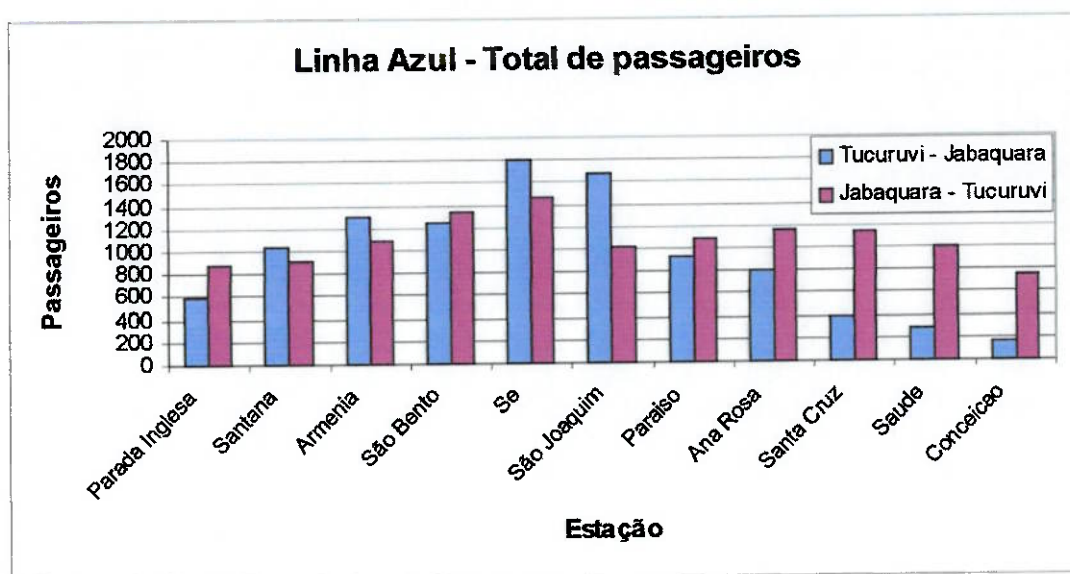


Figura 5.64 – Total de passageiros – Aumento do intervalo entre trens –Linha Azul

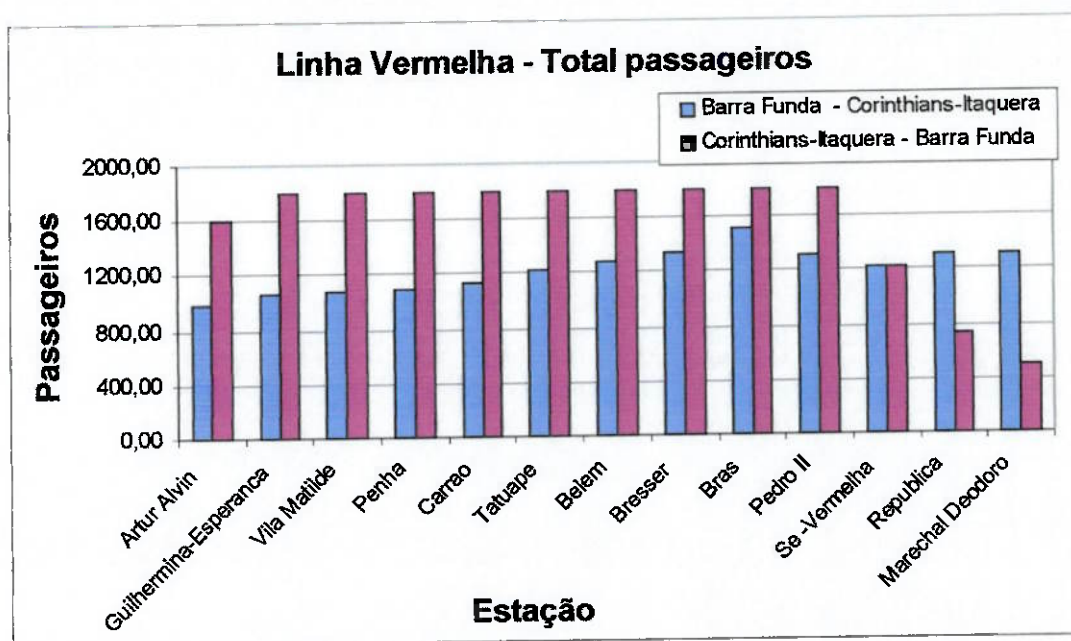


Figura 5.65 – Total de passageiros – Aumento do intervalo entre trens – Linha Vermelha

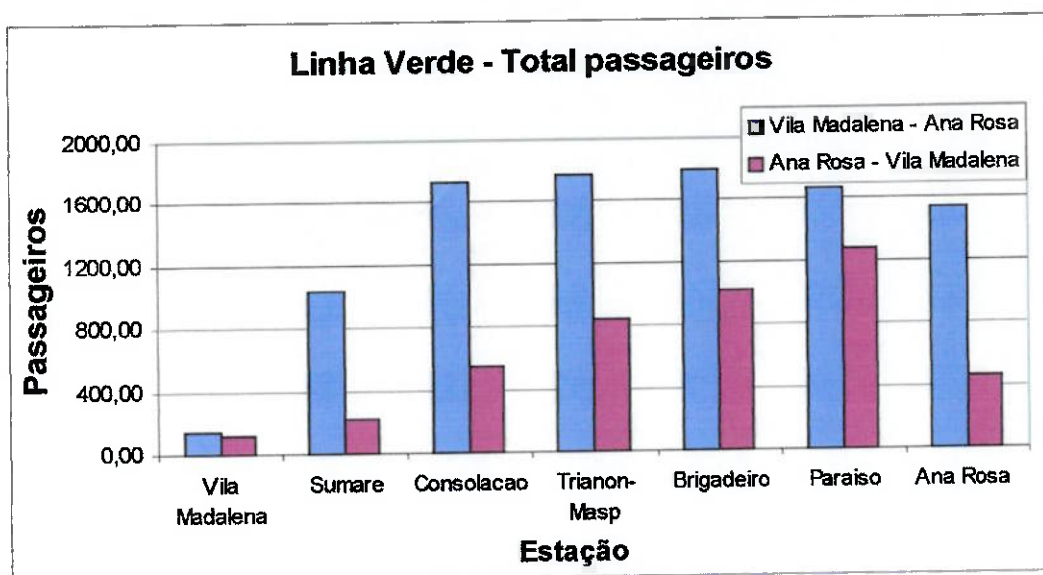


Figura 5.66 – Total de passageiro – Aumento do intervalo entre trens – Linha Verde

A Tabela 5-27 ilustra o aumento médio de passageiros nos trens em circulação, nas três linhas do Metrô, sendo que:

- Linha Azul:
 - Sentido 1: Tucuruvi – Jabaquara
 - Sentido 2: Jabaquara – Tucuruvi
- Linha Verde:
 - Sentido 1: Vila Madalena – Ana Rosa
 - Sentido 2: Ana Rosa – Vila Madalena
- Linha Vermelha:
 - Sentido 1: Barra Funda – Corinthians-Itaquera
 - Sentido 2: Corinthians-Itaquera – Barra Funda

Tabela 5-27: Resultado do aumento do intervalo de tempo entre estações, nos trens

	Sentido 1	Sentido 2
<i>Linha Azul</i>	19%	119%
<i>Linha Verde</i>	39%	40%
<i>Linha Vermelha</i>	94%	5%

Analisando-se esta tabela, pode-se observar que:

- Linha Azul:
 - O sentido 1 apresentou um aumento de 19% na quantidade de passageiros nos trens em circulação;
 - O sentido 2 apresentou um aumento de 119% na quantidade de passageiros nos trens em circulação;
 - O aumento do intervalo de tempo entre estações é sentido com muito mais intensidade pelos passageiros que utilizam os trens do sentido Jabaquara – Tucuruvi.
- Linha Verde:

- Nos dois sentidos desta linha, o aumento da quantidade de passageiros nos trens em circulação foi, aproximadamente, de 40%, sendo que, após este aumento no número de passageiros, a capacidade máxima dos trens foi atingida no sentido 1;
- Linha Vermelha:
 - No sentido 1, a quantidade de passageiros nos trens em circulação quase dobrou, aumentando em 94%;
 - No sentido 2, a quantidade de passageiros nos trens em circulação aumentou apenas 5%. Isto ocorre, pois, em operação normal, os trens deste sentido já circulam com sua capacidade máxima;

Portanto, o aumento do intervalo entre os trens acarreta no aumento do número de passageiros nos trens em circulação. Este problema é intensificado no sentido 1 da linha Verde, e no sentido 2 da linha Vermelha, visto que os trens passam a operar com sua capacidade máxima.

Quando os trens passam a operar com sua capacidade máxima, a chegada de novos passageiros na estação gera filas na entrada de passageiros, aumentando o número de passageiros na estação.

5.2.3. Caso 3: Redução do Tempo de Percurso entre Estações

O propósito desta simulação é verificar a influência da diminuição do intervalo de tempo entre duas estações consecutivas do Metrô. Esta diminuição acarreta em um menor intervalo de tempo de chegada de trens nas estações. Em uma situação real, isto pode ocorrer quando se aumenta o número de trens em circulação na malha metroviária, ou quando se aumenta a velocidade de operação dos trens.

Assim, o tempo entre duas estações consecutivas foi diminuído em 20%, obtendo-se a seguinte configuração:

- Capacidade Máxima do Trem: 1800 passageiros;
- Tempo entre duas estações consecutivas:

- Linha Azul: 87 segundos;
- Linha Verde: 126 segundos;
- Linha Vermelha: 81 segundos;
- Tempo de parada dos trens nas estações: 20 segundos;

Simulando-se o sistema, obteve-se os seguintes resultados:

- O modelo foi simulado por um período de 83 minutos;
- O número de trens que passou por uma estação, durante a simulação, foi, em média:
 - Linha Azul → 33 trens/hora
 - Linha Verde → 24 trens/hora
 - Linha Vermelha → 34 trens/hora
- Simulando-se o modelo em ProModel com os dados anteriores, obtém-se os resultados da Figura 5.67, Figura 5.68 e Figura 5.69 para as Linhas Azul, Vermelha e Verde respectivamente. Estes gráficos apresentam a entrada e saída de passageiros de cada estação, durante o período de simulação, bem como o volume de passageiros transportados nas estações, o total de passageiros que entrou ou saiu, e a capacidade máxima de cada estação;

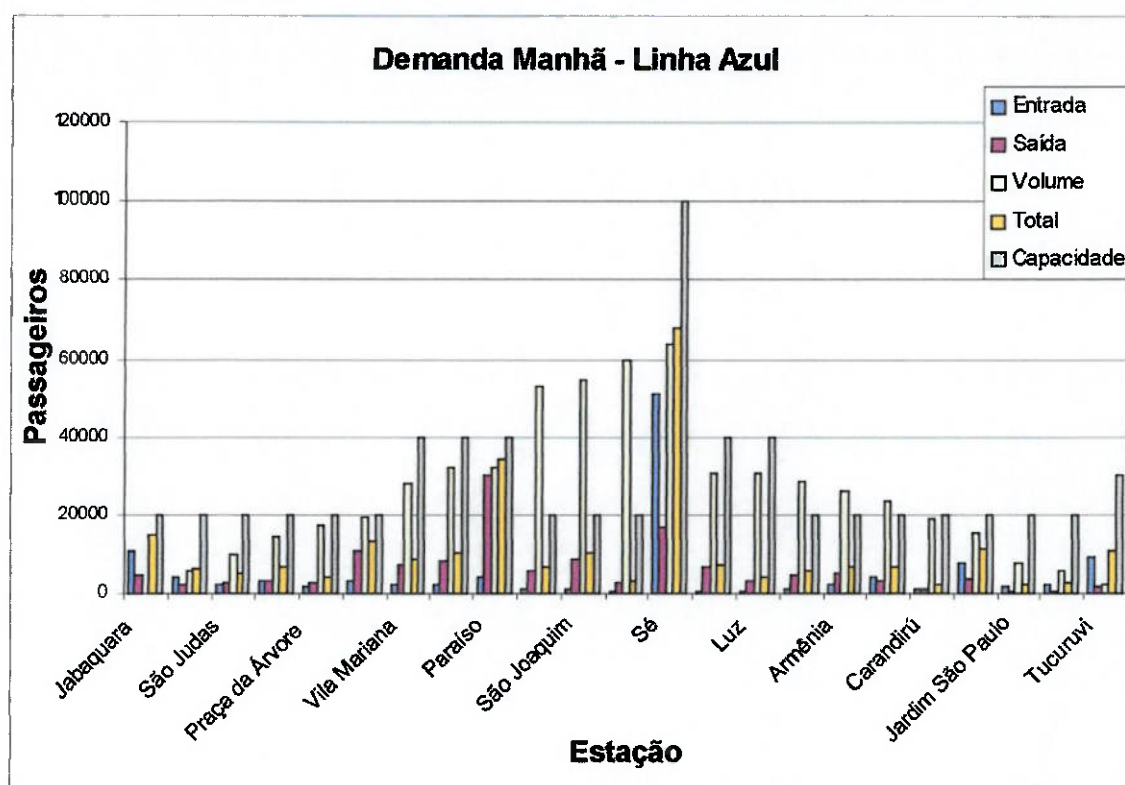


Figura 5.67 – Diminuição do tempo entre estações – Linha Azul

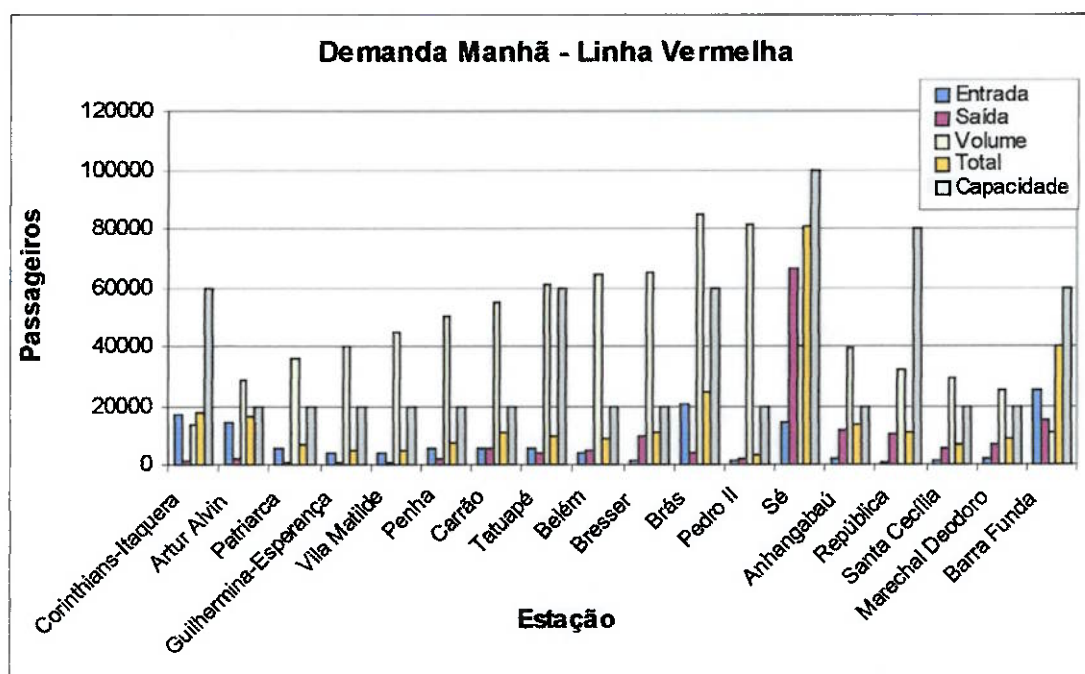


Figura 5.68 – Diminuição do tempo entre estações – Linha Vermelha

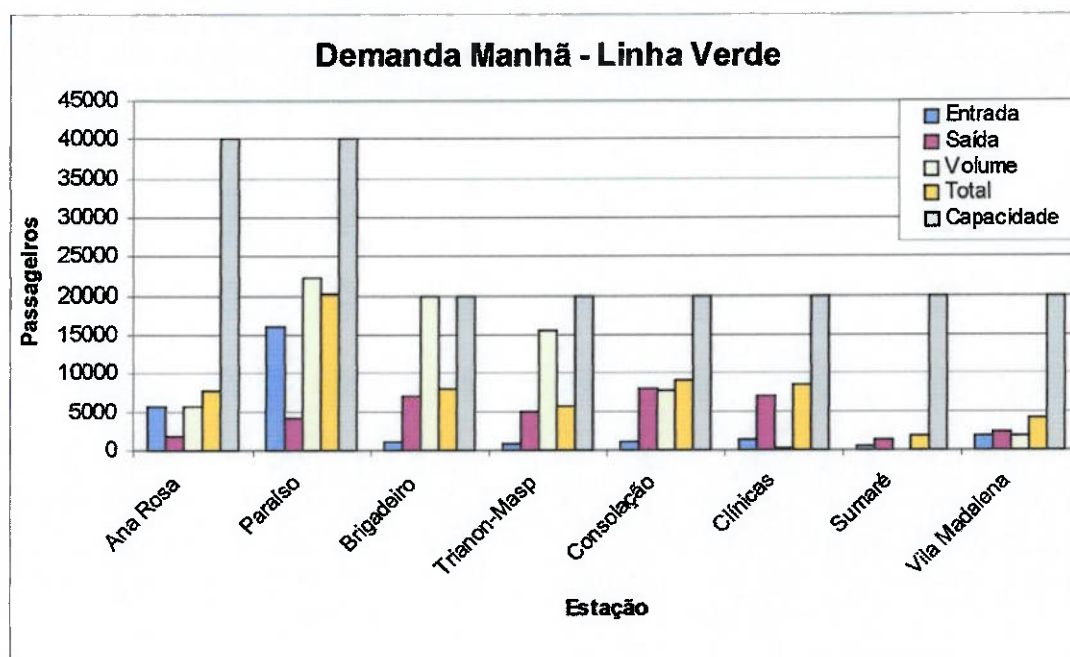


Figura 5.69 – Diminuição do tempo entre estações – Linha Verde

A partir destes gráficos, pode-se verificar que o total de passageiros nas estações diminuiu consideravelmente. A Tabela 5-28, Tabela 5-29 e Tabela 5-30 ilustra as diferenças médias do resultado da diminuição do intervalo de tempo entre as estações, em relação à sua operação normal, para a Linha Azul, Linha Vermelha e Linha Verde respectivamente. Nestas tabelas, são apresentados os valores referentes ao total se desembarques nas estações, assim como o volume total de passageiros transportados nos trens, em um período de uma hora do horário de pico.

Tabela 5-28: Diminuição do Tempo – Linha Azul

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Redução
Jabaquara	3.837	4.522	18%	10.512	2.530	-76%
Conceição	1.645	2.006	22%	18.272	5.775	-68%
São Judas	2.259	2.762	22%	21.712	9.502	-56%
Saúde	2.685	3.301	23%	26.251	14.292	-46%
Praça da Árvore	1.958	2.410	23%	29.029	17.340	-40%
Santa Cruz	8.703	10.532	21%	31.118	19.423	-38%
Vila Mariana	5.851	6.896	18%	38.435	28.028	-27%
Ana Rosa	6.743	7.971	18%	41.851	31.926	-24%
Paraíso	25.410	30.160	19%	42.447	32.186	-24%
Vergueiro	4.783	5.503	15%	60.144	53.127	-12%
São Joaquim	7.383	8.796	19%	61.709	54.688	-11%
Liberdade	1.943	2.317	19%	65.819	59.598	-9%
Sé	15.843	17.047	8%	70.849	63.935	-10%
São Bento	5.537	6.447	16%	36.825	30.757	-16%
Luz	2.831	3.257	15%	36.416	30.521	-16%
Tiradentes	3.987	4.585	15%	34.711	28.795	-17%
Armênia	4.365	5.022	15%	32.171	26.123	-19%
Tietê	2.474	2.847	15%	29.570	23.400	-21%
Carandirú	1.051	1.239	18%	25.236	18.964	-25%
Santana	2.840	3.368	19%	22.022	15.308	-30%
Jardim São Paulo	490	562	15%	14.230	7.517	-47%
Parada Inglesa	394	455	15%	12.537	5.780	-54%
Tucuruvi	1.354	1.596	18%	9.124	2.135	-77%
	Média		18%	Média		-33%

Tabela 5-29: Diminuição do Tempo – Linha Vermelha

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Redução
Corinthians-Itaquera	982	1.152	17%	20.459	13.269	-35%
Artur Alvin	1.511	1.771	17%	35.764	28.733	-20%
Patriarca	729	855	17%	42.647	35.846	-16%
Guilhermina-Esperança	656	769	17%	47.036	40.317	-14%
Vila Matilde	831	974	17%	51.322	44.678	-13%
Penha	1.854	2.174	17%	56.562	49.946	-12%
Carrão	4.547	5.331	17%	61.491	54.818	-11%
Tatuapé	3.606	4.228	17%	67.595	61.153	-10%
Belém	4.166	4.885	17%	70.827	64.405	-9%
Bresser	8.036	9.421	17%	71.378	64.940	-9%
Brás	3.488	4.090	17%	90.112	84.412	-6%
Pedro II	1.621	1.901	17%	86.851	81.370	-6%
Sé	56.543	66.292	17%	52.661	40.042	-24%
Anhangabaú	9.978	11.699	17%	50.788	39.117	-23%
República	8.564	10.040	17%	44.605	32.058	-28%
Santa Cecília	4.878	5.719	17%	41.789	28.867	-31%
Marechal Deodoro	5.906	6.924	17%	38.195	24.816	-35%
Barra Funda	12.539	14.701	17%	26.015	10.846	-58%
	Média		17%	Média		-20%

Tabela 5-30: Diminuição do Tempo – Linha Verde

	Saída			Volume Transportado		
	Atual	Caso 3	Aumento	Atual	Caso 3	Redução
Ana Rosa	1.595	1.914	20%	5.757	5.757	0%
Paraiso	3.346	4.016	20%	23.127	22.271	-4%
Brigadeiro	5.844	7.013	20%	21.367	20.040	-6%
Trianon-Masp	4.013	4.816	20%	17.463	15.465	-11%
Consolação	6.660	7.992	20%	10.895	7.693	-29%
Clínicas	5.912	7.094	20%	4.474	179	-96%
Sumaré	1.092	1.310	20%	2.188	294	-87%
Vila Madalena	1.835	2.202	20%	1.851	1.851	0%
	Média		20%	Média		-44%

Pode-se observar que:

- A saída de passageiros das estações aumentou, em média, de 20%;
- O Volume de passageiros que passou pelas estações das linhas Azul e Verde diminuiu, em média, de 40%;

- O Volume de passageiros que passou pelas estações da linha Vermelha diminuiu, em média, de 20%.

Os gráficos a seguir apresentam o total de passageiros, em média, nos trens em circulação, em algumas estações do Metrô.

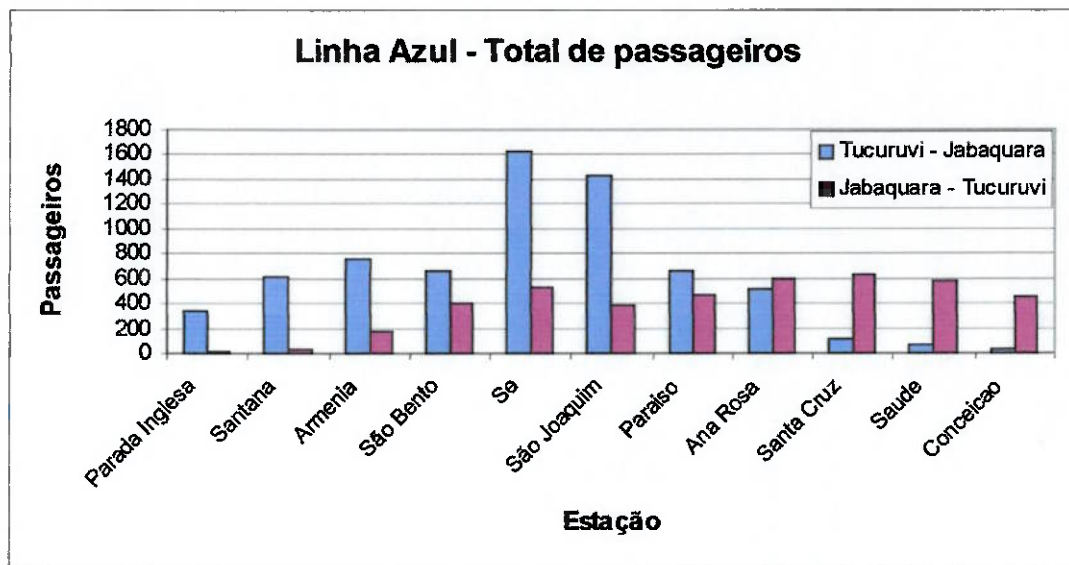


Figura 5.70 – Total de passageiros – Diminuição do intervalo entre trens –Linha Azul

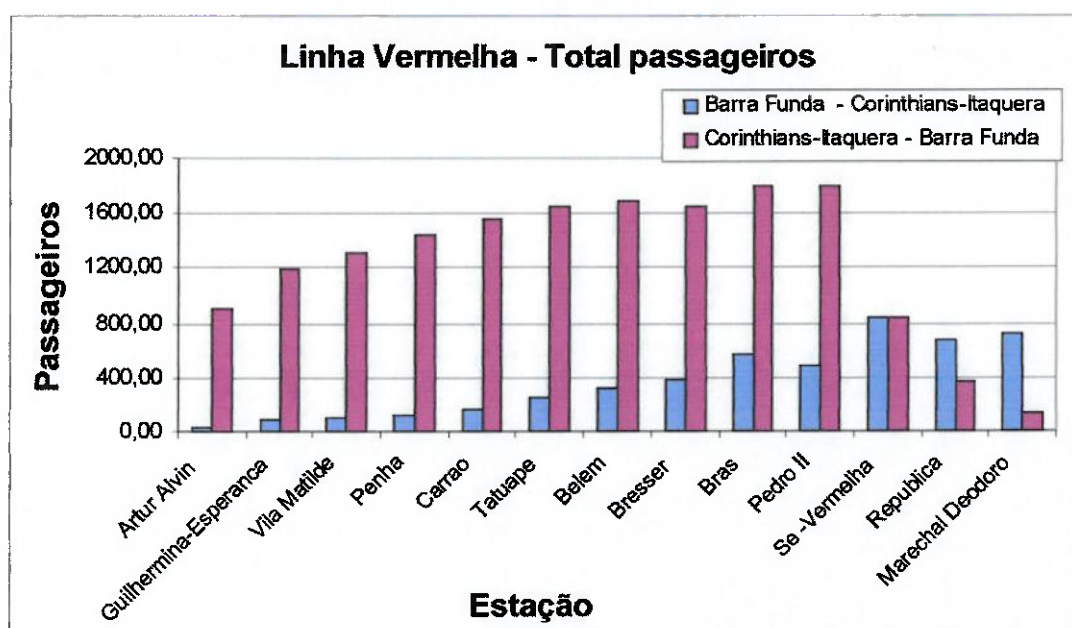


Figura 5.71 – Total de passageiros – Diminuição do intervalo entre trens – Linha Vermelha

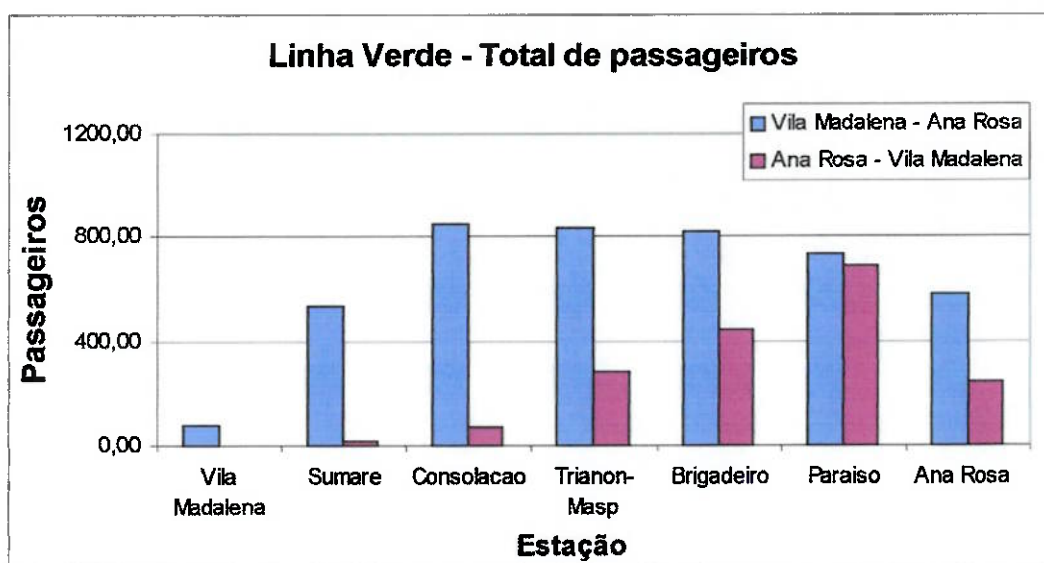


Figura 5.72 – Total de passageiro – Diminuição do intervalo entre trens – Linha Verde

A Tabela 5-31 ilustra a diminuição média de passageiros nos trens em circulação, nas três linhas do Metrô, sendo que:

- Linha Azul:
 - Sentido 1: Tucuruvi – Jabaquara

- Sentido 2: Jabaquara – Tucuruvi
- Linha Verde:
 - Sentido 1: Vila Madalena – Ana Rosa
 - Sentido 2: Ana Rosa – Vila Madalena
- Linha Vermelha:
 - Sentido 1: Barra Funda – Corinthians-Itaquera
 - Sentido 2: Corinthians-Itaquera – Barra Funda

Tabela 5-31: Resultado da diminuição do intervalo de tempo entre estações, nos trens

	Sentido 1	Sentido 2
<i>Linha Azul</i>	-35%	-40%
<i>Linha Verde</i>	-35%	-63%
<i>Linha Vermelha</i>	-54%	-21%

Analisando-se esta tabela, pode-se observar que:

- Linha Azul:
 - Nos dois sentidos, a quantidade de passageiros nos trens em circulação apresentou uma boa diminuição, sendo em média 37%;
- Linha Verde:
 - O sentido 1 apresentou uma diminuição de 35% na quantidade de passageiros nos trens em circulação;
 - O sentido 2 apresentou uma diminuição de 63% na quantidade de passageiros nos trens em circulação;
 - A diminuição do intervalo de tempo entre estações é sentido com uma maior intensidade pelos passageiros que utilizam os trens do sentido Ana Rosa – Vila Madalena.
- Linha Vermelha:

6. Conclusões

Este trabalho abordou o tráfego de trens metroviários em três linhas (Azul, Verde e Vermelha) do Metrô de São Paulo, bem como o fluxo de passageiros nas estações que compõem cada uma destas linhas, tanto no embarque e desembarque, como também na entrada e saída das estações. Verificou-se que os modelos desenvolvidos com o auxílio das ferramentas de simulação (HPSim e ProModel) representam adequadamente o sistema metroviário de São Paulo, e que proporcionam uma base eficaz para a análise do comportamento do mesmo frente a alterações em algumas de suas variáveis.

A simulação dos modelos em HPSim e ProModel e posterior análise revelaram que o volume de pessoas transportadas, dentro das condições de operações atuais, ainda é suportada pelas capacidades das estações. Contudo, o fato de algumas estações receberem volumes elevados de usuários, em horários de pico, acarreta em superlotação das mesmas, revelando a má qualidade de serviços prestados, já que o sistema opera em condições próximas aos limites das capacidades de suas estações.

Neste estudo, realizou-se também uma análise de uma situação extrema de operação: o aumento do tempo de percurso entre as estações, muito comum em dias chuvosos ou quando o sistema operacional apresenta falhas. Nesta configuração, os resultados da simulação revelam que o volume total de pessoas transportadas é reduzido sensivelmente, resultando em aumento do tempo de espera por trens nas estações e acúmulo de usuários nas plataformas de embarque.

Foram propostas e estudadas algumas alterações no sistema em operação, visando aumentar a qualidade dos serviços prestados, como o aumento do número de trens em circulação, aumento da capacidade dos trens e redução do tempo de percurso entre estações, pelo aumento da velocidade dos trens. Todas estas alternativas apresentaram melhoras significativas na qualidade de serviços prestados, através do aumento do volume de passageiros transportados por hora e redução do número de passageiros nas plataformas de embarque nas estações. Contudo, estas alterações provocaram, em algumas estações, paradas de trens nas vias. Tal fato revela que

alterações na configuração de operação do sistema metroviário não podem ser efetuadas impunemente, uma vez que o fluxo de passageiros pelas estações e o tráfego de trens nas vias estão intimamente relacionados. Portanto, uma medida que melhore uma destas condições acarreta, no detrimento de outras condições.

Com relação às ferramentas de simulação, o HPSim mostrou-se muito eficiente na modelagem e análise da dinâmica do tráfego de trens nas vias, uma vez que o grau de detalhamento do modelo pode ser aumentado, de forma que o estudo desta dinâmica é facilitado. Entretanto, tal facilidade não se aplica ao estudo do fluxo de passageiros, principalmente quanto à capacidade dos trens e embarques e desembarques.

Já o ProModel, por dispor de ferramentas próprias, como os *attributes* e *variables*, proporcionou uma análise detalhada do total de passageiros em cada trem, especificando o volume total de passageiros transportados entre cada estação e na linha como um todo. Contudo, o estudo da dinâmica de operação dos trens nas vias não mostrou a mesma “flexibilidade” apresentada pelo HPSim, já que não é possível aumentar constantemente o grau de detalhamento.

Anexos A – Ponte Orca

A Ponte Orca é um serviço que possibilita a integração entre o Metrô e a CPTM. O trajeto é realizado por “vans” credenciadas, as quais são chamadas de “Orca”. Este serviço é prestado entre dois pontos:

- entre a estação Vila Madalena do Metrô e a Cidade Universitária da CPTM;
- entre a estação Vila Madalena do Metrô e a estação Barra Funda da CPTM.

A Ponte Orca proporciona ao usuário maior conforto e segurança em sua locomoção entre as estações acima referidas. Mais ainda, este serviço é gratuito e o usuário do Metrô que tem este benefício incluído no custo de apenas um bilhete.

Estas informações foram obtidas junto ao Metrô [2002], em 27 de maio. Alterações de tarifas e trajetos devem ser obtidas junto à Companhia Metropolitana de São Paulo.

Anexo B – Ferramentas de Simulação

As ferramentas de modelagem, simulação e análise utilizadas neste trabalho são o “ProModel” e o “HPSim”, sendo que suas funcionalidades serão descritas a seguir.

Estes softwares foram escolhidos por diversos motivos, dentre os quais estão: o fácil acesso a estas duas ferramentas de simulação, sendo que o “HPSim” é um software de distribuição gratuita (“freeware”) e o “ProModel” está disponível para as atividades acadêmicas do Departamento de Engenharia Mecatrônica da Escola Politécnica da USP.

Mais ainda, ambos os softwares utilizam a plataforma Windows, o que facilita o desenvolvimento e a visualização do sistema. Outro fator a considerar é que ambos possuem transições temporizadas, fundamentais para a análise de desempenho, e lugares (estados) com buffers.

Finalmente, existe o prévio conhecimento por parte dos autores deste trabalho do funcionamento básico destas duas ferramentas, visto terem sido utilizadas em disciplinas regulares de graduação. Portanto, devido a estes fatores e a disponibilidade apresentada por estas duas ferramentas de funcionalidades suficientes para a realização do projeto, elas estão sendo escolhidas.

B.1. HPSim

O HPSim é um software de livre distribuição e foi desenvolvido por Henryk Anschuetz em Berlim na Alemanha, para uso em ambiente MS Windows, possuindo um editor gráfico o qual permite a construção do modelo em redes de Petri, bem como sua simulação.

Segundo seu autor, este software foi desenvolvido para estudantes, a fim de ajudar na familiarização com redes de Petri e, através dele poder realizar a modelagem de redes de Petri dos tipos:

- *Lugar / Transição*
- Redes de Petri estocásticas

- Redes de Petri com tempo

As principais características deste software, descritas pelo seu autor, são:

- Editor Gráfico
- Animação Gráfica
- Simulação Rápida
- Análise Simples de Desempenho

Neste estudo são utilizadas as redes de Petri que possuem as seguintes características:

- *Lugares* com *capacidade* limitada
- Diferentes conexões com *pesos*
- *Transições* temporais

As operações possíveis de se realizar através do editor de texto, segundo Henryk Anschuetz, são:

- Posicionar, mover e apagar objetos gráficos
- Funções de “zoom” em vários níveis
- Inserir comentários
- Função de impressão

As simulações são visualizadas como sendo um “jogo” de animação de *marcas*. Esta animação pode ser executada no modo “passo-a-passo” ou em modo contínuo. Adicionalmente, uma opção de avance rápido está disponível, na qual a representação gráfica da marca não está sincronizada com a atual posição simulada.

Um modelo de rede é tido como um documento no “HPSim”. Este documento consiste em elementos, os quais são considerados como uma rede para simulação. Uma interação de elementos de diferentes documentos não é possível. Não obstante, o “HPSim” – como IMD (Interface de Múltiplos Documentos) – pode manipular vários

documentos abertos ao mesmo tempo. Estes documentos podem ser independentemente simulados ou editados.

Todos os comandos podem ser selecionados por um menu ou por uma barra de ferramentas, ambos intuitivos e equivalentes.

Os objetos gráficos ativos utilizados por este software são os componentes funcionais das redes de Petri, como os *lugares*, *transições* e *arcos*, sendo descritos abaixo:

- **Lugar:** Este objeto gráfico representa um *lugar* em uma rede de Petri. Sua capacidade está limitada a um certo número. O elemento *lugar* pode ser visualizado em diferentes tamanhos predefinidos.
- **Transição:** Este elemento gráfico representa uma *transição* em uma rede de Petri. O tempo de *habilitação* para uma *transição* pode ser definido. Depois de transcorrido o tempo de *habilitação*, a *transição* será disparada instantaneamente. Várias funções estão disponíveis para representar o comportamento do tempo de *habilitação* da *transição*, podendo-se citar: imediato, determinístico, distribuição exponencial e distribuição uniforme.

Arco: Este elemento gráfico representa um arco em uma rede de Petri. O *arco* conecta *transições* e *lugares* em um sentido específico, sendo que as conexões desejadas somente serão estabelecidas se estiverem de acordo com a semântica das redes de Petri. O “HPSim” utiliza somente *arcos* padrões, além de *arcos habilitadores* e *inibidores*.

B.2. ProModel

O ProModel é uma ferramenta de simulação para modelar diferentes tipos de sistemas de manufatura, abrangendo desde pequenos “job shops” e células de manufatura até produção em grande escala e sistemas de manufatura flexível, representado no Brasil pela Belge Engenharia & Sistemas, que é a distribuidora exclusiva da ProModel Corporation - USA. Este software possui interface gráfica

relativamente intuitiva e orientada a objetos, reduzindo a necessidade de um treinamento especializado em programação, e apresenta as seguintes aplicações principais, descritas pela própria distribuidora: (1) Manufatura; (2) Logística.

A partir destas aplicações gerais, o ProModel pode ser utilizado em algumas atividades típicas descritas pelo distribuidor, tais como:

- Dimensionamento de linhas e células;
- Melhoria de layout;
- Implantação de “kanban”, “kaizen” e “lean production”;
- Estudo de implantação de novos equipamentos, linhas e tecnologias;
- Redução de estoques;
- Aumento de produção evitando-se o investimento em novos recursos físicos ou humanos (apenas aprimorando os processos/fluxos);
- Sistemas de movimentação e armazenagem de materiais;
- Planejamento de manutenções e turnos de trabalho;

Na Tabela B-1, estão exibidas as configurações mínima e recomendada pelo fabricante para a utilização do ProModel:

Tabela B-1: Configurações do Sistema para ProModel

	Mínimo	Recomendado
Processador	Pentium	Pentium 200 MHz
Memória	16 MB	32 MB
Hard Disk	16 MB	41 MB
Monitor	VGA (640 x 480)	SVGA (1024 x 768)
Sistema Operacional	Microsoft Windows 95 & 98	Microsoft Windows 95 & 98
	Microsoft NT 4.0	Microsoft NT 4.0
NetWork	Microsoft NT 4.0	Microsoft NT 4.0
	Novel Netware 3.11	Novel Netware 3.11

O ProModel permite o trabalho em grupo, possibilitando que diferentes partes do modelo sejam implementadas por diferentes grupos e posteriormente sejam agrupadas em um grande modelo final.

O processo de modelagem de um sistema utilizando “ProModel” começa por definir o que o software denomina de “elementos de modelagem”. A seguir, tem-se uma lista dos elementos possíveis no software:

1. **Locations:** é um lugar imóvel de processamento ou armazenamento num sistema, para o qual as *entities* (posteriormente definidas) são movidas para serem armazenadas, processadas ou tomar novo roteiro. Os *locations* podem ser simples (comportam apenas uma *entity* de cada vez) ou múltiplos (comportam mais de uma *entity* simultaneamente). Além disto, podem possuir regras de entrada e saída: as regras de entrada são usadas para selecionar qual a próxima *entity* a ser manipulada caso exista mais de uma destas com essa possibilidade, ao passo que as de saída são usadas em um *location* de capacidade múltipla para determinar a ordem com que deixarão o mesmo.
2. **Entity:** é um item, como um produto em fabricação, que é processado no modelo. A dinâmica conferida pelo ProModel às *entities* permite que estas sofram operações, como reunião, divisão e conversão, cujos resultados são novas *entities*. As *entities* podem receber *attributes* (posteriormente definidos), que podem ser testados para a tomada de decisão ou para se obter estatísticas específicas. A imagem que representa uma *entity* pode ser trocada como resultado de uma operação para se ilustrar uma mudança física da *entity* durante uma simulação.
3. **Path Networks:** são elementos opcionais e definem o caminho utilizado por *entities* e *resources* para se moverem no sistema. As *path networks* são constituídas de nós conectados por segmentos (que são definidos graficamente através de simples “cliques” de “mouse”) e de interfaces desses nós com *locations*. Várias *path networks* podem ser definidas, e várias *entities* e/ou *resources* (posteriormente definidos) podem compartilhar a mesma *path network*. Os movimentos de *entities* e *resources* ao longo da *path network*

podem ser definidos em termos de comprimento da mesma e velocidade de movimento, ou simplesmente pelo tempo de percurso da mesma. As distâncias são automaticamente computadas baseando-se na escala de layout definida pelo usuário, mas podem ser redefinidas manualmente.

4. **Resources:** podem ser pessoas, ferramentas, veículos ou qualquer outro objeto que possa ser usado para transportar materiais entre duas *locations*, realizar uma operação sobre um material em uma *location*, ou realizar manutenção em uma *location* ou em outro *resource* que esteja quebrado. *Resources* podem ser dinâmicos ou estáticos. O que difere estes dois tipos de *resources* é o fato de o primeiro ser vinculado a uma *path network* e o segundo não. Regras de decisão podem ser utilizadas para alocar os *resources* e priorizar os carregamentos e entregas. Características de movimentação dos *resources*, como velocidades quando cheio e quando vazio, aceleração, desaceleração, tempo de carga e descarga, entre outros, podem ser especificados.
5. **Processing:** a lógica de um *processing* define qual a operação e o roteamento para cada tipo de *entity* em cada *location* do sistema. Os tempos de operação ou serviço, requisições de *resources*, lógicas de processamento, relações de entrada e saída, condições de roteamento e tempos de movimentação podem ser descritos. Os tempos de operação podem ser descritos por formas variadas como constantes, distribuições probabilísticas, resultados de funções, valores de atributos, resultados de sub-rotinas, etc., ou por uma expressão contendo uma combinação destas formas. Operações lógicas como “If-Then-Else”, malhas (“loopings”) e chamadas a sub-rotinas podem ser incluídas. Expressões relacionadas a recursos como “Get”, “Use”, “Join”, “Get” juntamente com expressões booleanas e palavras reservadas como “Accum”, “Join”, “Group” simplificam a lógica de programação e utilização dos *resources*.
6. **Arrivals:** este elemento é definido o mecanismo de determinação dos momentos em que uma *entity* é introduzida no sistema. Uma *arrival* indica como uma *entity* é introduzida no sistema. Um registro de *arrival* é composto de: número de novas *entities* por *arrival*, frequência das *arrivals*, *locations* das *arrivals*, o

instante da primeira *arrival* e o número total de ocorrências de *arrivals*. *Arrivals* podem ser determinísticas, condicionais ou estocásticas; neste último caso, pode-se utilizar tanto distribuições probabilísticas pré-definidas quanto definidas pelo usuário para definir os horários e as quantidades das *arrivals*.

7. **Horários de trabalho:** este elemento, determinando horários de funcionamento e paradas agendadas do sistema, é definido pela seleção de horas no dia e dias na semana. A cada *horário de trabalho* podem ser associados *resources* e *locations*.
8. **Attributes:** *Entities* e *locations* podem receber *attributes* de valor inteiro ou real. Pode-se definir *attributes* para *entities* e *locations* que podem assumir tanto valores inteiros como reais. Nomes de *locations*, *resources* e *entities* podem ser associados a *attributes*. Estes *attributes* são definidos para uma família de *entities*, por exemplo, possuindo cada uma os seus respectivos *attributes*. Os *attributes* são geralmente empregados para representar características das *entities* tais como cor, número de vezes que foi re-trabalhada, tempo de operação da *entitie* para *locations* específicos, etc. Tanto para variáveis como para *attributes* é possível incrementar, decrementar ou executar qualquer operação matemática, com a diferença de que os *attributes* estão associados a *entities* e *locations* específicos.
9. **Variables:** são usadas para tomadas de decisão e cálculo de estatísticas. O valor da *variable* pode ser monitorado a todo o momento e mostrado ao fim da simulação em forma de gráfico ou histograma. Estas, assim como os *attributes*, podem assumir valores reais ou inteiros. Quando se utiliza um contador, é necessário definir uma *variable* e vincular o contador a esta.
10. **Vetores/Matrizes:** são matrizes de *variables*, podendo ser uni ou multidimensionais.
11. **Macro:** é uma expressão complexa, ou um conjunto de expressões, que pode ser definida apenas uma vez e utilizada depois várias vezes. *Macros* são extremamente úteis quando pedaços de lógica se repetem em vários pedaços do modelo. Pode-se definir uma *macro* como uma interface de tempo de execução

(RTI Macro); ao se definir uma *macro* como RTI, o conteúdo de seu campo “Text” torna-se automaticamente o valor da lógica que a mesma está substituindo. As *macros* RTI permitem ao usuário trocar facilmente os parâmetros do modelo antes de executá-lo, além de permitir a preparação de cenários múltiplos para serem executados em lotes. As RTI podem ser acessadas através das opções “Model”, “Parameters” ou “Scenario” existentes dentro do menu de simulação.

12. **Sub-rotinas:** são blocos definidos pelo usuário que recebem valores quando chamadas e podem retornar resultados após sua execução. Operações complexas desenvolvidas em várias partes do modelo podem ser definidas apropriadamente por uma única *sub-rotina*.
13. **Distribuições do usuário:** Estas podem ser definidas pelo usuário para substituir as distribuições probabilísticas fornecidas pelo software.

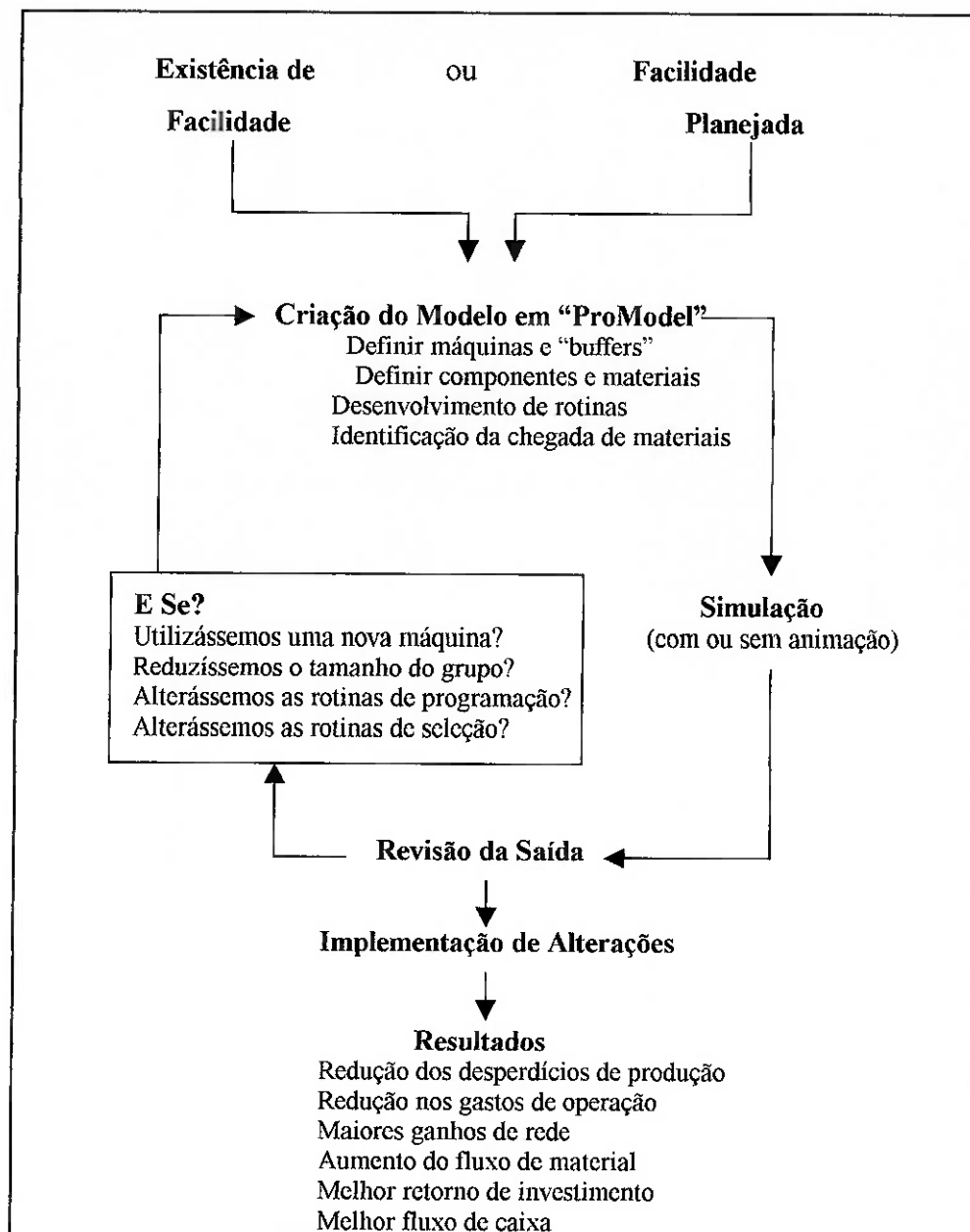


Figura B.1 – Diagrama de modelagem em ProModel [Src-Asia, 2002]

A Figura B.1 ilustra a utilização do ProModel para a implementação de alterações ou busca por melhor desempenho em um processo. Inicialmente parte-se de uma facilidade para a criação do modelo com o auxílio do ProModel. Esta etapa envolve considerações como a definição máquinas, "buffers", componentes e materiais, dentre outros. Uma vez simulado o modelo desenvolvido, o resultado desta simulação é

submetido a uma revisão, que envolve considerações como a implementação de alterações no processo ou no próprio modelo. Após sucessivas interações de simulação, obtém-se os resultados das alterações efetuadas, como: redução dos desperdícios de produção, redução nos gastos de operação, melhor fluxo de caixa, dentre outros.

Anexo C – Teoria de “Bags”

A teoria de conjuntos vem a muito tempo sendo útil à matemática e à ciência da computação. A teoria de “bags” é uma extensão natural da teoria de conjuntos. Um “bag”, como um conjunto, é uma coleção de elementos sob certo domínio. Entretanto, ao contrário de um conjunto, “bags” permitem múltiplas ocorrências de elementos. Na teoria de conjuntos, um elemento é ou não um membro do conjunto. Já na teoria de “bags”, um elemento pode estar em um “bag” zero vezes (não está no “bag”) ou uma, duas, três, ou qualquer outro número de vezes especificado.

Como exemplos, considera-se os “bags” apresentados na Figura C.1 sob o domínio $\{a,b,c,d\}$:

$$\begin{aligned} B_1 &= \{a,b,c\} \\ B_2 &= \{a\} \\ B_3 &= \{a,b,c,c\} \\ B_4 &= \{a,a,a\} \\ B_5 &= \{b,c,b,c\} \\ B_6 &= \{c,c,b,b\} \\ B_7 &= \{a,a,a,a,a,b,b,c,d,d,d,d,d,d,d\} \end{aligned}$$

Figura C.1 – Exemplos de “bags”

Alguns “bags” são conjuntos (como B_1 e B_2). Como nos conjuntos, a ordem dos elementos não é importante. Então, B_5 e B_6 são o mesmo “bag”.

Na teoria de conjuntos, o conceito básico é o relacionamento do tipo “é um membro de”. Esta relação é dada entre elementos e conjuntos, e define quais elementos são membros de quais conjuntos. O conceito básico da teoria de “bags” é a função do tipo “número de ocorrências”, que define o número de ocorrências de um elemento no “bag”. Para um elemento x e um “bag” B , denota-se o número de ocorrências de x em B por $\#(x,B)$.

Com estes conceitos básicos, define-se os fundamentos da teoria de “bags”. A maioria dos conceitos e notações são similares aos da teoria de conjuntos. Caso

restringa-se o número de elementos em um “bag” de tal modo que $0 \leq \#(x, B) \leq 1$, resulta-se na teoria de conjuntos, que nada mais é do que um caso particular da teoria de “bags”.

- Agrupamento:

A função $\#(x, B)$ define o número de ocorrências de um elemento x em um “bag” B . Desta definição decorre que $\#(x, B) \geq 0$ para todo x e B . Distingue-se os casos zero e não-zero. Um elemento x é um *membro* de um “bag” B se $\#(x, B) > 0$, sendo denotado por $x \in B$. Similarmente, se $\#(x, B) = 0$, então $x \notin B$. Define-se um “bag” vazio (\emptyset) sem nenhum *membro* para todo x , tal que $\#(x, \emptyset) = 0$.

- Cardinalidade:

A cardinalidade $|B|$ de um “bag” B é o número total de ocorrências de elementos no “bag”:

$$|B| = \sum_x \#(x, B)$$

- Inclusão de “Bag” e Igualdade:

Um “bag” A é um “subbag” do “bag” B (representa-se $A \subseteq B$) se todo elemento de A também for um elemento de B :

$$A \subseteq B \text{ se } \#(x, A) \leq \#(x, B) \text{ para todo } x$$

Dois “bags” são iguais ($A=B$) se $\#(x, A) = \#(x, B)$ para todo x .

Destas definições tem-se imediatamente que:

$$A = B \text{ se } A \subseteq B \text{ e } B \subseteq A$$

$$\emptyset \subseteq B \text{ para todos os “bags” } B$$

$$A = B \text{ implica que } |A| = |B|$$

$$A \subseteq B \text{ implica que } |A| \leq |B|$$

Um “bag” A está estritamente contido no “bag” B ($A \subset B$) se $A \subseteq B$ e $A \neq B$.

Nota-se que $\#(x,A) < \#(x,B)$ não se aplica de $A \subset B$, embora tenha-se que $|A| < |B|$.

- Operações:

Quatro operações são definidas entre dois “bags” A e B :

$$\text{União de “Bags”} \quad A \cup B \quad \#(x, A \cup B) = \max(\#(x,A), \#(x,B))$$

$$\text{Intersecção de “Bags”} \quad A \cap B \quad \#(x, A \cap B) = \min(\#(x,A), \#(x,B))$$

$$\text{Soma de “Bags”} \quad A + B \quad \#(x, A + B) = \#(x,A) + \#(x,B)$$

$$\text{Diferença de “Bags”} \quad A - B \quad \#(x, A - B) = \#(x,A) - \#(x, A \cap B)$$

Além disto, tem-se:

$$A \cap B \subseteq A \subseteq A \cup B$$

$$A - B \subseteq A \subseteq A + B$$

A distinção entre união e soma é estabelecida por:

$$|A \cup B| \leq |A| + |B|$$

$$|A + B| = |A| + |B|$$

Infelizmente, as relações de intersecção e diferença não se distinguem de maneira tão simples. A diferença é complicada pela impossibilidade de remoção de elementos de um “bag” que não estão nele.

- Espaço de “Bags”:

Define-se um *domínio* D como um conjunto de elementos de onde os “bags” são construídos. O espaço de “bag” D é um conjunto de todos os “bags” cujos elementos

estão em D e não há número de ocorrência de elementos maior que n , isto é, para todo $B \in D^n$:

1. $x \in B$ implica $x \in D$.
2. $\#(x, B) \leq n$, para todo x .

O conjunto D^* é um conjunto de todos os “bags” sobre um domínio D . Não há limites no número de ocorrências de um elemento em um “bag”.

- Mapeamento de Parikh:

Para um domínio finito $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, há uma correspondência natural entre cada “bag” B sobre D e o n -vetor $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ definido por:

$$f_i = \#(d_i, B)$$

Este vetor é conhecido como mapeamento de Parikh [Parikh, 1966].

Abaixo é apresentado um exemplo:

Seja $D = \{a, b, c, d\}$ um domínio. Têm-se os seguintes “bags”:

$$A = \{a, b\}$$

$$B = \{a, a, b, c\}$$

$$C = \{a, a, a, c, c\}$$

Tem-se:

$$|A| = 2$$

$$|C| = 5$$

$$A \cup B = \{a, a, b, c\} = B$$

$$A \cup C = \{a, a, a, b, c, c\} = B \cup C$$

$$A \cap C = \{a\}$$

$$B \cap C = \{a, a, c\}$$

$$A+B = \{a, a, a, b, b, c\}$$

$$A-B = \emptyset$$

$$C-A = \{a, a, c, c\}$$

$$C-B = \{a, c\}$$

Referências Bibliográficas

- BANKS, J., CARSON, J.S., NELSON, B.L., *Discrete Event System*, ed. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- BENNETT, B.S., *Simulation Fundamentals*, ed. Prentice Hall International series in systems and control engineering, Englewood Cliffs, 1995.
- BRUNI, R., MESEGUER, J., MONTANARI, U., SASSONE, V., *Functional Models for Petri Nets*, 2001.
- CELLIER, F.E., *Continuous System Modeling*, ed. Springer-Verlag, New York, 1991.
- FRANÇA, V., “Parou de novo” São Paulo, Ed. Abril, Revista Veja São Paulo, 12 de Junho de 2002.
- GORDON, G., *System Simulation*, ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1969.
- KUMAR, R., GARG, V.K., *Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1995.
- LAW, A.M., KELTON, W.D., *Simulation Modeling and Analysis*, ed. McGraw-Hill, New York, 1991.
- MIYAGI, P.E., *Controle Programável – Fundamentos do Controle de Sistemas a Eventos Discretos*, ed. Edgard Blücher, São Paulo, 1996.
- PARIKH, R., *On Context – Free Languages*, Journal of the ACM, Volume 13, Número 4, 1966.
- PEREIRA, R.G., “O transporte coletivo merece prioridade”, São Paulo, Engenho Editora Técnica Ltda, Revista Engenharia n.544 – ano58, 2001.
- PETERSON, J.L., *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, ed. Prentice Hall, New Jersey, 1981.
- SANTOS FILHO, D.J., MIYAGI, P.E., MARUYAMA, N., “Curso de ProModel”, São Paulo, 1998.

- SEILA, A.F., *Introduction to Simulation*, Proceedings of the 1995 Winter Simulation Conference.
- SHANNON, R.E., *Systems Simulation: The Art and Science*, ed. Prentice Hall, New Jersey, 1975.
- SHEARER, J.L., MURPHY, A.T., RICHARDSON, H.H., *Introduction to System Dynamics*, ed. Addison-Wesley, Massachusetts, 1967.
- BELGE, www.belge.com.br/produtos/promodel (10 de Junho de 2002).
- CELEPAR, <http://www.pr.gov.br/celepar/celepar/batebyte/edicoes/1995/bb47/redes.htm> (06 de Junho de 2002).
- CET, www.cetsp.com.br (Maio de 2002).
- DAIMI, http://www.daimi.au.dk/PetriNets/tools/complete_db.html (06 de Junho de 2002).
- METRÔ, www.metro.sp.gov.br (Abril de 2002 / 27 de Maio de 2002).
- PROMODEL, www.promodel.com/products/promodel/sysreqs.asp (10 de Junho de 2002).
- SEADE, www.seade.gov.br (Abril de 2002).
- SMTSP, <http://www.prefeitura.sp.gov.br/secretarias/transportes/index.asp> (Maio de 2002).
- SPTRANS, www.sptrans.com.br (Abril de 2002).
- SRC-ASIA, www.src-asia.com/products/ProModel/promodel.htm (15 de Junho de 2002).

Apêndice A

Histórico das Redes de Petri

Apêndice A – Histórico das Redes de Petri

As redes de Petri foram desenvolvidas a partir do trabalho de Carl Adam Petri. Em sua dissertação de doutorado, “Kommunikation mit Automaten”, Petri formulou a base para a teoria de comunicação entre componentes assíncronos de um sistema computacional, preocupando-se particularmente na descrição das relações causais entre eventos. Neste trabalho encontra-se um desenvolvimento teórico dos conceitos básicos a partir dos quais as redes de Petri se desenvolveram.

O trabalho de Petri despertou a atenção de A.W. Holt e outros pesquisadores do “Information System Theory Project of Applied Data Research Inc” (ADR). Muito da recente teoria, notação e representação das redes de Petri, foram desenvolvidos a partir dos trabalhos no “Information System Theory Project”, que não apenas traduziu o trabalho de Petri para o inglês, mas também estendeu consideravelmente suas propostas. Este projeto dedicou-se a descobrir as propriedades descritivas para a modelagem, avaliação e implementação de sistemas. As redes de Petri representaram a maior porção deste projeto, que apresentou estas redes como, por si só, redes seguras. Isto leva a um considerável volume de trabalho a respeito de grafos e sistemas de ocorrência, uma abordagem para a representação e análise de seqüências de disparos que se aplica somente a redes seguras. Estes resultados foram publicados no relatório final deste projeto, em 1968, e em um outro relatório, intitulado “Events and Conditions”, em 1970, que marca o início da teoria de redes de Petri. Neste segundo relatório, são apresentados os fundamentos do trabalho de A.W. Holt, chamado “Sistemática”, no desenvolvimento de uma ciência de informação e sistemas. Além disto, redes de Petri foram definidas e ilustradas, assim como grafos marcados e máquina de estados. Ambos os trabalhos mostraram como as redes de Petri poderiam ser aplicadas na modelagem e análise de sistemas de componentes concorrentes.

O trabalho de Petri também despertou a atenção do projeto MAC no Massachusetts Institute of Technology (MIT). O grupo de estruturas computacionais, sob a direção do professor Jack B. Dennis, vem sendo a fonte de consideráveis pesquisas e publicações sobre redes de Petri, publicando diversas dissertações de pós-graduação e numerosos artigos e relatórios. Duas importantes conferências sobre redes de Petri

foram organizadas pelo grupo de estruturas computacionais: a Conferência do Projeto MAC sobre Sistemas Concorrentes e Computação Paralela, em 1970 em Woods Hole, e a Conferência sobre Redes de Petri e Métodos Relacionados, em 1975 no MIT. Ambas as conferências ajudaram a disseminar os resultados e abordagens da teoria de redes de Petri.

A utilização e o estudo das redes de Petri espalhou-se amplamente nos últimos anos. Um workshop sobre redes de Petri foi realizado em Paris em 1977 e um curso avançado da teoria de redes em geral em Hamburg, em 1979.

Atualmente, praticamente qualquer evento na área de sistemas, engenharia, existe a apresentação de trabalhos que envolvem as redes de Petri comprovando seu potencial na concepção e avaliação de sistemas.

