

ARNALDO LUÍS SANTOS PEREIRA

Intervenções operacionais visando a regularidade e a eficiência de sistemas de ônibus urbanos: resenha de estudos acadêmicos e simulação de aplicações com dados reais

**São Paulo
2018**

ARNALDO LUÍS SANTOS PEREIRA

Intervenções operacionais visando a regularidade e a eficiência de sistemas de ônibus urbanos: resenha de estudos acadêmicos e simulação de aplicações com dados reais

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

**São Paulo
2018**

ARNALDO LUÍS SANTOS PEREIRA

Intervenções operacionais visando a regularidade e a eficiência de sistemas de ônibus urbanos: resenha de estudos acadêmicos e simulação de aplicações com dados reais

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

**Área de Concentração:
Engenharia de Transportes - Informações
Espaciais**

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte

**São Paulo
2018**

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

Catálogo-na-publicação

Pereira, Arnaldo Luís Santos

Intervenções operacionais visando a eficiência e a regularidade de sistemas de ônibus urbanos: resenha de estudos acadêmicos e simulação de aplicações com dados reais / A. L. S. Pereira -- São Paulo, 2018.

218 p.

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

1. Transporte Público 2. Sistemas de Ônibus 3. Operação 4. Sistemas Inteligentes de Transporte 5. Intervenções Operacionais I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu pai e minha mãe que, quando eu tinha 8 anos, me deram o livro “Reinações de Narizinho” e desde então, nunca mais parei de ler.

A minha mulher Mônica e meu filho Pedro que me incentivaram, apoiaram e, principalmente, me suportaram durante todo esse período desgastante, porém enriquecedor.

Ao Professor Cláudio Luiz Marte por me abrir tantas portas do conhecimento, por sua paciência e apoio permanente.

Ao colega Claudio de Senna Frederico, amigo antigo, que me acompanhou também nestes anos de aprendizado geriátrico.

Aos colegas de Mestrado Edson Hilios, pelo contínuo intercâmbio de ideias e conhecimentos.

Aos colegas da Graduação, meus pré-colegas, Pedro Fernandes, Daniela Penteadó, Marcel Cavalcanti e Thays Pires pela ajuda durante o processo de simulação e análise. Um muito obrigado especial para Rebeca Wang, competente, dedicada e incansável na pilotagem do VISSIM.

Ao colega Renato Arbex, pelo inestimável apoio na cessão dos dados para esta Dissertação.

À Companhia de Engenharia de Tráfego - CET-SP, à SPTrans e à Scipopulis pelo fornecimento de dados preciosos para a realização deste trabalho.

Aos Professores da Escola Politécnica, em especial os do Departamento de Transporte, que muito contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância.

(John Kennedy)

RESUMO

O ônibus ainda é o modo de transporte público mais usado nas cidades brasileiras, mesmo aquelas que contam com sistemas sobre trilhos extensos. Já centenários, os sistemas de ônibus urbanos ainda se debatem na peleja diária da competição com os demais veículos e na busca de uma imagem mais favorável perante a seus usuários e à população. O advento do ferramental de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) ofereceu a oportunidade de que esses sistemas pudessem contar com instrumentos de Planejamento, Programação, Monitoração e Controle Operacional próximos àqueles que os sistemas metroferroviários já dispõem há muitas décadas. Entre os vários avanços proporcionados pelo emprego de ITS no campo operacional, destacam-se as intervenções operacionais em tempo real, isto é, a aplicação de medidas que buscam oferecer ou restabelecer a regularidade e a eficiência da operação dos ônibus urbanos frente a contingências que eles enfrentam diariamente. Este trabalho objetiva fazer uma resenha das diversas opções de intervenções estudadas no campo acadêmico e executar simulações de três modalidades dessas estratégias. Foi construída uma rede reproduzindo um trecho de Corredor de ônibus na cidade de São Paulo e simulada a operação de uma linha de alta demanda, com base nos dados reais da operação, do trânsito (semáforos) e velocidades de percurso dos ônibus. A simulação, por sua vez, permitiu apurar os benefícios propiciados pelas intervenções testadas, chegando aos ganhos de tempos nas viagens e o possível aumento de oferta de veículos sem aumento da frota. Além de comparar os resultados entre os tipos de intervenção, foi verificada a sensibilidade dos resultados de cada estratégia a mudanças na intensidade de sua aplicação. Os resultados enquadram-se na faixa dos resultados obtidos nos diversos experimentos acadêmicos analisados. Dentro das expectativas, a intervenção das Meias Viagens (*“deadheading”*) apresentou melhores resultados nos ganhos de tempos de viagem variando entre 8,5% e 12,9%, secundados pelas Paradas Limitadas (*“skip-stop”*) variando entre 2,9% e 4,7%, enquanto a Linha Expressa apresentou resultados menores, motivados, principalmente, pelas limitações da extensão do trecho analisado.

Palavras-Chave: Engenharia de Transporte; Operações de Transportes; Transporte Urbano; Sistemas Inteligentes de Transporte; Sistemas de Ônibus Urbanos.

ABSTRACT

Buses are still the most common transit mode in Brazilian cities even in those that count with extensive rail systems. Century old city bus operations still struggle daily to compete with other road vehicles while trying to gain a better image before its users and the general public. The arrival of Intelligent Transportation System (ITS) solutions brought to these systems the opportunity of counting on Operational Planning, Programming, Monitoring and Control like those already used by rail transit for decades. Among several improvements possible using ITS real time intervention during operation stands out. This enables the application of measures to offer or restore regularity and efficiency of bus services in face of contingencies faced daily. This paper aims to review different options of intervention reported in academic publications and to perform simulations of three of these strategies. A network was modeled duplicating a real Sao Paulo bus corridor section on which a high demand bus line operation, based on actual operation data, traffic, traffic lights and bus speeds, was studied. The simulation, in turn, allowed us to assess the benefits of each alternative intervention tested by determining travel time gains and the increase in bus service supply without increasing the operating fleet. Besides comparing results between intervention types the sensitivity of each one's results to strategy application intensity was also reached. The final experiments results fall within the range of those obtained in several other academic studies analyzed.

Within the expectations, the deadheading intervention presented better results in travel time gains ranging from 8.5% to 12.9%, followed by the skip-stop, ranging from 2, 9% and 4.7%, while the Express Line presented lower results motivated, mainly, by the limitations of the extension of the analyzed section

Keywords: Transportation Engineering; Transportation Operations; Urban Transportation; Intelligent Transportation Systems; Urban Bus Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Projeto de Redes Divisão em Etapas e suas Inter-relações	35
Figura 2 - Plano de Rede - Mapa Conceitual - Estrutura.....	41
Figura 3 - Plano de Redes - Mapa Conceitual - Resumo de Etapas e Produtos.....	45
Figura 4 - Paradas Forçadas Dinâmicas - Eberlein (1995) - Rede empregada.....	53
Figura 5 - Linhas Zonais - Representação esquemática	64
Figura 6 - (YANG et al., 2013) - Estratégia de TSP - Cenário 4 - Fluxograma Lógica	125
Figura 7 - Corredor Estudado (PERON, 2017) - Trecho, Cenários e Local. Censores	132
Figura 8 - Contr. Velocidades - Lizana et al (2009) - Aplicativo - Tela do Tablet.....	135
Figura 9 - Tyne and Wear - UK - Faixas para Ônibus e Faixas Sem Automóveis...	148
Figura 10 - Corredor Nove de Julho - Santo Amaro - Trecho selecionado e estações	173
Figura 11 - Metodologia nas simulações - Fluxograma geral do Método	179
Figura 12 - Montagem da Rede - Representação Esquemática.....	180
Figura 13 - Plano Simulação - Linha Sem Intervenção L10 - Embs. Desembs. HPM	183
Figura 14 - Meias Viagens - 1 Partida SEM serviço - 1 Partida COM serviço	184
Figura 15 - Meias Viagens - 1 Partida SEM serviço - 2 Partidas COM serviço	185
Figura 16 - Meias Viagens - 2 Partidas SEM serviço - 1 Partida COM serviço	186
Figura 17 - “Skip-Stop” - 1 Partida SEM serviço 2 Estações - 1 Part. COM serviço	187
Figura 18 - “Skip-Stop” - 1 Partida SEM serviço 3 Estações - 1 Part. COM serviço	188
Figura 19 - “Skip-Stop” - 1 Partida SEM serviço 2 Estações - 2 Partidas COM serviço	189
Figura 20 - “Skip-Stop” - 2 Partidas SEM serviço 2 Estações - 1 Partida COM serviço	190
Figura 21 - Linha Expressa - 1 Partida Expressa - 1 Partida Serviço Normal	192
Figura 22 - Linha Expressa - 1 Partida Expressa - 2 Partidas Serviço Normal	192
Figura 23 - Simulação - Meias Viagens e “Skip-Stop” - Fluxograma processamento	194
Figura 24 - Simulação no VISSIM - Reprodução Parcial de Relatório do Sistema..	194
Figura 25 - Meias Viagens e “Skip-Stop” - Fluxograma Cálculo Oferta de Frota.....	195

Figura 26 - Planilha Padrão para Cálculo dos Horários de Chegada dos veículos. 196

Figura 27 - Simulação no VISSIM - Linha Expressa - Fluxograma do Processamento
..... 196

Figura 28 - Simulação VISSIM - Linha Expressa - Fluxograma Cálculo Benefícios 197

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Agrupamento de Veículos Gráfico tempo x distância	47
Gráfico 2 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Red. Custo x Tamanho HI	57
Gráfico 3 - Paradas Forçadas - Zhao et al (2003) - Red. Custos x “headway”	59
Gráfico 4 - Paradas Forçadas - Zhao et al (2003) - Tpos. Médios Espera x “headway”	59
Gráfico 5 “Skip-Stop” - Chiraphadhanakul and Barnhart (2013) - Resultados 1.....	69
Gráfico 6 - “Skip-Stop” - Chiraphadhanakul and Barnhart (2013) - Resultados 2.....	69
Gráfico 7 - “Skip-stop” - Fu, Liu e Calamai (2003) - Sensibilidade Níveis Demanda .	78
Gráfico 8 - “Skip-stop” - Fu, Liu e Calamai (2003) - Sensibilidade Var. Velocidade ..	79
Gráfico 9 - “Skip-stop” - Sun e Hickman (2005) Estrat. Básica x Alternativa	82
Gráfico 10 - Meias Viagens Furth (1985)- Frotas x “headways”	87
Gráfico 11 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Sist. “F” x Sist. “G” - Redução Custo..	91
Gráfico 12 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Sist. “F” x Sist. “G” - Veículos em MV.	91
Gráfico 13 - Ônibus Extras (YU et al., 2015) - Resultados- Variação conforme valor HI.....	97
Gráfico 14 - Ônibus Extras (YU et al., 2015) - Resultados - Tempos Espera Passags.	98
Gráfico 15 - Ônibus Extras (YU et al., 2015) - Results. por Cenário - Tempos Espera	99
Gráfico 16 - Ônibus Noturnos SPTrans - Resultados - Pontualidade de Partidas...	110
Gráfico 17 - Ônibus Noturnos SPTrans -Demandas - Compar. 1º e 2º trims. 2015- 2016	110
Gráfico 18 - Contr. Velocidades Teng, Jin (2015) - Desvios “headways” Linhas Ônibus.....	139
Gráfico 19 - Teng, Jin (2015) - Controle de Velocidade - Representação esquemática	140
Gráfico 20 - Teng, Jin (2015) - Desvios dos “headways” - Resultados do controle	142
Gráfico 21 - S.Paulo - Velocidades por Sistema Ônibus - Pico Manhã 2014-2017 .	146
Gráfico 22 - Aplicação de “Holding” mais Ultrapassagens - Gráficos Tempo-distância	156
Gráfico 23 - Aplicação de “Holding” mais Ultrapassagens - Resultados ao longo linha	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planos de Redes -Divisão do Planejamento em Etapas.....	34
Tabela 2 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. “F”- COM Restrição	54
Tabela 3 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. “F” - SEM Restrição.....	55
Tabela 4 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. “G” COM Restrição	56
Tabela 5 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. “G” SEM Restrição	56
Tabela 6 - Paradas Forçadas - Delgado et al (2009) - Tempos de Viagem.....	61
Tabela 7 - “Skip-Stop” - Larrain, Giesen e Muñoz (2010) - Resultados por Cenário	71
Tabela 8 - “Skip-Stop” - Feng, Wen-tao e Dian-hai (2010) - Serviço Local x “Skip- stop”.....	73
Tabela 9 - “Skip-stop” - Eberlain (1995)Serviço Local x “Skip-stop” - Sist. “F”	74
Tabela 10 - “Skip-stop” - Eberlain (1995) - Serviço Local x “Skip-stop” - Sist. “G”	75
Tabela 11 - “Skip-stop” - Eberlain (1995) - Trechos com limitação - Sist. “G”	75
Tabela 12 - “Skip-Stop” - Eberlain (1995) Meias Viagens x “Skip-stop” - Sist. “G” ...	76
Tabela 13 - “Skip-stop” - Fu, Liu e Calamai (2003) - “Skip-stop”+“Holding” - Results	79
Tabela 14 - “Skip-stop” - Sun e Hickman (2005) - Parâmetros da simulação	81
Tabela 15 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Frotas segundo HI.....	88
Tabela 16 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Green Line - Sistema “F” - Teste 1.....	89
Tabela 17 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Green Line - Sistema “F” - Teste 2.....	89
Tabela 18 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Sist. “G” - MV adjacentes segundo HI	90
Tabela 19 - Meia Viagem - Liu et al (2013) - Resultados - Estações atendidas por padrão	94
Tabela 20 - Ônibus Noturnos SPTrans - Níveis Atuação por Dispon. Equipamentos	107
Tabela 21 - TSP - Gardner et al (2009) - Cidades com TSP - Principais dados	121
Tabela 22 - TSP (YANG et al., 2013) - Resultados das Simulações	126
Tabela 23 - TSP (GARDNER et al., 2009) - Cidades com TSP - Resultados Relatados.....	131
Tabela 24 - Faixas Exclusivas - S. Paulo - Implantações Período 2012-2015.....	145

Tabela 25 - Corredores e Faixas Exclusivas - 12 Capitais BR - Implantações até 2018	146
Tabela 26 - Aplicação de “Holding” mais Ultrapassagens - Resultados Testes	158
Tabela 27 - Ultrapassagens - Comparat. “sem” x “com” ultraps. por volume ônibus	161
Tabela 28 - Tempos de Embarque e Desembarque - Dados de Estudos anteriores	163
Tabela 29 - Tipos Bilhetagem e Validação - Tempos Embarque e Desembarque ..	165
Tabela 30 - Tempos Embarque e Desembarque - Resultados por tipo de pagamento	166
Tabela 31 - Linha 6913-10 - Varginha - Terminal Bandeira - Características Frota	174
Tabela 32 - Seleção de Intervenções - Critérios e Premissas.....	176
Tabela 33 - Plano de Simulação - Intervenções adotadas - Modalidades e Sub-linhas	182
Tabela 34 - Resultados da Simulação VISSIM - Meias Viagens - Tempos específicos e Tempos Totais em cada Sub-linha.....	201
Tabela 35 - Simulação VISSIM - Meias Viagens - Potencial Aumento da Oferta....	203
Tabela 36 - Resultados Simulação no VISSIM – “Skip-Stop” Tempos específicos e Tempos Totais em cada Sub-linha.....	205
Tabela 37 - Simulação VISSIM – “Skip-Stop” - Resultados - Aumento da Oferta ...	207
Tabela 38 - Resultados Simulação no VISSIM - Linha Expressa Tempos específicos e Tempos Totais em cada Sub-linha.....	209
Tabela 39 - Simulação no VISSIM - Linha Expressa - Resultados Aumento Oferta	211
Tabela 40 - Linha Expressa - Benefícios - Sub-Linhas L31c e L32c.....	212
Tabela 41 - Linha Expressa - Benefícios - Sub-Linhas L33c, L34c e L35c	212

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético
APC	Contadores Automáticos de Passageiros (" <i>Automatic Passenger Counter</i> ")
AVI	Identificador Automático de Veículos (" <i>Automatic Vehicle Identification</i> ")
AVL	Localizador Automático de Veículos (" <i>Automatic Vehicle Location</i> ")
BPR	Bureau of Public Roads - EUA
CCO	Centro de Controle Operacional
COV	Coeficiente de Variação (" <i>Coefficient of Variation</i> ")
DAI	Inteligência Artificial Distribuída (" <i>Distributed Artificial Intelligence</i> ")
EBTU	Empresa Brasileira de Transportes Urbanos
FIFO	First In, First Out - Critério para o processamento de filas (Tecnologia da Informação)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (" <i>Global Positioning System</i> ")
IPK	Índice de Passageiro por Quilômetro
ITS	Sistemas Inteligentes de Transporte (" <i>Intelligent Transportation Systems</i> ")
MAS	Sistemas Multiagentes (" <i>Multiagent Systems</i> ")
MV	Meia-viagem (" <i>deadheading</i> ")
PDV	Passageiros por Veículo por Dia
SNTU	Sistema Nacional de Transportes Urbanos
WAN	Rede de Longa Distância (" <i>Wide Area Network</i> ")

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	OBJETIVO PRINCIPAL	18
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3.	ANTECEDENTES - A EVOLUÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS NAS CIDADES BRASILEIRAS	19
1.3.1.	O advento dos Corredores de Ônibus	21
1.3.2.	O ferramental de ITS.....	23
1.3.3.	Intensidade de uso do ferramental de ITS.....	24
1.3.3.1.	Projeto das Redes	25
1.3.3.2.	Especificação dos Serviços	25
1.3.3.3.	Monitoração e Controle da Operação.....	25
1.3.4.	O advento dos BRT - Bus Rapid Transit.....	26
1.3.5.	A Reestruturação das Redes de Ônibus em Algumas Capitais Brasileiras	29
1.4.	O TRANSPORTE PÚBLICO EM GRANDES CIDADES DE PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO	31
1.5.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	32
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1.	CONCEITUAÇÃO E ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE UMA REDE DE TRANSPORTE	33
2.1.1.	Etapa de Projeto da Rede.....	36
2.1.2.	Etapas de Configuração das Frequências e elaboração das Tabelas Horárias	38
2.1.3.	Etapas de Programação da Frota, Programação das Tripulações e Escalas das Equipes	39
2.1.4.	Etapa de Monitoração e Controle Operacionais	39

2.2.	INTERVENÇÕES A PARTIR DA MONITORAÇÃO E DO CONTROLE OPERACIONAIS	41
2.2.1.	Regularidade e Agrupamento de Veículos (“Bunching”)	45
2.3.	INTERVENÇÕES NAS ESTAÇÕES	48
2.3.1.	Paradas forçadas para regulação (“holdings”) -	48
2.3.1.2.	Paradas Forçadas Dinâmicas (dados em tempo real)	50
2.3.2.	Serviços com Paradas Limitadas (“skip stops”)	64
2.3.2.1.	Conceitos e origens.....	64
2.3.2.3.	Modelos de Limitação Dinâmica de Paradas	73
2.3.3.	Meias Viagens (“deadheading”)	85
2.3.3.1.	Conceito	85
2.3.3.2.	Trabalhos Seleccionados	85
2.3.4.	Inserção de ônibus extras	94
2.3.4.1.	Trabalhos Seleccionados	95
2.4.	INTERVENÇÕES ENTRE ESTAÇÕES.....	111
2.4.1.	Prioridade Semafórica para ônibus - TSP	112
2.4.1.1.	Conceituação Básica.....	112
2.4.1.2.	Cruzamentos isolados (GARDNER et al., 2009)	112
2.4.1.3.	Sistemas Coordenados (GARDNER et al., 2009)	113
2.4.1.4.	Tipos de prioridade.....	115
2.4.1.5.	Aplicações da TSP	119
2.4.1.6.	Questionamentos Técnicos	121
2.4.1.7.	Resultados - Trabalhos Seleccionados	123
2.4.1.8.	Conclusões Parciais.....	133
2.4.2.	Controle de velocidades	133
2.4.2.1.	Resultados - Trabalhos seleccionados	134
2.5.	FACILIDADES DA INFRAESTRUTURA	143

2.5.1.	Segregação de faixas ou vias para os ônibus	144
2.5.1.1.	O caso da cidade de São Paulo	144
2.5.1.2.	Faixas Exclusivas de Ônibus x Faixas sem Automóveis	148
2.5.1.3.	Faixas de Veículos com Alta Ocupação - HOV na sigla em inglês	151
2.5.1.4.	Experiência em Bangkok, Tailândia.....	152
2.5.2.	Ultrapassagens	153
2.5.2.1.	Trabalhos Seleccionados	154
2.5.3.	Bilhetagem Desembarcada	161
2.6.	CONCLUSÕES PARCIAIS	166
3.	METODOLOGIA	169
3.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	169
3.2.	O PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO OBJETO DA SIMULAÇÃO	169
3.2.1.	Escolha da cidade.....	169
3.2.2.	Escolha do Serviço.....	171
3.2.3.	Seleção do trecho e da linha a serem simulados	172
3.2.4.	Coleta de Dados.....	174
3.2.5.	Seleção das Intervenções Operacionais a serem simuladas	175
3.2.6.	Seleção do Sistema de Simulação	177
3.3.	METODOLOGIA EMPREGADA NAS SIMULAÇÕES.....	178
3.3.1.	Objetivos	178
3.3.2.	Método e Critérios Gerais	178
3.3.3.	Montagem da Rede	179
3.3.3.1.	Premissas adotadas	179
3.3.3.2.	A inserção do trecho simulado no conjunto da Linha.....	180
3.3.3.3.	A Necessidade de criação de Sub-linhas	181
3.3.4.	Plano de Simulação - Intervenções a serem testadas, suas variações e regimes operacionais.....	181

3.3.5.	Criação das Sub-linhas para as Simulações	183
3.3.5.1.	Meias Viagens.....	184
3.3.5.2.	Limitação de Paradas - “Skip-Stop”	186
3.3.5.3.	Linha Expressa no Sentido Centro-Bairro	190
3.3.6.	Calibração da Rede	193
3.3.7.	Execução das simulações	193
3.3.7.1.	Simulações das Intervenções Meia Viagem e “Skip-Stop”	193
3.3.7.2.	Simulações da Intervenção Linha Expressa.....	196
3.3.8.	Considerações finais	197
4.	RESULTADOS	199
4.1.	MEIAS VIAGENS	199
4.1.1.	Redução de Tempos de Percurso.....	199
4.1.2.	Aumento de Oferta	202
4.2.	LIMITAÇÃO DE PARADAS (“SKIP-STOP”)	204
4.2.1.	Redução nos Tempos de Percurso.....	204
4.2.2.	Aumento de Oferta	206
4.3.	LINHA EXPRESSA	207
4.3.1.	Redução nos tempos de viagem.....	208
4.3.2.	Aumento de oferta.....	210
4.3.3.	Benefícios - Ganhos de tempos de viagem pelos passageiros	211
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	212
5.	CONCLUSÕES	214
5.1.	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	217
	REFERÊNCIAS	218

1. INTRODUÇÃO

Embora redundante no cenário técnico, há que ser lembrado o quadro de externalidades negativas que a mobilidade provoca na economia das grandes cidades.

Também é generalizada a percepção de que se esgotou o modelo de divisão modal com privilégios para o automóvel e a conseqüente busca por mais infraestrutura para o transporte individual: além dessa oferta não atender à demanda, o fenômeno é progressivo, ou seja, a velocidade de crescimento da demanda é muito superior à velocidade de crescimento da oferta. Este fenômeno vem sendo constatado há décadas.

Em contraposição, muitos centros urbanos, especialmente em países desenvolvidos, a par de melhorar seus serviços de transporte público, promovem restrições ao uso do automóvel, como são os casos, entre outros, de Londres na Inglaterra, Estocolmo na Suécia e na cidade-país Cingapura.

Nos países em desenvolvimento, por sua vez, a implantação de sistemas de alta capacidade é custosa e demorada. Embora ela deva ser feita, torna-se necessária a racionalização e modernização dos demais sistemas de transporte. Nos países desenvolvidos, em boa parte dos casos, os sistemas de ônibus apresentam funções complementares aos sistemas de alta capacidade. Já nos países em desenvolvimento o ônibus acaba por cumprir o papel, da melhor maneira possível, de atendimento das demandas mais altas.

A partir de meados da década de 1990 o ferramental de ITS, que até então eram presentes mais acentuadamente nos sistemas de transporte metroferroviários, passaram a alargar significativamente os horizontes técnicos dos sistemas de ônibus e abriram caminho para os Bus Rapid Transit - BRT, que elevaram a capacidade desses sistemas para o nível médio e, em alguns poucos casos, para o nível de alta capacidade.

Os países em desenvolvimento travam, atualmente, uma batalha contra o tempo para incorporar e desenvolver os instrumentos de ITS no sentido de aumentar a capacidade e os níveis de serviço de operação dos ônibus urbanos. Essa busca não se restringe à mera aquisição de equipamentos e sistemas, mas também, se não prioritariamente, em várias outras frentes, a organização das redes, a capacitação de pessoal, a organização das áreas técnicas e operacionais de órgãos gestores e

de operadores e a adaptação de métodos operacionais que contribuam para esse esforço.

Com o advento dos sistemas de ITS a Engenharia de Transportes desenvolveu, com bastante rapidez, uma série de experiências acadêmicas visando a melhoria do desempenho operacional dos ônibus, em especial na regularidade, da qual decorrem menores tempos de viagem e conseqüentemente, melhoria da capacidade dos sistemas.

1.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Tendo em vista os aspectos discutidos no caput deste Capítulo, a presente dissertação tem por objetivo resenhar as intervenções operacionais dedicadas à manutenção ou restabelecimento da eficiência e da regularidade dos sistemas de ônibus, analisando os resultados da aplicação de três modalidades de intervenção num trecho de Corredor de Ônibus na cidade de São Paulo-SP.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O Objetivo Principal pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

- a) Traçar um panorama dos sistemas de ônibus nos grandes centros do Brasil e de outros países em desenvolvimento.
- b) Proceder ao levantamento e classificação de diversas experiências encontradas na literatura técnica.
- c) Proceder a análise quantitativa de três modalidades de intervenção operacional dirigidas ao aumento da oferta sem aumento da frota e na redução dos tempos de viagem, nas condições em que a operação dos ônibus é feita num grande centro urbano brasileiro. Por trabalhar com intervenções possíveis a partir dos recursos de Controle Operacional, em princípio passíveis de aplicação por gestores e operadores dos sistemas de ônibus urbanos nas cidades médias e grandes, os trabalhos pertencentes a este grupo constituem o foco da presente Dissertação.

1.3. ANTECEDENTES - A EVOLUÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS NAS CIDADES BRASILEIRAS

A melhor compreensão do quadro atual dos Sistemas de Transporte Público por Ônibus, nos centros urbanos de maior porte no Brasil, pode iniciar pelo conhecimento do ambiente em que se deu sua formação e evolução.

É possível afirmar que até o término da II Guerra Mundial os bondes eram soberanos nos transportes públicos urbanos nas maiores cidades brasileiras. Até então os ônibus, não obstante sua introdução na distante década de 1910, desempenhavam função complementar à dos bondes para os deslocamentos nas cidades.

Segundo Vasconcellos e Mendonça (2010) a aceleração da urbanização da população observada no país após a II Guerra Mundial e a implantação da indústria automobilística a partir de 1956 conjugaram-se no desencadeamento de um processo de motorização do transporte urbano com o uso de ônibus e automóveis.

Verifique-se a primeira constatação de Vasconcellos e Mendonça (2010): Milton Santos (1993) mostra que a taxa de urbanização da população brasileira saltou de 26,35% em 1940 para 68,86% em 1980, chegando a 77% em 1993, ano da edição do livro citado.

Embora a motorização da mobilidade do país já viesse crescendo, foi no Governo Juscelino Kubitschek (1956-1961) que ocorreu o salto mais expressivo neste sentido. A Presidência da República foi assumida com o lema dos “50 anos em 5” e o discurso da modernização e transformação da economia. Logo após a posse foi publicado o Programa de Metas publicado pelo Ministério do Planejamento em 1956 apud (FARO; SILVA, 1991) .

No setor de transportes, o plano alinhava metas que convergiam para o estabelecimento de uma extensa rede rodoviária com 10 mil quilômetros de novas rodovias , enquanto, para a indústria automobilística, era prevista a produção de 170.000 veículos em 1960 (FARO; SILVA, 1991). Os mesmos autores mostram que as metas citadas foram suplantadas: construíram-se 14.970 km de rodovias e fabricaram-se 199.180 unidades de veículos.

Estava consolidado o “rodoviarismo”¹: da nova Capital federal em Goiás (sua implantação também era uma das metas do plano) foram irradiados os grandes eixos rodoviários que impulsionariam a então chamada Integração Nacional.

Não foi encontrada, na bibliografia consultada, nenhuma referência a uma conjunção de fatores que provavelmente foi levada em consideração na formulação da estratégia do Programa de Ações: na implantação de ferrovias, o investidor, no caso o setor público, arca com os investimentos de infraestrutura mais material rodante e sistemas. Já nas rodovias, o investimento por conta do setor público restringe-se à infraestrutura e sistemas, enquanto o material rodante é arcado pelo transportador privado. Ao dar preferência ao transporte rodoviário lato senso, o Plano permitiu a construção de mais quilômetros de rodovias do que conseguiria com ferrovias. Entende-se que tal observação desclassifica opiniões muitas vezes encontradas em noticiários e mesmo artigos técnicos, de que a opção por transporte rodoviário foi uma ação desprovida de lógica, isto é, um movimento meramente “empurrado” pela indústria. Houve uma lógica naquela decisão. Se suas consequências a longo prazo foram perversas, a decisão pode ter sido equivocada, mas não desprovida de lógica. Diferentemente dos modelos de transporte público urbano então praticados nos países da América Latina, da Ásia e da África, no Brasil, a partir da década de 1960, o serviço passou a ser regido por um modelo regulamentado em que o Estado define as condições da prestação dos serviços (linhas, tipos de veículos, frequência, tarifa, etc.) enquanto a operação é exercida, hoje com poucas exceções, por empresas privadas (VASCONCELLOS; MENDONÇA, 2010).

Não obstante esse avanço regulatório, o modelo de delegação continuou a ser feito com base em permissões precárias aplicadas por linhas e adicionadas sucessivamente ao sistema ao longo do tempo. O resultado foi a proliferação de linhas partindo diretamente das regiões periféricas e semiperiféricas com destino aos centros das cidades. As principais vias passaram a receber numerosos conjuntos de linhas concorrendo na mesma via.

Deve-se observar que os ônibus concorreram ativamente para o processo de “espraiamento” urbanístico das cidades de maior porte. As populações de baixa

¹ O termo rodoviarismo não é encontrado no Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa (HOUAISS; VILLAR, 2001). É, todavia, empregado, com alguma frequência, na literatura técnica dedicada aos transportes. “Rodoviarismo” pode ser definida, basicamente, como uma linha de ideias de grupos que defendiam e defendem os meios de transporte sobre pneus, isto é, transitando pelos sistemas viários urbanos e rodoviários.

renda procuravam terrenos de baixo custo para solução de seu problema habitacional que, de sua parte, situavam-se nos extremos periféricos das cidades. Pelas dificuldades técnicas e custos elevados para sua implantação, os bondes não foram capazes de atender às novas e rarefeitas demandas.

No início da década de 1970 já eram sentidos os primeiros sintomas de congestionamento do trânsito nos grandes centros urbanos. Neste período, começaram a ser implantados sistemas de alta capacidade sobre trilhos, mais particularmente em São Paulo (1974) e no Rio de Janeiro (1979). Com o advento destes serviços, emergiu a necessidade de sua integração com linhas de ônibus que foram, principalmente no caso de São Paulo, seccionadas para alimentar o Metrô. As primeiras linhas de integração em São Paulo foram implantadas no ano de 1975. Enquanto nas duas cidades as integrações foram implantadas com pouca ou nenhuma afinidade com os Planos Urbanísticos então existentes, na mesma época, em Curitiba (AUGUSTO, 2015), a partir do Plano Preliminar de Urbanismo, o sistema de transporte coletivo na cidade começa a ser implantado (1974), integrado ao sistema viário e em conformidade com o uso do solo.

Como é de conhecimento no meio técnico, o sistema de Curitiba pode ser considerado o embrião dos sistemas estruturados de ônibus e dos então futuros Corredores de Ônibus que, por sua vez, precederam os Bus Rapid Transit - BRT.

1.3.1. O advento dos Corredores de Ônibus

Entre 1977 e 1982, foram várias as iniciativas dedicadas à melhoria dos sistemas de ônibus, como, por exemplo: implantação de três Corredores de Ônibus em Porto Alegre; implantação de Faixas Exclusivas de Ônibus nas avenidas de maior movimento e o primeiro Corredor (Paes de Barros) em São Paulo; a consolidação do Sistema de ônibus de Curitiba; e o Projeto do Ônibus PADRON que veio a tornar-se referência na fabricação de carrocerias.

Na mesma época, nos Estados Unidos, foram implantadas as “busways”, faixas destacadas das grandes “freeways” e tornadas exclusivas para o uso de ônibus ligando os subúrbios pouco densos aos centros das cidades. (HEDDEBAUT et al., 2010).

A partir da segunda metade da década de 1980 cresceu o número de Corredores de ônibus implantados, que representaram uma tentativa de aumentar a capacidade de trechos dos sistemas, elevando-a para o nível de média capacidade.

O advento no Brasil dos sistemas de alta e média capacidade, trouxe consigo a necessidade de ser provida a integração física e tarifária inter e intrasistemas. Os corredores foram implantados predominantemente em eixos de grande afluência de veículos.

Em muitos Corredores de Ônibus, raramente os requisitos fundamentais para seu bom funcionamento foram contemplados integralmente. Entre os aspectos negativos podem ser destacados: a falta de reorganização do sistema (linhas, itinerários e integração), programação e controle operacionais deficientes, a falta de coordenação entre os órgãos atuando sobre a via; a intermitência entre trechos com e sem segregação viária.

Um aspecto relevante trazido pelos sistemas de alta e média capacidade foi a necessidade de organização dos sistemas de ônibus, aí incluída sua operação.

Embora com diferenças marcantes, as ações em Curitiba e São Paulo guardam pelo menos uma analogia. Nos dois casos foram criados sistemas de média (Curitiba) e alta (São Paulo) capacidades. Eles previram, no caso de Curitiba e provocaram, no caso de São Paulo, a necessidade de linhas alimentadoras. Enquanto em Curitiba a geração dessa necessidade fez parte do Planejamento, em São Paulo ela deu-se de modo mais espontâneo, para não dizer forçado. Os sistemas de alta e média capacidade não são independentes em termos de demandas - dependem, em boa parte, da integração (alimentação). Já os sistemas de baixa capacidade não dependeriam dos serviços estruturais, mas sem eles tornam-se ineficientes e apresentam baixos níveis de serviço. Mais uma oportunidade e motivo para a organização dos serviços.

Assim teve origem o que se pode chamar de "hierarquização de linhas". Trata-se de dividir os serviços em tipos distintos de linhas que atendem a objetivos diferentes, embora sejam complementares entre eles. As redes resultantes são chamadas por diversos nomes: Redes Estruturadas, Redes Tronco-Alimentadas, Redes Troncais, Redes Integradas, etc.

Os modos de maior capacidade são voltados aos principais corredores de transporte. A demanda menor e mais pulverizada, típica das extremidades periféricas do sistema, são atendidas pelos sistemas de baixa capacidade com veículos e extensões de linhas menores. À medida em que o usuário se aproxima das áreas mais adensadas da cidade, os sistemas que o atendem são mais robustos e dispõem de privilégios (vias segregadas, veículos maiores, maior velocidade

comercial, etc.) que resultam em maior capacidade de transporte e maior velocidade comercial.

1.3.2. O ferramental de ITS

A segunda metade da década de 1990 foi marcada pelo advento das ferramentas de ITS no mercado de sistemas de ônibus que ampliou os horizontes de planejamento, programação e operação desses sistemas.

Este ferramental desempenhou função relevante na transformação dos sistemas de ônibus urbanos, de simples modos de transporte de baixa capacidade que, circunstancialmente, passaram a atender demandas que comportariam modos mais capazes (no sentido de maior capacidade), para sistemas de média e mesmo alta capacidades.

Cabe, neste ponto, uma comparação dos ônibus com os sistemas metroferroviários. Por necessidades de segurança, muito cedo os sistemas ferroviários foram objetos de sucessivos desenvolvimentos tecnológicos em sua operação.

Suas características físicas e operacionais demandavam, por segurança, a permanência de um único trem em um trecho determinado de via. Já por volta de 1860 surgiram, na Grã-Bretanha os primeiros dispositivos mecânicos de segurança (intertravamentos). O desenvolvimento de tecnologias nesse setor foi permanente. Em 1974, quando o Metrô de São Paulo iniciou suas operações, já contava com sofisticados (para a época) conjuntos de equipamentos e sistemas que são descritos em detalhes por Alouche e Nakagawa (2012):

Como as ferramentas de ITS direcionadas aos ônibus surgiram muito após àquelas dos sistemas metroferroviários, as mais rápida e intensamente adotadas foram aquelas cujos resultados eram mais sensíveis a operadores e gestores: os sistemas de bilhetagem eletrônica. Martinelli e Aroucha apontam como provável primeiro sistema de bilhetagem eletrônica bem sucedido no Brasil o de Campinas-SP em 1997 (MARTINELLI; AROUCHA, 2012).

Tais sistemas inicialmente eram voltados ao disciplinamento do uso de descontos e gratuidades, tipos de bilhete em que os métodos convencionais proporcionavam uma gama extensa de fraudes. No entanto, seu advento representou passo significativo no processo de integração entre linhas e modos de transporte. A diversidade de possibilidades de meios de pagamento, de computação de pagamentos sucessivos, entre outras vantagens, possibilitou: integração em

qualquer ponto fora das então “Áreas Pagas”, capacidade de realização de múltiplas integrações com o mesmo bilhete e com limite apenas temporal e ou de número de embarques, emprego de tarifas diferenciadas, maior controle da arrecadação do sistema e dos benefícios e gratuidades, aumento da segurança dentro dos veículos pela significativa redução de valores embarcados em espécie, etc.

No princípio da década de 2000 iniciaram-se as implantações de equipamentos e sistemas para Supervisão, Controle e Fiscalização Operacionais. Segundo os registros encontrados, os primeiros sistemas de ônibus que adotaram esse ferramental no Brasil, embora com dimensões diferentes, foram o SIT - Sistema Integrado de Transporte de Uberlândia-MG (MAGALHÃES; BALASSIANO, s.d) e a rede municipal de São Paulo gerida pela SPTRANS (SPTRANS, 2009), ambos com início de implantação em 2003.

1.3.3. **Intensidade de uso do ferramental de ITS**

Hoje são numerosos os sistemas de ônibus que contam com equipamentos e sistemas dedicados à Programação, Monitoramento e Controle Operacionais que, certamente, contribuem para a melhoria na Gestão dos Sistemas de Ônibus Urbanos. No entanto, podem ser observadas distorções na utilização desse ferramental, de diversas ordens e com diferentes origens. A subutilização dos recursos e funcionalidades certamente é uma dessas distorções, talvez a mais frequente.

A subutilização pode ser debitada a alguns fatores conforme o ambiente em que a tecnologia foi implantada. Entre eles podem ser citados: falta de preparo da organização para as mudanças decorrentes da instalação (estrutura organizacional, métodos e processos, normas e regulamentos, arcabouço jurídico), baixa capacitação técnica dos envolvidos, resistências geradas por conta da “cultura empresarial”. O Capítulo 2 do Caderno Técnico publicado pela Associação Nacional de Transportes Públicos ANTP (DARIDO; PENA, 2012) reforça essa preocupação afirmando que “*O gerenciamento de mudanças é uma pedra angular da implantação do ITS*”.

Verificando-se as etapas de especificação dos serviços nos órgãos gestores dos sistemas de ônibus, em síntese e com possíveis gradações, encontra-se o seguinte quadro geral:

1.3.3.1. Projeto das Redes

Na maior parte dos casos, as redes foram formadas por adição de novas linhas ao longo do tempo, tornando-se técnica e economicamente ineficientes.

Recentemente desenvolveram-se numerosos projetos de reestruturação de redes, a maioria, se não a totalidade, elaborados por entidades de Engenharia Consultiva. Essas organizações ou empresas dispõem, há décadas, de ferramental técnico capaz de processar dados e simular redes com riqueza de informações e detalhes. A questão prática é a postergação da implantação desses projetos.

1.3.3.2. Especificação dos Serviços

Os órgãos gestores dispõem de equipes encarregadas das especificações, dimensionamento e programação dos serviços. Até onde foi apurado, as técnicas empregadas são relativamente rudimentares, procedendo: (i) o cálculo do tempo de percurso a partir das velocidades comerciais médias para o conjunto das linhas ou por trechos; (ii) a especificação dos veículos com base em padrões de mercado ou de padrões do órgão, quando existentes; (iii) o dimensionamento da frota com base nos dados de origem-destino disponíveis ou projetados; (iv) a programação horária dos serviços por número de partidas. Poucos são os órgãos gestores que empregam sistemas de programação automatizada disponíveis no mercado. Também não se observam revisões periódicas da programação com base nos resultados dos sistemas de bilhetagem ou dos sistemas de Monitoração e Controle da Operação. Não é incomum que operadoras proponham ao respectivo órgão gestor modificações em linhas existentes ou mesmo a criação de novas linhas.

1.3.3.3. Monitoração e Controle da Operação

Nesse sentido, o caso da SPTRANS é emblemático. Há mais de dez anos, todos os cerca de 14,5 mil veículos da frota municipal de São Paulo são dotados de equipamentos embarcados capazes de proceder ao sensoriamento remoto, à transmissão dos dados para o Data Center e proporcionar comunicação do veículo com a central de operações. Na retaguarda desses equipamentos embarcados, foram desenvolvidos três sistemas: o INFOTRANS, que armazena os dados cadastrais das linhas, integrado ao SIM que é o sistema de Monitoramento e Controle da Operação; e o Sistema de Arrecadação, que processa os dados da bilhetagem coletados nos Validadores embarcados (SPTRANS, 2009). Dos três

sistemas, o de Arrecadação pode ser considerado o único empregado praticamente em sua plenitude. Os dois sistemas dedicados ao Monitoramento dos Serviços (INFOTRANS e SIM) são usados aquém de suas potencialidades como mostram (FERREIRA et al., 2012) e (PEREIRA, 2015).

A operação se faz sob o viés histórico de ser comandada a partir dos agentes de campo, o que pode ser considerado uma cultura organizacional tanto em órgãos gestores quanto em empresas operadoras.

Poucos órgãos gestores dispõem de equipes de análise de desempenho a partir das informações processadas pelos Sistemas de Monitoração e Controle Operacionais, quando existentes.

De qualquer maneira, o advento do ITS começa a mudar, ainda que de modo incipiente, o panorama do transporte coletivo por ônibus. Também é protagonista no nos sistemas de ônibus BRT (na sigla em inglês para Bus Rapid Transit).

1.3.4. O advento dos BRT - Bus Rapid Transit

Pode-se considerar que os BRT representam o estágio avançado dos Corredores de ônibus tradicionais, atingindo patamares de média capacidade e, em alguns casos, de alta capacidade, com custos de implantação bastante inferiores aos de sistemas sobre trilhos. Com nítida influência do Sistema de Ônibus de Curitiba, o Transmilênio de Bogotá pode ser considerada a primeira grande experiência na formação do Conceito BRT.

Nos Estados Unidos, em meados da década de 1990 foram implantados corredores objetivando aumento da velocidade comercial dos sistemas de ônibus. Os estudos técnicos apontam para tipologias que se assemelham, estabelecidas a partir dos recursos incluídos nos sistemas. Heddebaut et al (2010) definem três categorias:

- a) BRT “leves” (“BRT-Lite”) - a categoria inferior, devem ser minimamente mais velozes que uma linha de ônibus normal, normalmente apresentam grandes distâncias entre estações e dispõem de preferência em cruzamentos e muitas vezes têm identidade visual própria. São os BRT mais comuns na América do Norte, como a Linha B de Vancouver com operação iniciada em 1996; Chicago, 1998; e MetroRapid Bus em Los Angeles, 2000.
- b) BRT “completos” (“Full-BRT”) - a categoria mais elevada, compõe-se dos sistemas que podem atingir desempenhos no estilo dos metrô. Necessitam vias inteiramente segregadas, cobrança desembarcada, alta frequência nos serviços,

veículos de maior porte. Segundo os autores, os BRT de Bogotá (Transmilenio), de Brisbane e de Ottawa são os mais famosos. Esta modalidade não havia sido realmente implantada nos Estados Unidos até a data de elaboração do documento citado,.

- c) BRT “pesados” (“Heavy-BRT”) - categoria intermediária surgida mais recentemente, enfatiza a segregação de vias para redução dos tempos de percurso e para assegurar regularidade dos serviços. Quase dois terços dos projetos com previsão, à época da elaboração do artigo, para início de operação até 2017, incluem segregação completa de vias. Os autores citam como emblemáticos dessa modalidade o Cleveland Health Line e o Eugene EMX Gree Line.

Larwin et al (2007) apresentam classificação semelhante, chamando as modalidades de Estágios, quais sejam: Estágio Inicial do BRT, Estágio Intermediário e BRT Completo.

Por ser resultado do que poderia ser chamada de formação evolutiva, somada às diversas configurações verificadas nas implantações realizadas, as definições de BRT encontradas na literatura técnica são pouco exatas. O ITDP (2008) o define como “...um sistema de transporte de ônibus que proporciona mobilidade urbana rápida, confortável e com custo eficiente através da provisão de infraestrutura segregada com prioridade de passagem, operação rápida e frequente e excelência em marketing e serviço ao usuário”.

Levinson et al apud (HIDALGO; GUTIÉRREZ, 2013), por sua vez, definem BRT como um “...transporte sobre pneus rápido, flexível e que combina estações, veículos, serviços, vias e tecnologia da informação, em um sistema integrado com identidade marcante”.

Algumas entidades tratam Corredores convencionais e BRT como um mesmo modo de transporte, computando os sistemas implantados para o conjunto dos dois modelos. Embora essa agregação possa ser questionada, são notáveis os avanços desses sistemas pelo mundo, com ênfase nos países em desenvolvimento na Ásia, na América Latina e América do Norte. Os números fornecidos por Breithaupt (2012) indicam que em 2011 havia 280 corredores em 162 cidades no mundo.

Talvez buscando alguma uniformidade dos conceitos de BRT, o ITDP vem publicando documentos periódicos propondo padrões de qualidade de BRT (ITDP,

2014) em que é apresentado um método de classificação desses sistemas em funções dos atributos observados em cada um deles.

Entende-se cabível uma indagação com relação aos projetos de BRT desenvolvidos no Brasil. A engenharia nacional apresenta larga experiência em projeto e construção de obras viárias. De sua parte, os BRTs são erguidos sobre sistemas viários mais ou menos convencionais. Junte-se o fato de que parte, se não a maioria, das concessões desses sistemas são ocupadas por grupos empresariais com origem na Construção Civil. O resultado é que parte dos projetos apresentam um viés de maior dedicação à Engenharia Civil do que à Engenharia de Transportes ou, ainda mais precisamente, da Engenharia de Operações de Sistemas de Transporte.

Ao contrário dos sistemas metroferroviários que, necessariamente, devem ser forjados sobre uma sólida base de equipamentos, de sistemas e de métodos operacionais, nos BRTs tal vetor é tratado como elemento acessório e, portanto, secundário.

Além de constituir uma das bases para o desenvolvimento dos BRT como mostram Marte et al (2012), o ferramental de ITS dedicado aos ônibus desencadeou uma série de desenvolvimentos nas áreas de programação e controle operacionais dos sistemas de ônibus. O advento de instrumentos capazes de obter em tempo real a posição de cada veículo em operação, transmitir, processar e armazenar essas informações e ainda permitir a comunicação entre a Central de Operações e os diversos motoristas representou a abertura de novos caminhos na especificação, monitoramento, controle e gerenciamento dos serviços. Acrescente-se que aos instrumentos de rastreamento foram adicionados os Sistemas de Informação Geográficas - SIG que possibilitam o georreferenciamento e mapeamento dos dados.

Também devem ser apontadas as numerosas aplicações de ferramentas de ITS em substituição aos métodos convencionais de pesquisa e levantamento de dados de tráfego e transportes: contagens de veículos, contagens de ocupação de veículos, pesquisas de Origem-Destino em diversas escalas, lotação de veículos, etc. Mais recentemente, dados de telefonia celular submetidos a processos de “big data” têm sido empregados para pesquisas Origem-Destino, como foi o caso do Plano de Mobilidade para a cidade de São Luís-MA (FERIANCIC; O'KEEFE, 2015).

1.3.5. A Reestruturação das Redes de Ônibus em Algumas Capitais Brasileiras

No âmbito Institucional, a Política Nacional de Mobilidade Urbana - Lei nº 12.587 de 03 de janeiro de 2012 obriga os Poderes Concedentes (Estados e Prefeituras) a regularizar as delegações para os Serviços de Ônibus por meio de licitações para Concessões ou Permissões dos serviços.

Em paralelo a essa preocupação, as prefeituras das cidades de maior porte viram-se acuadas pela insustentabilidade econômica dos sistemas de ônibus. As municipalidades que proveem subsídios aos operadores constataam o crescimento anual do custo dos sistemas. Aquelas que não subsidiam o sistema, veem-se instadas a aumentar anualmente as tarifas que já chegam a valores elevados, principalmente para as populações de renda mais baixa, a principal clientela desse tipo de transporte.

A sustentabilidade econômica aponta para a reorganização funcional dos sistemas, de modo a aumentar a eficiência por meio da reestruturação das redes. São encontrados vários exemplos em que a licitação para a Concessão foi precedida ou sucedida (como no caso de Salvador) de Planos de Reestruturação da Rede.

Em sua maioria, as reorganizações das redes são baseadas na hierarquização de linhas, que proporciona redução de custos com possível melhoria dos níveis de serviço sem perda da cobertura territorial do sistema.

Nesse sentido, o próprio Ministério das Cidades em sua publicação “Caderno de Referência para Elaboração de Plano de Mobilidade Urbana, PlanMob” (BRASIL, 2015) recomenda:

“O sistema de transporte coletivo deve ser organizado na forma de uma única rede, com os diversos modos de transporte com integração física, operacional e tarifária, independentemente de quem os opere, inclusive considerando os serviços sob gestão de outros níveis de governo (estadual e federal) ”.

A reestruturação de redes, com hierarquização de linhas, também conhecida por troncalização, por sua vez, provoca maiores quantidades de transferências, tanto no próprio modo quanto com outros modos, especialmente os de maior capacidade.

As transferências, além de alterar hábitos de viagem, na percepção dos passageiros aumenta o tempo de viagem e o desconforto. Além desse aspecto negativo, a hierarquização de linhas multiplica as necessidades de integração. Sem integração

tarifária que permita transferências livres (ainda que limitadas), o usuário arcaria com custo adicional em seus deslocamentos.

No âmbito da ANTP, a Comissão de Estudos de Sistemas Integrados de Transporte Público Urbano (ANTP, 1999) defende a organização dos sistemas de forma complementar, adotando o conceito de rede integrada.

Em termos técnicos, a integração tarifária não seria problema, uma vez que boa parte dos sistemas de ônibus contam, como já foi visto neste documento, com equipamentos e sistemas de bilhetagem eletrônica que facilitam o processo de tarifação e mesmo de repartição de receitas. No campo econômico-financeiro, porém, invariavelmente são levantadas as questões:

como será dividida a arrecadação? Quem arca com o custo adicional?

Em cidades como São Paulo, a arrecadação do “Bilhete Único” é feita pelo órgão gestor e partilhado entre os operadores. O Poder Concedente arca com os custos adicionais das integrações que são livres com restrição temporal para o usufruto.

Já em outras capitais, como é o caso de Salvador, ainda não há soluções completas, mas na integração entre os ônibus municipais e o metrô (recém-inaugurado), as operadoras dividem a arrecadação, com a repartição sendo feita pela entidade que gere o sistema de bilhetagem. Em outros centros ainda não há um meio de pagamento predominante, com o usuário convivendo com diferentes bilhetes em diferentes sistemas.

Frente a tais empecilhos, não é incomum a existência de Projetos de Reestruturação de Redes cujas implantações são retardadas, quando não, abandonadas.

Em síntese, pode-se afirmar que, nas grandes cidades brasileiras e em outros centros urbanos de países em desenvolvimento, os sistemas de ônibus encontram-se em transição, ainda que sejam observadas, falhas, retrocessos, perdas de oportunidades, etc. Transições como estas não se fazem em curto prazo, visto que é um processo longo que demanda investimentos de toda ordem. O momento atual é particularmente interessante por oferecer a possibilidade de implantação de sistemas de média e alta capacidades que possam contribuir para a efetiva implantação das redes estruturadas e integradas internamente e com outros sistemas. De outra parte, torna-se necessário que o setor desenvolva capacitação (lato sensu) para que o ferramental tecnológico hoje disponível possa ser empregado de modo abrangente e intenso.

1.4. O TRANSPORTE PÚBLICO EM GRANDES CIDADES DE PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

Como já foi citado neste documento, Vasconcellos e Mendonça (2010) identificam que o processo de desenvolvimento dos sistemas de ônibus no Brasil observou modelo diverso daquele praticado nos países da América Latina, da Ásia e da África. Naqueles países, as configurações dos modelos de transporte público eram semelhantes, embora possam diferir no tempo de um país para outro. Os sistemas pioneiros caracterizavam-se pela pulverização de operadores e desregulamentação dos serviços, resultando em miríades de pequenos proprietários de veículos operando sem regras claras. Em não havendo regras, os operadores trabalhavam ao sabor das demandas, deixando de atender uma parcela da população quando essas demandas não eram, a seu critério, suficientes para cobrir os custos.

A partir da segunda metade da década de 1990 tem início um movimento de regulamentação e de implantação de sistemas de média e alta capacidades. Cidades como Quito, no Equador; Bogotá, na Colômbia; Lima, no Perú; Bangkok, na Tailândia; Kula Lumpur, na Malásia; entre outras, iniciaram a implantação de sistemas metroferroviários e corredores de ônibus.

Outras cidades que já dispunham de sistemas metroferroviários, casos da Cidade do México (México) e Santiago (Chile) iniciaram processos de regulamentação e organização dos sistemas de ônibus.

O caso da China parece ser um caso fora da curva: o vertiginoso processo de urbanização, associado ao aumento da capacidade de investimentos, provocou uma série volumosa de investimentos, tanto em sistemas metroferroviários quanto em Corredores de Ônibus e BRT.

A cidade de Santiago, no Chile, percorreu caminho diferente: o governo militar estabeleceu uma desregulamentação radical, provocando os mesmos males observados em outros centros urbanos da América do Sul. Apesar dos problemas surgidos na implantação do então novo Transantiago, aquela metrópole vem aperfeiçoando seus sistemas.

Com variações maiores ou menores, estas cidades encontram-se em estágios similares, particularmente no que tange aos BRT, objetos de implantações em diversos locais, sem, aparentemente, haver padrões claros para sua implantação e, principalmente, operação.

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta Dissertação, além do presente capítulo que procura estabelecer as bases do trabalho e, em paralelo, contextualizar os sistemas de ônibus, em seu Capítulo 2 apresenta a Revisão Bibliográfica dos diversos tipos de métodos e estratégias existentes e ou desenvolvidos. No Capítulo 3 é desenvolvida a metodologia a ser observada na simulações efetuadas para testes das intervenções. O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos nas simulações e o Capítulo 5 apresenta as conclusões e sugestões para estudos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A natureza da presente Dissertação faz com que a Revisão Bibliográfica exerça função além do mero respaldo técnico. Como este documento pretende trabalhar com as experiências acadêmicas dedicadas a intervenções operacionais nos sistemas de ônibus, as referências bibliográficas assumem o papel de base de dados. Tal aspecto reflete-se num dos dois principais critérios observados na seleção dos trabalhos: as experiências devem, na medida do possível, apresentar pesquisas com alguma individualidade, isto é, alguma inovação ou aperfeiçoamento de pesquisas anteriores.

O segundo critério é decorrente do foco da Dissertação, que está mais voltado às características funcionais de cada experiência do que nos algoritmos e modelos nelas desenvolvidos. Por isto, em alguns casos, a descrição dessas funcionalidades pode tomar mais espaço em função da complexidade da experiência.

Este Capítulo está dividido em dois blocos principais. O primeiro procura conceituar o processo de Projeto e Operação de uma Rede de Ônibus Urbano (ROU) com a divisão das etapas que o compõem e destacando o foco da Dissertação. O segundo bloco faz a leitura e descrição dos diversos estudos e artigos selecionados contendo experimentos relacionados a intervenções operacionais nos serviços de ônibus urbanos, agrupando-os por tipo de intervenção.

Dada a extensão das resenhas efetuadas, neste Capítulo 2 são apresentados apenas resumos de cada uma e as resenhas completas são apresentadas nos Apêndices deste documento.

2.1. CONCEITUAÇÃO E ETAPAS DO PLANEJAMENTO DE UMA REDE DE TRANSPORTE

Ibarra-Rojas et al (IBARRA-ROJAS et al., 2015) definem como Planejamento da Rede de Transporte todas as decisões que devem ser tomadas antes da operação do sistema, aí entendidas as diversas etapas desde a concepção da Rede até as programações operacionais realizadas necessariamente no limiar do início da operação.

Ceder e Wilson (1986) dividem o Plano de Rede em cinco etapas (níveis). Trata-se de uma divisão orgânica e usual de um projeto. Os níveis representam a ordem cronológica de suas execuções, uma vez que os autores apontam-nas como sequenciais, visto que o produto de uma etapa é requisito para a etapa seguinte. Os

conceitos básicos de Ceder & Wilson estão reproduzidos na Tabela 1, onde são indicados os dados de entradas e os produtos de cada nível.

Tabela 1 - Planos de Redes -Divisão do Planejamento em Etapas

ENTRADAS	ATIVIDADE	SAÍDAS
Dados de Demanda	NÍVEL A Projeto da Rede	Novas Linhas
Dados de oferta		Linhas Alteradas
Indicadores de Desempenho da Linha		Estratégias Operacionais
Subsídios disponíveis	NÍVEL B Configuração das Frequências	Frequências do Serviços
Veículo disponíveis		
Política de Serviços		
Passageiros Atuais		
Demanda por horário do dia	NÍVEL C Desenvolvimento das Tabelas Horárias	Horários de Partida das viagens
Horários da primeira e última viagens		Horários de Chegada das viagens
Tempos de percurso		
Tempos ociosos	NÍVEL D Programação da Frota	Programação da Frota
Tempos de descanso		
Restrições à Programação		
Estrutura de Custos		
Regras Trabalhistas da tripulação	NÍVEL E Programação das Equipes	Programação das Equipes
Estrutura de Custos da execução		

FONTE: (CEDER; WILSON, 1986)

No trabalho em que fazem uma varredura dos estudos acadêmicos voltados a Projetos de Rede, Ibarra-Rojas et al (2015) adotaram a divisão em etapas de Ceder & Wilson (1986), com o acréscimo de um nível, que trata das escalas de trabalho.

De outra parte, Ibarra-Rojas et al (2015) definem com maior precisão e abrangência cada uma dessas etapas:

PROJETO DA REDE - define os desenhos das linhas e suas características operacionais como tipo de linha, tipos de veículos, espaçamento entre paradas, etc., com o objetivo de otimizar funções objetivas e específicas como a minimização da soma ponderada dos custos dos operadores e dos usuários. Trata-se de processo nitidamente estratégico e que deve resultar na caracterização da rede e dimensionar seus componentes principais.

CONFIGURAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS - Baseados nos padrões de demanda (pico da manhã, entre picos da manhã e da tarde, pico da tarde, etc.), determina-se o número de viagens por hora necessário para atender às demandas em cada um dos períodos determinados.

TABELAS HORÁRIAS - Define horários de partida e de chegada dos ônibus em cada parada ao longo da rede, objetivando atingir diferentes metas como uma

determinada frequência, satisfação de determinados padrões de demanda, maximizar tempos de transferência e minimizar tempos de espera. O número de viagens também é associado à capacidade dos veículos selecionados.

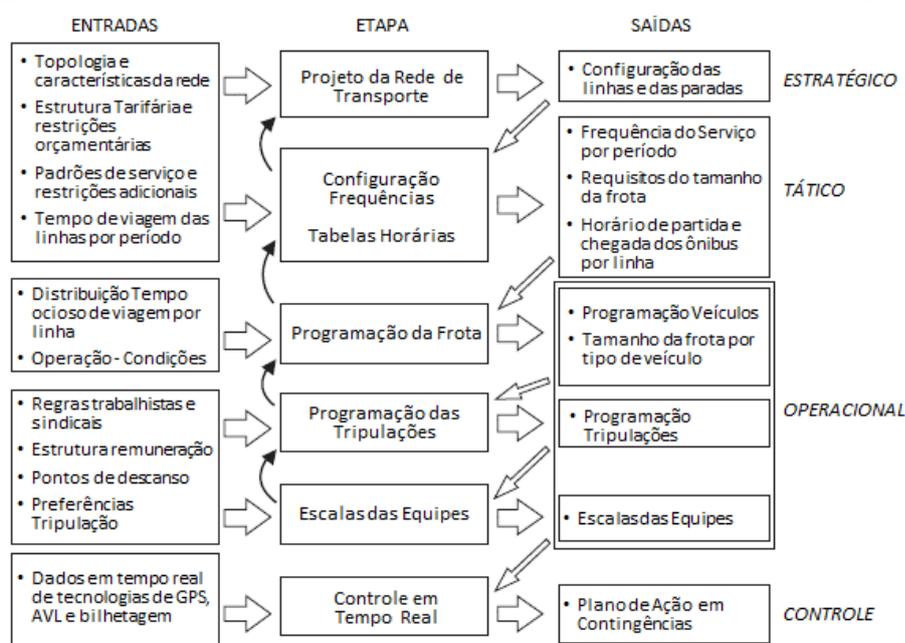
PROGRAMAÇÃO DA FROTA - Dimensiona, conforme a capacidade dos veículos selecionados, a frota designada para cobrir todas as viagens programadas, atendendo à minimização de custos operacionais.

PROGRAMAÇÃO DE TRIPULAÇÃO² - Define as jornadas diárias necessárias para cobrir as viagens programadas e minimizar o custo da mão de obra. Está associada às regras trabalhistas que especificam, por exemplo, jornada máxima, períodos e condições de refeição e descanso, descanso remunerado, etc.

ESCALAS DAS EQUIPES - Poderia ser definida como “Programação Periódica da Tripulação”, isto é, uma programação voltada para um ciclo mais largo, como o de um mês, em que são levados em conta, para uma garagem, os regimes de trabalho, férias, rotatividade, licenças médicas e demais condições e circunstâncias trabalhistas.

Os autores também apresentam diagrama de mesma natureza dos dados da Tabela 1, agora com maior detalhamento de entradas e acrescentando as interligações entre cada elemento. O resultado é mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Projeto de Redes Divisão em Etapas e suas Inter-relações



² No original é usado o termo “Driver Scheduling”, provavelmente referindo-se apenas aos motoristas, uma vez que, entende-se, não há cobradores embarcados. Aqui foi empregado o termo genérico “tripulação” por conta da existência, mais ou menos generalizada, de cobradores embarcados nos centros urbanos brasileiros.

FONTE: (IBARRA-ROJAS et al., 2015)

Ibarra-Rojas et al (2015) incluíram uma atividade que, até então, não havia sido citada: o controle da operação em tempo real. Até o advento dos equipamentos e sistemas de ITS, este tipo de controle, quando exercido, o que não era feito sistematicamente, era executado de modo descentralizado e manual pelos agentes operacionais situados nos pontos iniciais das linhas. Esta ação tinha resultados imediatos meramente pontuais, na medida em que eram tomadas decisões restritas a uma partida de uma linha e não ao conjunto de veículos em operação naquela linha. Com o ferramental de ITS foi possível estabelecer esse controle em tempo real, de modo centralizado e com a visão geral do sistema a cada momento, além do registro sistemático dos dados operacionais. As duas funções serão discutidas mais detalhadamente ao longo deste documento. Cabem inicialmente algumas considerações com relação ao alcance e agentes envolvidos em cada uma das etapas. Para isto, é bastante oportuna a classificação entre as atividades estratégicas, táticas, operacionais e de controle feita por Ibarra-Rojas et al (2015) à margem do gráfico mostrado na Figura 1. Essas características serão tratadas nos subitens a seguir.

2.1.1. **Etapa de Projeto da Rede**

Considera-se uma fase eminentemente estratégica, visto que reúne e deve refletir os objetivos e diretrizes adotados pelo Gestor do Sistema para a estruturação da rede. Ceder e Wilson (1986) relatam que, àquela época, esta etapa era feita de modo ainda incipiente, sem maiores recursos para simulação. Seu relato é confirmado, pelo menos no âmbito dos Estados Unidos, por documento de 1982 encomendado pelo Departamento de Transporte dos EUA (MULTISYSTEMS INC, 1982) que reporta levantamento feito com 40 gestores de transporte público urbano por ônibus. O estudo concluiu pela precariedade dos métodos empregados nesta etapa pela maioria daqueles agentes.

Hoje, pelo menos nas cidades de maior porte, o Plano de Rede é elaborado com base em modelos disponíveis no mercado da Engenharia Consultiva, tais como, entre outros: EMME, do grupo INRO; Transcad, do grupo CALIPER, Visum, do Grupo PTV.

De todo modo, esta etapa concentra os fundamentos das decisões técnicas e políticas que deverão reger o sistema nos períodos seguintes.

Deve ser lembrado que os Projetos de Rede podem ser aplicados tanto em novos sistemas, como na Reestruturação de Redes de Ônibus já em operação.

Em qualquer rede, mas especialmente nestes casos em que o projeto provoca mudanças de hábitos de viagem dos usuários, deve prover balanceamento entre dois atributos: eficiência e impactos sobre usuários.

No campo da Administração, Megginson et al (1998) definem eficiência como:

“... a capacidade de um administrador de conseguir produtos mais completos tendo em vista sua relação com os insumos necessários para obtê-los. A capacidade de “fazer as coisas direito”.

A eficiência pode, para os sistemas de ônibus, ser definida como “a prestação de serviços de acordo com os níveis especificados, empregando a quantidade ótima de recursos operacionais”.

No que toca aos impactos sobre os usuários, a questão parece mais complexa. O serviço oferecido pode exercer reações positivas ou negativas por parte dos clientes. Tais reações dependem da percepção dessa população em relação ao que entendem como positivo ou negativo em cada inovação ou no conjunto delas

Não obstante os dois fatores possam ser conciliados, deve-se considerar que, no limite, eles podem ser excludentes. Tome-se como exemplo extremo duas situações limítrofes:

- a) Situação 1 - A rede desenhada cria um sistema somente com impactos positivos para os usuários. Neste caso, é bastante provável que o custo do sistema torne-se insustentável, seja pelo montante de subsídios necessários, seja pelo valor das tarifas (quando não há subsídio do Estado) e que traz prejuízos aos passageiros. O Ministério das Cidades (BRASIL, 2015) manifesta-se sobre tal possibilidade:

“O equilíbrio econômico-financeiro dos contratos não é um problema exclusivo dos operadores, mas sim uma condição necessária à garantia de prestação de um serviço adequado. “

- b) Situação 2 - A rede proposta cria um sistema extremamente eficiente, com frota reduzida, baixa quilometragem percorrida, maior número de passageiros e custo minimizado. Neste caso, a situação mais provável é a que a oferta seja reduzida a níveis excessivamente baixos, com prejuízos para a comunidade de passageiros.

Entende-se que o equilíbrio entre esses dois atributos é parte relevante do projeto, devendo ser buscado pela verificação se cada um deles - eficiência e impactos sobre o usuário - estão satisfatoriamente atendidos pelo Projeto de Rede.

2.1.2. Etapas de Configuração das Frequências e elaboração das Tabelas Horárias

As duas etapas encontram-se agrupadas no segundo nível da Figura 1 dada sua proximidade e interação em termos de produção. Uma pré-configuração das frequências pode ser produto do Projeto de Rede, mas deverá ser detalhado e confirmado em etapa específica. Seu ponto de partida é o Dimensionamento da Frota, feito a partir das demandas observadas em cada linha ao longo do dia. O dimensionamento da frota envolve os tipos de veículos selecionados conforme o tipo de linha e suas condições de operação. Feita a seleção, são aplicadas às demandas a capacidade de cada tipo de veículo selecionado. Em seguida adotam-se métodos para a determinação do tempo de percurso ou de velocidade comercial. Capacidade mais tempo de percurso são então empregados para o cálculo da frota necessária para cada linha assim como o número de partidas necessárias para atender à demanda em cada faixa horária. Este resultado é a base para o estabelecimento do número e horário das partidas ou o intervalo entre partidas, que compõem a chamada TABELA HORÁRIA.

São numerosos os estudos acadêmicos voltados ao desenvolvimento de modelos matemáticos de programação, tanto para a determinação de frequências quanto para a formulação das tabelas horárias.

O ferramental de ITS pode ser de grande utilidade para esta etapa: a análise dos dados operacionais registrados no Sistema de Monitoramento e Controle podem indicar que os tempos de percurso adotados anteriormente não correspondem à realidade, ou que está ocorrendo superlotação e, portanto, a demanda não está sendo atendida adequadamente.

Estas etapas correspondem a um dos elementos chave nos Contratos de Gestão ou de Concessão, uma vez que indicam a oferta a ser provida pelo Contratado. Por isto e também por atuarem na principal especificação dos serviços, enquadram-se na categoria de Etapa Tática.

2.1.3. Etapas de Programação da Frota, Programação das Tripulações e Escalas das Equipes

As três Etapas seguintes, PROGRAMAÇÃO DA FROTA, PROGRAMAÇÃO DAS TRIPULAÇÕES E ESCALAS DAS EQUIPES são classificadas como Etapas Operacionais, podendo ser enquadradas no jargão técnico como “atividades de garagem”, isto é, realizadas pelo Agente Operador previamente ao início da operação em cada dia ou em cada período. Não serão detalhadas pois fogem ao escopo dessa dissertação.

2.1.4. Etapa de Monitoração e Controle Operacionais

Esta fase, antes do advento do ferramental de ITS, não fazia parte das atividades do Planejamento de Rede. No entanto, com a introdução de tais instrumentos, embora seja atividade exercida a partir do início da operação do sistema, entende-se que deva ser trabalhada já na fase de desenho da rede por sua função ampliadora dos limites técnicos para a determinação das frequências e das tabelas horárias, como indicaram Ibarra-Rojas et al (2015). Por esta característica, suas atribuições, funcionalidades e o correto dimensionamento de sua capacidade devem ser especificados no âmbito do projeto.

A introdução de tal atividade representa um marco nos métodos operacionais, na medida em que abre novas possibilidades para a gestão operacional: atuação nas contingências previsíveis e programadas, assim como naquelas imprevistas ou não programadas; introdução de veículos adicionais, aumentando a oferta no sentido de manter o nível de regularidade do serviço; identificação de problemas afetando a circulação, permitindo o acionamento mais rápido dos responsáveis pelo restabelecimento do tráfego; etc..

De sua parte, estas possibilidades podem induzir flexibilidade nas programações pré-estabelecidas, tornando-as mais dinâmicas. Este potencial apresenta a vantagem de adequar a oferta a variações de demanda temporárias e imprevistas.

Esta possível flexibilidade insere uma relativa complicação na execução dos contratos para execução dos serviços de transporte coletivo urbano por ônibus: as programações horárias são, em boa parte dos casos, instrumentos contratuais aplicados para a certificação de que o objeto do contrato foi cumprido (ou não) de modo regular. Constituem-se, portanto, em documentos contratuais que influenciam a receita dos contratados. Assim, sua alteração está sujeita a um processo

administrativo mais ou menos complicado, a menos que o instrumento disponha de mecanismos de flexibilização.

Outra porta aberta pelos equipamentos e sistemas de ITS é o registro dos dados operacionais que permitem a análise dos métodos e processos operacionais em curso e possíveis revisões, reprogramações e aperfeiçoamentos contínuos.

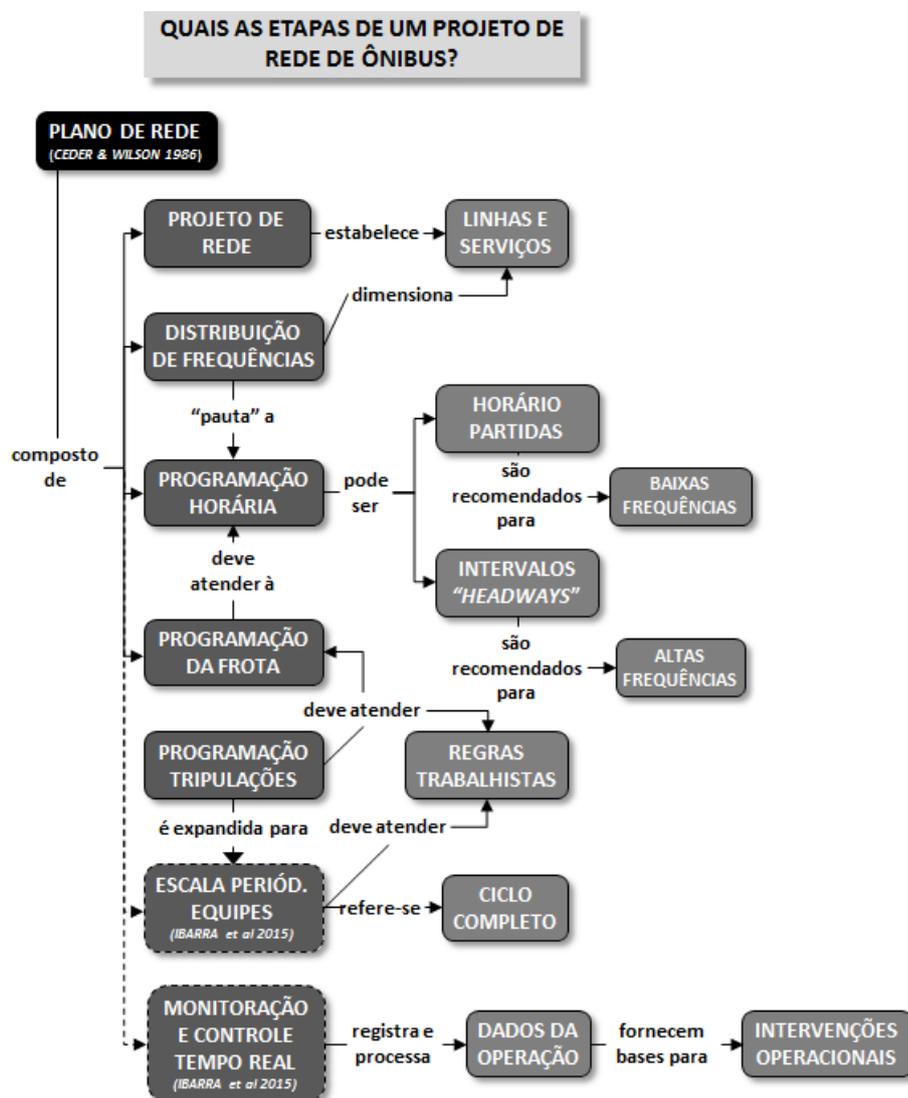
Todas essas possibilidades são reais nos sistemas metroferroviários que dispõem, há muito tempo, dos ferramentais de ITS. Com variações em função de cada organização, é possível afirmar que nos operadores de metrô, a área responsável pela Programação Operacional produz, cotidianamente, a programação do dia seguinte, com base no histórico recente e remoto de dados e nos eventos previstos para a cidade naquele dia, aí incluídos fenômenos meteorológicos. Além disto, há um repositório de estratégias operacionais frente a contingências já ocorridas, de modo a possibilitar a aplicação de medidas previamente desenvolvidas e testadas.

Mais que isto, aqueles sistemas mantêm, na maioria dos casos, uma área de Métodos e Processos, que faz a análise sistemática da operação e das ocorrências observadas, no sentido de alterar os procedimentos que careçam de revisão em função da dinâmica observada na operação cotidiana.

A regularidade é o atributo mais buscado nas experiências acadêmicas pesquisadas para esta dissertação. Esta busca pode ser explicada, entre outros motivos por: ser um atributo mensurável; estar associado ao cumprimento da frequência e das tabelas horárias e, portanto, ao tempo de espera; ser um objetivo complexo para as redes de ônibus; ser, em alguma medida, relevante para os usuários.

Com base nas etapas conceituadas até aqui foi elaborado o Mapa Conceitual constante da Figura 2 que procura resumir a estrutura genérica de um Plano de Rede segundo os autores consultados.

Figura 2 - Plano de Rede - Mapa Conceitual - Estrutura



FONTES: (CEDER; WILSON, 1986) e (IBARRA-ROJAS et al., 2015)

MAPAS CONCEITUAIS: (NOVAK; CAÑAS, 2010) e (AGUIAR; CORREIA, 2013)

2.2. INTERVENÇÕES A PARTIR DA MONITORAÇÃO E DO CONTROLE OPERACIONAIS

Eberlein (1995) tipifica as intervenções possíveis a partir da Monitoração e Controle em três grupos:

- CONTROLE NAS ESTAÇÕES, aqui entendidas como Terminais, Pontos de Parada e Estações de Corredores e BRT, que compreendem as estratégias cuja execução é feita nesses locais com o objetivo de melhorar a regularidade do serviço, redução de viagens ou de tempos de espera e coordenação de transferências de passageiros.

Entre as intervenções pertencentes a esta categoria, as mais comumente encontradas são:

- Paradas de Retenção em pontos selecionados para regulação dos intervalos (“*holding*”);
- Limitação de Paradas (“stop para embarques e desembarques somente em pontos selecionados previamente para ajuste dos intervalos e ou da lotação dos veículos;
- Meias Viagens (“*deadheading*”), em que o veículo atende normalmente somente o sentido mais carregado e retorna ao ponto de origem sem atendimento no sentido do contra-pico para aumentar a oferta no sentido atendido; indicada para linhas pendulares, isto é, em que há carregamento predominante apenas em um sentido.

b) **CONTROLE ENTRE ESTAÇÕES** - decisões e respectivas execuções tomadas entre paradas das linhas, isto é, quando o veículo percorre o trecho entre pontos de controle monitorados, para melhoria da regularidade e para tornar a operação mais eficiente. Nesse grupo situam-se, entre outras:

- o controle da velocidade dos veículos durante a marcha, sob o comando da Central de Operações ou por comunicação entre operadores;
- a prioridade semaforizada em que os ônibus exercem preferência quando da aproximação de cruzamentos semaforizados;
- Inserção de Frota que consiste na adição de veículo(s) em uma linha com o objetivo de aumentar a oferta ou substituir veículo retirado de operação facilitando a regularização dos intervalos; esse tipo de intervenção é comum entre os operadores de metrô.

c) **OUTROS** - medidas de controle que não se enquadram nas duas categorias acima e que não se caracterizam como intervenções operacionais, uma vez que são facilidades da infraestrutura do sistema. No entanto, entendeu-se ser oportuno incluí-las para ser possível uma comparação dessas facilidades com as intervenções na operação. Entre elas pode ser lembrada a Bilhetagem Desembarcada. - esse tipo de instrumento acaba por atuar a favor da regularidade e de menores tempos de viagem. Ela possibilita que o embarque e desembarque sejam feitos por todas as portas dos ônibus, contando ainda com a ausência de catraca no interior do veículo que pode contribuir para reduzir o tempo de embarque por passageiros, diminuindo os tempos de parada em

estações, aumentando, portanto, a velocidade comercial do serviço. No mesmo grupo pode ser incluída a ultrapassagem entre veículos, quando as condições físicas da via permitem, buscando reduzir o tempo de percurso ou, quando veículos da mesma linha estão com intervalos abaixo do desejado.

Cabem aqui duas explicações sobre a terminologia empregada para designar as intervenções. Primeiramente, não será empregado o termo “parada” para designar um ponto de ônibus, uma vez que aquele termo será visto repetidamente como a denominação de duas das intervenções (“Paradas para Regulação” e “Limitação de Paradas”) assim como o termo por vezes é empregado para designar qualquer estado em que o veículo não está em movimento. Os pontos de ônibus podem, portanto, ser assim nomeados, bem como serem nominados como “Estações”.

A segunda explicação diz respeito às denominações das intervenções. Os nomes em português foram, em sua maioria criados pelo autor. Na bibliografia consultada são empregadas denominações em inglês já consagradas e, além disto, que expressam de forma mais sintética a natureza da intervenção, como por exemplo “*holding*”, usada para a parada forçada para regulação do serviço. Assim, no mais das vezes, ao nome em português é indicada, entre parênteses, a nomenclatura em inglês, que também pode ser empregada individualmente.

Cabe aqui uma digressão: os sistemas metroferroviários, em especial aqueles dotados de recursos relativamente mais modernos, utilizam, há muito tempo, estratégias de intervenção a partir dos registros do Sistema de Monitoração e Controle e do Sistema de Regulação. O caso do Metrô de São Paulo é significativo, uma vez que desde a entrada em operação de sua primeira linha, a Linha 1 - Azul, em 1974, as principais intervenções previstas e aplicadas³ são conceituadas a seguir:

- Agrupamento de Composições, no jargão técnico o “sanfonamento”, que consiste na concentração de trens num trecho onde a demanda se encontra substancialmente maior que no restante da linha. Com isto, o Centro de Controle Operacional - CCO consegue diminuir o intervalo entre trens (“headway”) apenas naquele trecho, aumentando virtualmente a oferta. Curiosamente, o “sanfonamento” que no Metrô é empregado para aumentar a oferta, enquanto,

³ Informações obtidas em entrevista com Caetano Jannini Netto, físico que liderou o grupo desenvolvedor dos primeiros softwares de simulação e regulação da Linha 1 – Azul do Metro na década de 1970. Foi também presidente da Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô.

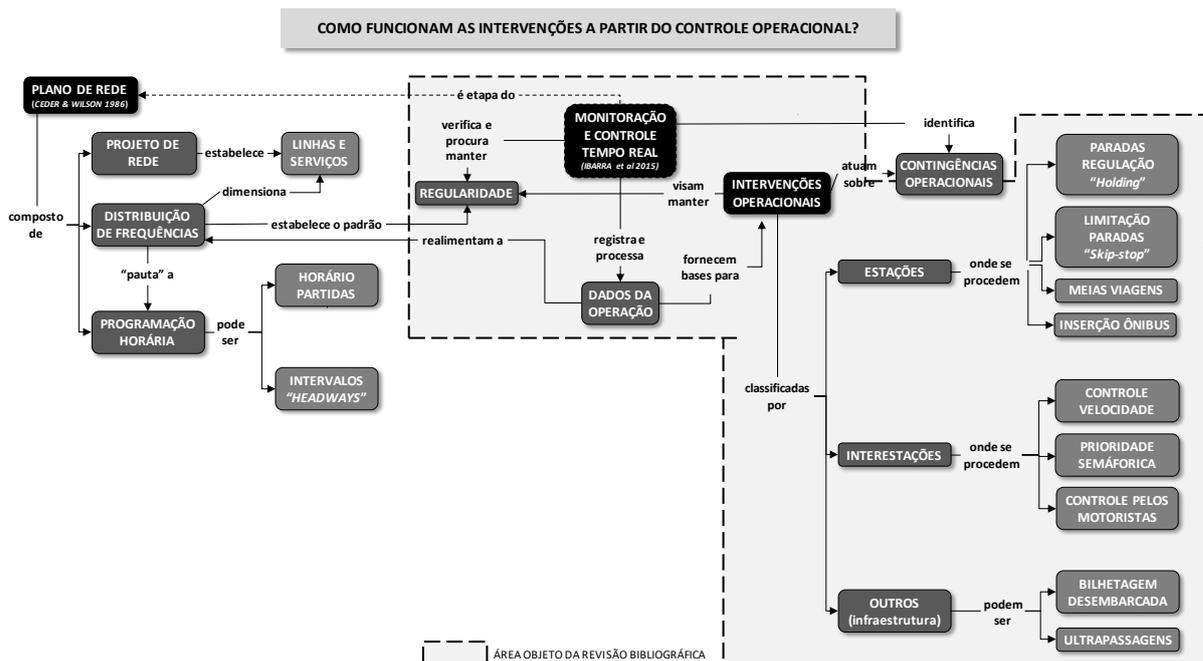
nos sistemas de ônibus é perverso, na medida em que abala a regularidade do atendimento⁴.

- Viagens Parciais - para atendimento prioritário a um determinado trecho da linha com demanda maior que nos demais trechos, são realizadas viagens que atendem apenas a um grupo de estações, subsequentes ou não. Para tanto, o Metrô conta com os recursos, na maior parte dos casos não disponíveis nos ônibus, de mensagens de áudio nas Estações e no interior dos trens que possibilitam avisos prévios tanto aos passageiros esperando nas estações quanto aos passageiros embarcados no trem sob intervenção.
- Inserção de Veículos - no jargão metroviário o “Merge”, consiste na abertura de um “espaço virtual”, que nada mais é que o aumento do intervalo entre duas composições na sequência dos trens em operação. Esse espaço deve ser o suficiente para que um trem possa entrar em operação em um dos alguns pontos da linha em que há composições estacionadas prontas para começar a operar. Criado o “espaço virtual”, o trem estacionado entra em operação, o que corresponde, na prática, ao aumento da oferta.

O Mapa Conceitual apresentado na Figura 3 emprega parte da estrutura de um Projeto de Rede para situar as intervenções, resumindo sua tipologia e definindo a área objeto desta Revisão Bibliográfica.

⁴ Ver descrição do agrupamento de veículos no item 2.2.1. desta Dissertação.

Figura 3 - Plano de Redes - Mapa Conceitual - Resumo de Etapas e Produtos



FONTES: Montagem do Autor

Fundamentos de Mapas conceituais: (NOVAK; CAÑAS, 2010) e (AGUIAR; CORREIA, 2013)

O bloco seguinte trata de demonstrar a pesquisa bibliográfica realizada, organizada segundo os diversos tipos de intervenção. Para este levantamento, além de pesquisas realizadas pelo autor, foram utilizados como referências o artigo de Ibarra et al (2015), que faz uma varredura dos trabalhos acadêmicos tratando de todas as etapas do Plano de Rede, e de Muñoz et al (2013), que fazem varredura semelhante dedicada apenas aos trabalhos relativos às Paradas para Regulação.

2.2.1. Regularidade e Agrupamento de Veículos (“Bunching”)

A regularidade em um serviço de ônibus é o produto direto do cumprimento das Tabelas Horárias ou dos Intervalos em cada linha de ônibus, oferecendo ao usuário a passagem dos ônibus em intervalos regulares. A regularidade é parte da confiabilidade dos serviços. Se atingida, será menor o tempo de espera dos passageiros.

Os ônibus, por circularem nas vias, concorrem, em maior ou menor escala com os automóveis e dependem de outros agentes com atividades ou autoridade sobre as vias públicas. São, portanto, mais vulneráveis que os metrô a fenômenos que dificultam a circulação na superfície: cruzamentos semaforizados, chuvas e outros fenômenos climáticos, acidentes e ocorrências de trânsito, falta de energia elétrica,

obras nas vias, etc. O risco de descumprimento de horários ou intervalos é constante e alto.

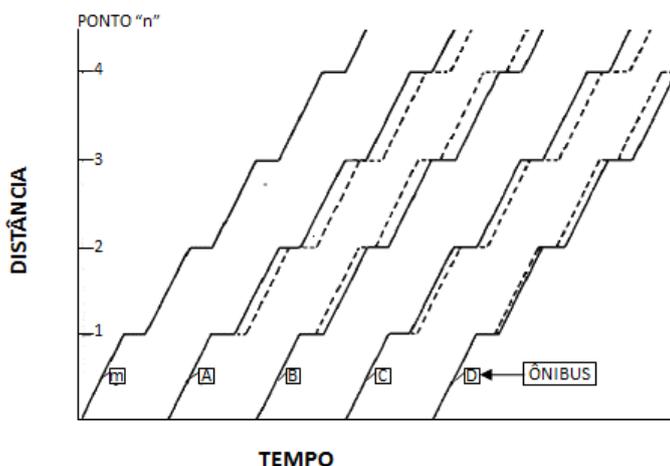
Um dos problemas comumente encontrados nas linhas de ônibus é o agrupamento de ônibus em desacordo ao programado, também conhecido no jargão metroferroviário como “sanfonamento” ou “*bunching*”. Nos idos de 1964, Newell e Potts (1964) estudaram o fenômeno, tendo chegado a um algoritmo simplificado que reproduzia a situação. Pela quantidade de citações, o artigo aparenta ser um marco, na medida em que, até onde a pesquisa bibliográfica permitiu descortinar, foi o primeiro estudo do fenômeno, que produziu um modelo matemático simplificado, mas que serviu de ponto de partida para inúmeros outros trabalhos que serão, em parte, citados mais à frente neste documento.

Aqueles autores descrevem a formação do agrupamento de veículos, considerando a operação de um serviço de ônibus chegando em intervalos regulares num ponto para embarcar passageiros. Se o percurso de um deles for ligeiramente perturbado, dois efeitos são sentidos.

Para descrever o primeiro, consideram o ônibus “A” cumprindo seu itinerário e supõem que num local do percurso tenha sofrido um pequeno atraso. Por isto, quando chegar na próxima parada, terão chegado mais passageiros para embarcar e o veículo levará mais tempo sair, aumentando o então pequeno atraso, o que vai se sucedendo à medida em que avança. O ônibus “B”, o seguinte depois do “A”, quando chegar ao mesmo ponto, terá menos passageiros para embarcar, pois o intervalo foi diminuído. Com isto, se adianta e aproxima-se do “B”. Já o ônibus “C”, como o ônibus “B” se adiantou, chegará com maior intervalo no ponto, sofrendo um novo atraso para embarcar mais passageiros. Com isto está criada a tendência de pares de ônibus chegando próximos nos pontos.

O Gráfico 1 mostra este efeito representando os percursos dos ônibus num gráfico distância x tempo, com a distância dividida entre os pontos.

Gráfico 1 - Agrupamento de Veículos Gráfico tempo x distância



FONTE: (NEWELL; POTTS, 1964)

Ao descrever o segundo efeito, Newell e Potts (1964) dirigem a atenção a um determinado ponto de ônibus. Supõem que um ônibus “E” está atrasado na chegada a este ponto. Perguntam: o próximo ônibus, o “F”, ganha mais ou menos tempo que o tempo perdido pelo veículo “E”? Fazem, então, uma análise matemática demonstrando que a resposta depende da razão entre a taxa de chegada de passageiros no ponto e a taxa de embarque de passageiros. Se, como é o usual, a taxa de chegada é menor que a taxa de embarque, então o ônibus “F” ganharia menos tempo perdido e passaria a ficar mais próximo do programado do que o ônibus “E”. Caso o efeito prossiga desta forma, a programação é gradualmente restaurada. Se a taxa de chegada é maior que a taxa de embarque, a tendência é contrária: os veículos chegarão e deixarão o ponto distanciando-se progressivamente da programação.

A notação para a modelo matemático foi:

m = ônibus “n”, “A”, “B”, “C”, “D”, ...

n = ponto de ônibus 1, 2, 3,...

t_{mn} = horário em que o ônibus “m” deixa o ponto “n” (medido a partir de $t_{00}=0$)

T_{mn} = tempo de percurso (incluindo partida e frenagem) do ônibus “m” entre os pontos “n-1” e “n”.

$$K_{mn} = \frac{\text{taxa de chegada de passageiros na parada } n}{\text{taxa de embarque de passageiros no ônibus } m}, 0 < K_{mn} < 1$$

A razão entre a chegada de passageiros e seu embarque é dada pela expressão:

Esta razão é a base para o desenvolvimento do modelo para o cálculo do número de passageiros embarcados a partir do número de passageiros chegando ao ponto. O modelo de Newell e Potts é baseado de simplificações, mas a questão da relação entre aquelas duas grandezas e a demonstração da propagação dos atrasos e agrupamento de veículos foi ponto de partida para diversos trabalhos acadêmicos que substituíram a chegada e o embarque lineares por variações mais trabalhadas e outros aperfeiçoamentos. O estudo é apontado como um dos pontos iniciais do conhecimento em diversos desses trabalhos, tais como (BARNETT, 1974), (HICKMAN, 2001) (DAGANZO, 2009), (BARTHOLDI; EISENSTEIN, 2012) (ARGOTE; XUAN; GAYAH, 2012) (PHILLIPS et al., 2015) (BERREBI; WATKINS; LAVAL, 2015) .

2.3. INTERVENÇÕES NAS ESTAÇÕES

São ações visando a regularidade dos serviços encetadas a partir de pontos de parada, designadas aqui como “Estações”. Embora os conceitos tenham sido criados antes do advento das possibilidades reais de Monitoração e Controle em Tempo Real com uso de ferramental de ITS, o entendimento atual é que sejam pontos de controle onde estão disponíveis instrumentos que permitam a comunicação de dados com a Central de Operações para que ela possa exercer o controle das ações. Em tese, esses pontos poderiam ser pontos significativos em linhas comuns, embora a bibliografia, como será visto, trabalhe, na maior parte dos casos, com Corredores de Ônibus e BRT. A segregação mais rigorosa neste tipo de sistema favorece a experimentação destes tipos de intervenção por isolarem agentes perturbadores da regularidade como, principalmente, a competição com os demais veículos no trânsito.

Nos subitens a seguir são identificadas as iniciativas encontradas. Cabe observar que elas não se esgotam neste documento, seja pela amplitude de experiências realizadas ou em curso, seja pelo dinamismo que esta área do conhecimento adquiriu a partir do advento dos equipamentos e sistemas de ITS.

2.3.1. **Paradas forçadas para regulação (“holdings”) -**

Koehler, Kraus Jr. e Camponagara (2015) definem a intervenção como a retenção de um veículo selecionado por determinado tempo nas Estações, buscando com isso reduzir a variação no intervalo entre estes. Segundo os autores, as bases para

essa estratégia foram estabelecidas por Osuna e Newell (1972) que concluíram que o tempo de espera dos passageiros nos pontos diminui com o aumento da regularidade do espaçamento e que o valor é mínimo para variação zero em relação ao espaçamento nominal. Também apontam que a Parada para Regulação é mais indicada para linhas operando com intervalos pequenos e uniformes.

Muñoz et al (2013) fazem distinção entre os “*holdings*” baseados em Tabelas Horárias daqueles baseados em intervalos (“*headways*”). Os autores ponderam que, enquanto as Tabelas Horárias são típicas em serviços com baixa frequência, os intervalos são comuns em serviços de altas frequências.

2.3.1.1. Estudos pioneiros e Paradas para Regulação Programadas

Entre os trabalhos encontrados, o ponto inicial no tempo foi o artigo de Osuna e Newell (1972) que delineia os primeiros passos na otimização da estratégia de paradas para regulação. Sua experiência foi feita sobre um sistema de ônibus idealizado, isto é não trabalha com dados da realidade, analisando apenas uma parada, tendo por objetivo a minimização dos tempos de espera. Foram desenvolvidos modelos simplificados para os casos de um e de dois ônibus circulando. Os resultados foram satisfatórios para a opção com um ônibus, mas com insucesso no caso de dois veículos circulando.

Os próprios autores admitem, ao final do trabalho, as dificuldades do problema naquela ocasião: “*Muitas outras abordagens e muitos outros exemplos devem ser analisados antes que este tipo de problema seja totalmente compreendido.*”

Arnold Barnett - 1974

O estudo de Barnett (1974), publicado pouco tempo após o de (OSUNA; NEWELL, 1972), elaborou um modelo simplificado para um trecho da Linha Vermelha do Metrô de Boston.

O exercício foi baseado no estabelecimento, na Estação Washington Street, de um ponto de controle, o que poderia melhorar a regularidade do serviço para passageiros além do ponto de controle.

O resultado da experiência foi uma redução de 10% no tempo de médio de espera, enquanto o excesso do tempo de espera em relação ao seu valor ideal de 2,5 minutos foi reduzido de 0,30 para 0,03 minutos, uma queda de cerca de 90 por cento. O tempo médio de retenção na Estação Washington Street foi um pouco

menor que um minuto. No trabalho foram considerados apenas os tempos totais de viagem, não tendo sido separados entre tempo de espera e tempo no veículo.

Mark Abkowitz; Amir Eiger e Israel Mark Engelstein - 1986

Abkowitz; Eiger e Engelstein (1986) avançam na resolução na modelagem da variação dos intervalos (“*headways*”), coroando três outros artigos por eles citados: Abkowitz, e Engelstein -1983a⁵, 1983b⁶e1984⁷.

Eles desenvolveram uma função de variação empírica do intervalo entre veículos (“*headway*”) baseada na simulação de Monte Carlo e empregaram-na para estimar o tempo de espera dos passageiros. O problema do “*holding*” foi formulado como minimização total da espera, tendo sido as variáveis de decisão o ponto ótimo de controle e o valor limite para a retenção. Os resultados mostram que esta última, por aproximações sucessivas, é bastante eficaz, com uma redução na espera total de passageiros entre 5% e 15%. Os autores também sugeriram que o ponto de espera ideal deve ser localizado imediatamente antes de estações de alta demanda.

Para compensar a falta de informações em tempo real, os autores usaram funções de densidade de probabilidade de “*headways*” ou tempos de percurso. Essas funções de probabilidade complicam a solução do problema de retenção.

Segundo Eberlein (1995), o efeito de tempo de parada faltante nos modelos de retenção, está em nítido contraste com o fato bem conhecido de que os tempos variáveis de parada do veículo, devido à variabilidade da demanda de passageiros entre estações, são uma das principais causas de variação do tempo de percurso ao longo de uma linha e na dimensão temporal. Assim, tais efeitos de tempo de parada justificam, segundo a autora, um exame mais aprofundado.

2.3.1.2. Paradas Forçadas Dinâmicas (dados em tempo real)

Xu Jun Eberlein - 1995

⁵ Abkowitz, M. and Engelstein, I. (1983a). “Factors Affecting Running Time on Transit Routes.” *Transportation Research*, 17A, 2, 107-113.

⁶ Abkowitz, M. and Engelstein, I. (1983b). “Empirical Methods for Improving Transit Scheduling.” *Proceedings of the World Conference on Transport Research*, Hamburg, West Germany, 844-856.

⁷ Abkowitz, M. and Engelstein, I. (1984). “Methods for Maintaining Transit Service Regularity,”. UMTA, Report No. NY-06-0097.

O trabalho mais abrangente encontrado na bibliografia sobre intervenções para manutenção da regularidade dos serviços foi o de Eberlein (1995). Por tratar-se de uma Tese de Doutorado e não de um artigo científico dedicado a um tema específico, sua principal marca é a abrangência, uma vez que, com base na mesma rede, cobre várias intervenções classificadas como “nas estações”: Paradas para Regulação (“*holdings*”), Limitação de Paradas, Meias-viagens (“*deadheads*”). Além disto, o trabalho cuidou simular aplicações comparadas de mais de uma técnica na mesma experiência. Por isto, o trabalho será citado repetidamente ao longo desta Dissertação conforme forem abordadas as diversas modalidades.

A Tese baseou-se nos dados reais de um trecho da Linha Verde do Metrô de Boston que, pelas informações da autora, é um metrô leve ou VLT, com quatro ramais convergindo para um trecho troncal na área central de Boston-EUA. O estudo trabalhou com um dos ramais, formando um “loop” com 26 estações com dois sentidos, formando, portanto, 52 estações virtuais.

(EBERLEIN, 1995) aponta dois objetivos de sua pesquisa. O primeiro deles é o desenvolvimento de modelos e algoritmos para as estratégias comumente empregadas, como já foi visto anteriormente, tanto singularmente quanto em combinações, assim como estudar as soluções ótimas em cada caso.

O segundo objetivo é avaliar sistematicamente essas estratégias de controle usando dados da realidade. Tal avaliação proveria, segundo a autora, o melhor conhecimento da natureza e da efetividade das intervenções, identificando as condições sob as quais as estratégias deveriam ser aplicadas.

Embora cite que a estratégia de paradas para regulação possa ser aplicada em sistemas operando tanto com Tabelas Horárias, aplicáveis a sistema com intervalos maiores, quanto com Intervalos (“*headways*”), recomendados para sistemas com maiores frequências, isto é, intervalos abaixo de 10 minutos, a Tese trabalha apenas com intervalos, visto que sua modelagem foi feita visando sistemas de mais alta capacidade.

Nas definições iniciais de sua pesquisa, esclarece que o objetivo do controle é a minimização do tempo total de espera dos passageiros em um serviço de trânsito urbano de alta frequência (intervalo entre veículos < 10 minutos), onde os passageiros chegam randomicamente nas estações e a trajetória regular do veículo é constante durante um período como, por exemplo, na hora de pico.

Como as estratégias de controle consideradas no trabalho deveriam ser implantadas em uma estação, a decisão com relação a um veículo deve ser tomada até o momento em que o veículo entra na estação de controle (estação em que vai ser efetuada a intervenção). Um sistema de controle informatizado deve ser capaz de gerar tais decisões rapidamente. No caso de um sistema de controle manual, o inspetor de campo toma uma decisão com base nas informações disponíveis sobre veículos e passageiros. A dissertação trabalha tanto algoritmos para sistemas de controle informatizados como diretrizes para sistemas de controle manual, independentemente de serem centralizados ou descentralizados.

Outra questão funcional discutida no trabalho refere-se às ordens que devam ser emitidas por um sistema de controle centralizado quando há mais de um veículo a recebê-las: o controle deve emitir instruções a todos os veículos do sistema simultaneamente ou numa sequência específica?

A autora refere que a complexidade do processo de controle simultâneo é muito maior, sendo muito mais oneroso em termos de modelagem, esforço de desenvolvimento de algoritmos e tempo de processamento e adota o controle sequencial. A nova questão levantada é: qual seria a diferença em termos de desempenho do sistema?

Para responder à questão e fundamentar a escolha do tipo de controle, o trabalho remete à discussão do número de pontos de controle. Conclui que, na prática, o número de estações de controle (segmentos) é limitado por muitos fatores, mas, principalmente, porque é caro e desnecessário fazer de cada estação na rede uma estação de controle. É improvável ser desejável que mais de um veículo consecutivo não pare na mesma estação, o que seria mal recebido pelos usuários. Além disso, em um sistema de controle descentralizado, uma decisão e sua respectiva ordem só podem ser tomadas quando um inspetor de campo está presente.

Estas são as razões pelas quais a dissertação adotou uma abordagem sequencial de tomada de decisão. Neste ponto é introduzido o conceito de “horizonte de influência”⁸ que consiste em controlar a viagem de um veículo “v” por vez, verificando o impacto resultante de controlar esse veículo exerce sobre um pequeno conjunto de viagens de veículos seguintes (“v+1”, “v+2”, ... “v+n”). O tamanho do

⁸ A autora emprega, em inglês o termo “rolling horizon” cuja definição, feita em seguida, reflete o grau de influência exercido pelo veículo analisado sobre os veículos à sua traseira. Por isto adotou-se a tradução “horizonte de influência”.

"conjunto impactado", corresponde ao tamanho do horizonte de influência. A política de controle ótimo resultante é então aplicada ao veículo considerado.

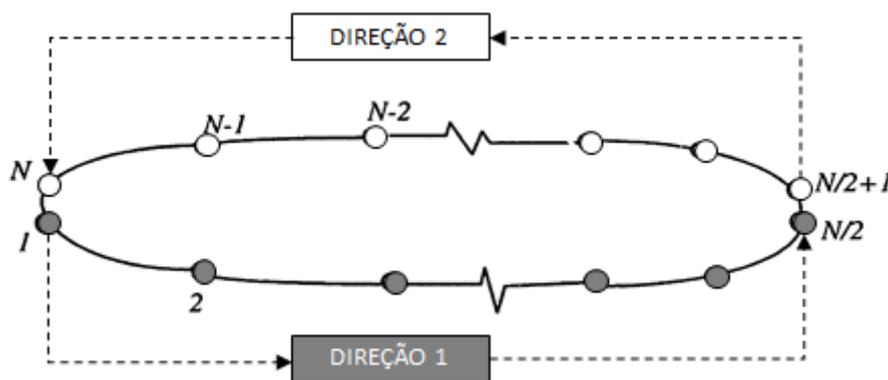
Para a montagem da rede de transporte, foi considerado um sistema unidirecional circular que, segundo a autora, tanto poderia ser uma linha metroferroviária quanto uma linha de ônibus, um serviço de alta frequência com intervalos inferiores a 10 minutos.

O sistema foi dividido em duas seções - Direções 1 e 2 - porque seu desenho circular, embora a linha seja unidirecional, permite entender os dois segmentos como ida e volta. Essa divisão envolveu o mesmo número de estações em cada Direção. A Direção 1 vai das estações 1 a 26, enquanto a Direção 2 compreende as estações 26 a 52.

Os dados empregados para a simulação foram dados reais da Green Line, extraídos nos dias úteis da semana de 16 a 20 de outubro de 2013.

A configuração esquemática da rede é mostrada na Figura 4 onde a Direção 1 vai da estação "1" até a estação "N/2", enquanto a Direção 2 vai da Estação "N/2 + 1" até a estação "N".

Figura 4 - Paradas Forçadas Dinâmicas - Eberlein (1995) - Rede empregada



FONTE: (EBERLEIN, 1995)

Nas simulações foram considerados dois sistemas típicos diferentes, caracterizados por diferentes funções de tempo de parada do veículo e de padrões de demanda de passageiros cuja descrição sumária é a seguinte:

- a) Sistema "F": Os tempos de parada dos veículos em qualquer estação não são controlados, sendo uma constante independente das atividades dos passageiros. Os tempos de percurso entre estações são uma constante para todos os veículos.

b) Sistema "G": A função de tempo de parada depende tanto do embarque como do desembarque de passageiros. Os tempos de percurso entre estações são uma constante para todos os veículos

Como é facilmente dedutível, a complexidade na modelagem das estratégias aumenta do Sistema "F" para o Sistema "G".

Para a modelagem dos dois sistemas foi considerada uma restrição para ser testada. Chamada de "restrição de programação de terminal", também poderia ser denominada de restrição de tempo de despacho de viagem programada. Na prática, incorporar a restrição de programação elimina qualquer atraso adicional no tempo de despacho programado para a próxima viagem. Em outras palavras, se um veículo já está atrasado, ele não será retido.

Os resultados para os Sistemas "F" e "G" refletem as diferenças entre eles. Inicialmente são apresentados os resultados para o Sistema "F" nas Tabelas 2 e 3, respectivamente com a restrição de programação e sem ela. Nelas estão indicados os dias da semana e a numeração que acompanha os dias representa a Direção a que se referem as informações

Tabela 2 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. "F"- COM Restrição

DIAS	M	SEM CONTROLE			COM PARADAS PARA REGULAÇÃO ("Holding")				
		Custo (Pax.min)	Headway Médio (min)	Desvio Padrão de "h"	Mudança Custo (Pax.min)	Mudança Custo (%)	Tempo Retenção (min)	Desvio Padrão de "h"	Veículos Retidos (unid)
Seg 1	36	49.114,70	4.66	1,32	-1.744,51	-3,55	19,59	1,02	18
Ter 1	35	50.409,10	4.85	1,13	-1.031,09	-2,05	12,39	0,89	15
Qua 1	34	55.021,20	5.02	1,66	-2.902,30	-5,27	9,97	1,13	5
Qui 1	37	55.002,80	4.87	1,39	-1.464,45	-2,66	14,47	1,12	19
Sex 1	31	43.244,70	4.81	0,99	-959,13	-2,22	11,08	0,69	12
Seg 2	36	38.361,50	4.60	3,94	-7.118,13	-18,56	33,44	2,98	17
Ter 2	35	37.232,50	4.92	3,53	-5.667,28	-15,22	27,69	2,63	11
Qua 2	34	39.846,70	4.95	4,00	-2.987,55	-7,5	7,84	3,6	3
Qui 2	37	38.018,00	4.82	3,49	-3.464,61	-9,11	28,19	3,00	15
Sex 2	31	30.820,70	4.87	3,27	-3.942,31	-12,79	19,74	2,52	12
MÉDIA		87.414,38	4.84	2,47	-6.256,27		1,45	1,96	
TOTAL	346	437.071,90			-31.281,36	-7,16	184,4		127
OBSERVAÇÕES									
H=5min									
% Mudança no Custo = Mudança no Custo/Custo*100%									
Custo Médio refere-se ao pico da manhã									
Tempo Médio de Retenção refere-se aos veículos retidos									

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

DIAS	M	SEM CONTROLE			COM PARADAS PARA REGULAÇÃO ("Holding")				
		Custo (Pax.min)	Headway Médio (min)	Desvio Padrão de "h"	Mudança Custo (Pax.min)	Mudança Custo (%)	Tempo Retenção (min)	Desvio Padrão de "h"	Veículos Retidos (unid)
Seg 1	36	49.114,70	4.66	1.32	-2.618,10	-5,33	31,81	0,78	28
Ter 1	35	50.409,10	4.85	1.13	-2.187,54	-4,34	27,67	0,47	26
Qua 1	34	55.021,20	5.02	1.66	-4.683,84	-8,51	38,04	0,61	23
Qui 1	37	55.002,80	4.87	1.39	-3.460,26	-6,29	33,62	0,57	29
Sex 1	31	43.244,70	4.81	0.99	-1.616,43	-3,74	21,04	0,33	23
Seg 2	36	38.361,50	4.60	3.94	-14.874,39	-38,77	94,79	1,21	26
Ter 2	35	37.232,50	4.92	3.53	-11.575,18	-31,09	71,23	1,04	25
Qua 2	34	39.846,70	4.95	4.00	-13.111,17	-32,91	99,04	1,63	27
Qui 2	37	38.018,00	4.82	3.49	-1.872,6	-31,23	92,16	1,07	28
Sex 2	31	30.820,70	4.87	3.27	-9.311,47	-30,21	61,63	0,57	25
MÉDIA		87.414,38	4.84	2.47	-15.062,40		2,20	0,83	
TOTAL	346	437.071,90			-75.311,98	-17,23	571,03		260

OBSERVAÇÕES
H=5min
% Mudança no Custo = Mudança no Custo/Custo*100%
Custo Médio refere-se ao pico da manhã
Tempo Médio de Retenção refere-se aos veículos retidos

Tabela 3 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. "F" - SEM Restrição

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

Os resultados mostram que a restrição de programação reduz significativamente a eficácia da retenção em termos de reduções no tempo de espera dos passageiros. Em todos os cinco dias simulados, a redução de custos é muito maior sem restrição. Por outro lado, quando a restrição de programação não é considerada, a retenção pode ser mais eficaz. A diferença de redução de custos é significativa com e sem a restrição: em média, por pico da manhã entre 7% e 17% do tempo total de espera de passageiros (ou entre 6.250 e 15.000 passageiros).

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados para o Sistema "G".

Tabela 5 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. "G" COM Restrição

DIAS	M	SEM CONTROLE		COM PARADAS PARA REGULAÇÃO ("Holding")					
		Custo (Pax.min)	Desvio Padrão de "h"	Mudança Custo (Pax.min)	Mudança Custo (%)	Desvio Padrão de "h"	Atraso em "N" (min)	Tempo Retenção (min)	Veículos Retidos (unid)
Seg 1	36	62.466,84	1,84	-15.385,07	-24,63	0,83	-80,82	27,29	25
Ter 1	35	62.700,51	1,73	-9.895,23	-15,78	1,19	-40,99	20,75	17
Qua 1	34	67.756,57	2,17	-9.436,20	-13,93	1,45	-38,06	11,52	9
Qui 1	37	66.082,73	1,92	-4.554,50	-6,89	1,64	2,05	14,64	17
Sex 1	31	52.427,08	1,52	-10.528,96	-20,08	0,44	-42,23	18,95	23
Seg 2	36	38.820,45	5,74	-12.202,06	-31,43	3,7	-13,41	46,92	19
Ter 2	35	37.792,15	5,3	-12.05,72	-31,90	2,71	-2,01	39,43	16
Qua 2	34	38.118,50	5,55	-5.175,36	-13,58	4,62	-3,33	16,15	7
Qui 2	37	38.640,17	5,4	-9.16,57	-23,71	3,63	2,29	36,83	20
Sex 2	31	29.938,91	4,79	-8.735,28	-29,18	2,65	2,08	34,14	18
MÉDIA		98.948,78	3,60	-19.425,59		2,29		1,56	
TOTAL	346	494.743,91		-97.127,95	-19,63		-214,43	266,62	171

OBSERVAÇÕES
H=5min
% Mudança no Custo = Mudança no Custo/Custo*100%
Custo Médio refere-se ao pico da manhã
Tempo Médio de Retenção refere-se aos veículos retidos

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

Tabela 4 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Resultados Sist. "G" SEM Restrição

DIAS	M	SEM CONTROLE		COM PARADAS PARA REGULAÇÃO ("Holding")					
		Custo (Pax.min)	Desvio Padrão de "h"	Mudança Custo (Pax.min)	Mudança Custo (%)	Desvio Padrão de "h"	Atraso em "N" (min)	Tempo de Retenção (min)	Veículos Retidos (unid)
Seg 1	36	62.466,84	1,84	-15.989,68	-25,6	0,76	-81,17	31,78	29
Ter 1	35	62.700,51	1,73	-14.541,66	-23,19	0,54	-59,59	29,43	27
Qua 1	34	67.756,57	2,17	-17.590,01	-25,96	0,68	-62,09	39,46	26
Qui 1	37	66.082,73	1,92	-14.569,38	-22,05	0,64	-62,54	34,8	29
Sex 1	31	52.427,08	1,52	-10.992,16	-20,97	0,31	-40,86	22,08	24
Seg 2	36	38.820,45	5,74	-19.206,94	-49,48	1,27	-10,6	78,69	30
Ter 2	35	37.792,15	5,3	-16.174,65	-42,8	1,29	2,33	69,46	28
Qua 2	34	38.118,50	5,55	-15.412,77	-40,43	1,97	16,16	87,07	29
Qui 2	37	38.640,17	5,4	-16.713,83	-43,26	1,2	15,02	81,27	33
Sex 2	31	29.938,91	4,79	-11.957,56	-39,94	0,66	13,80	62,22	29
MÉDIA		98.948,78	3,60	-30.629,73		0,93		1,89	
TOTAL		494.743,91		-15.148,64	-30,96		-269,54	536,26	284

OBSERVAÇÕES
H=5min
% Mudança no Custo = Mudança no Custo/Custo*100%
Custo Médio refere-se ao pico da manhã
Tempo Médio de Retenção refere-se aos veículos retidos

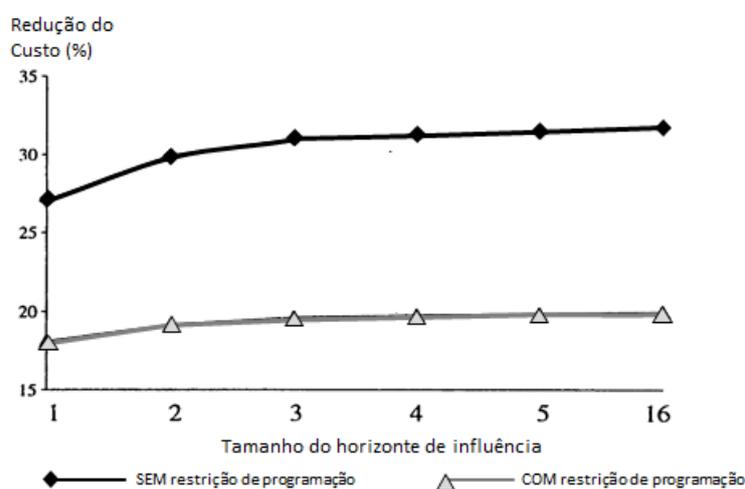
FONTE: (EBERLEIN, 1995)

Ao contrário do Sistema F, onde o atraso da espera causa exatamente o mesmo atraso no final de uma viagem, no Sistema G, a retenção de um veículo pode resultar na chegada antecipada do veículo seguinte no terminal final, reduzindo sua

demanda e, portanto, seu tempo total de viagem. Nas Tabelas 6 e 7, em mais de metade dos casos, os tempos de chegada agregados na estação N são adiantados e não atrasados, mesmo que os tempos de espera na estação k_0 sejam todos positivos. Além disso, na Tabela 6, em que foi considerada a restrição de programação, o atraso geral na estação N é reduzido.

Analisando o alcance do conceito de Horizonte de Influência, a essência desse resultado é mostrada no Gráfico 2 onde se representa a redução de custo em relação ao tamanho do Horizonte de Influência para o Sistema “G”, incluindo-se os

Gráfico 2 - Paradas Forçadas - Eberlein (1995) - Red. Custo x Tamanho HI



resultados com e sem a consideração da Restrição de Programação.

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

As configurações das duas curvas confirmam o melhor desempenho quando não é aplicada a Restrição de Programação. No entanto, o mais importante é verificar que, nos dois casos, a redução de custo se estabiliza a partir do Horizonte de Influência igual a 3, motivo pelo qual a autora recomenda esse valor como base, uma vez que não há ganhos adicionais além desse tamanho.

A quantidade de resultados e análises mostrados por (EBERLEIN, 1995) é bastante elevada. Procurou-se aqui apontar as informações mais relevantes e que apontam os efeitos da estratégia em relação à sua funcionalidade.

Jiamin Zhao, Satish Bukkapatnam, e Maged M. Dessouky

O artigo de (ZHAO; BUKKAPATNAM; DESSOUKY, 2003) descreve uma experiência de parada para regulagem (“*holding*”) cujo objetivo é minimizar a média do custo de tempo dos passageiros, incluindo tanto o custo do tempo de espera pela

chegada do ônibus (“*off-bus*”) quanto o custo do tempo de espera dos passageiros embarcados aguardando a partida do veículo (“*on-bus*”).

Os autores empregaram uma rede simulada, de formato e características próximas à rede empregada por (EBERLEIN, 1995) constando de um único serviço unidirecional e circular de alta capacidade.

Eles explicam porque não consideraram os tempos de percurso dos passageiros embarcados: (i) é dificultoso acompanhar um passageiro individualmente durante toda a sua viagem; (ii) o controle da viagem pode ser tratado como um problema independente, sendo possível seu tratamento de forma independente.

O trabalho destaca-se pelo emprego de Inteligência Artificial Distribuída - DAI na sigla em inglês e Sistemas Multiagentes (MAS na sigla em inglês).

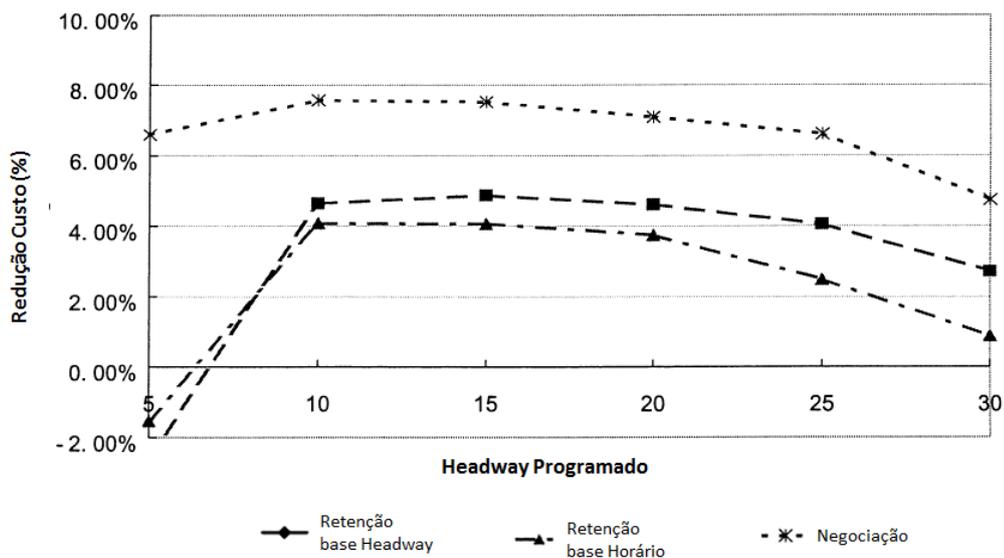
Outra particularidade é o estabelecimento do que os autores chamam de “negociação” entre um agente na estação e outro agente dentro do ônibus. O Agente da Estação busca o reconhecimento das condições operacionais naquele recinto, tomando também conhecimento da situação nas estações vizinhas. Este conjunto pode ser usado por um Agente de Ônibus para negociar com vários Agentes de Estação para obter uma solução ideal cobrindo um intervalo mais amplo.

Embora o modelo execute a estratégia na estação terminal, foram comparadas quatro estratégias alternativas nas outras estações:

- a) Estratégia de não-retenção: os ônibus não são retidos nas estações.
- b) Estratégia baseada no “*headway*”: Um veículo é retido para fazer com que o “*headway*” entre ele e o ônibus precedente seja igual ao “*headway*” entre o ele e o ônibus subsequente.
- c) Estratégia baseada na Programação Horária: Um ônibus é retido somente se chegar mais cedo do que o horário programado.
- d) Estratégia de negociação com custos marginais: Os ônibus são retidos de acordo com o algoritmo do modelo.

São apresentados a seguir alguns resultados das simulações efetuadas. A rede foi simulada com diferentes “*headways*”. Como mostra o Gráfico 4, a estratégia de negociação supera as outras, especialmente quando os “*headways*” são inferiores a 10 min. Como esperado, as diferenças entre as estratégias de negociação e na base dos “*headways*” reduzem-se à medida que os “*headways*” crescem.

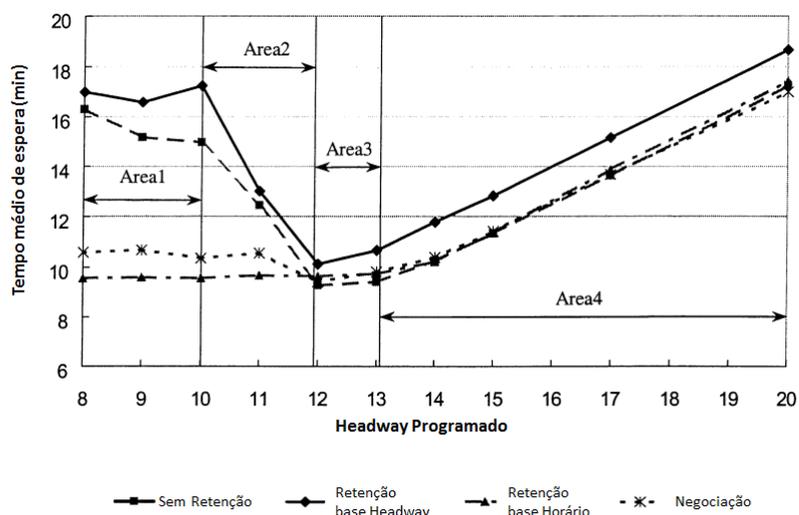
Gráfico 3 - Paradas Forçadas - Zhao et al (2003) - Red. Custos x “headway”



FONTE: (ZHAO; BUKKAPATNAM; DESSOUKY, 2003)

Os autores também procuraram determinar as melhores condições para as diferentes estratégias. Partiram dos dos tempos médios de espera obtidos em cada estratégia em relação aos diferentes níveis de “headway”. Os resultados são mostrados no Gráfico 4, onde foram determinadas “Áreas” pelo critério de comportamento dos tempos médios de espera.

Gráfico 4 - Paradas Forçadas - Zhao et al (2003) - Tpos. Médios Espera x “headway”



FONTE: (ZHAO; BUKKAPATNAM; DESSOUKY, 2003)

O gráfico mostra que a área 3 é a melhor área de trabalho para todas as estratégias, isto é, a folga deve estar compreendida entre 0,2 e 0,3 min. Na área 1, as estratégias de não-retenção e Retenção à base de “headway” são instáveis, o que pode indicar que ali situam-se pontos de distúrbio para os ônibus. No entanto, as

estratégias de Retenção na base Horária e de Negociação permaneceram estáveis. Na área 2, os tempos médios de espera para a não retenção e para a retenção na base “*headway*” reduzem significativamente à medida que a folga aumenta. A área 4 mostra que, à medida que a folga continua a aumentar, o tempo médio de espera aumentará. Em resumo, um “*headway*” programado de 12 minutos minimiza o tempo de espera médio para este cenário.

O trabalho (ZHAO; BUKKAPATNAM; DESSOUKY, 2003) embora tenha foco, como tantos outros, no desenvolvimento de algoritmos mais sofisticados, apresenta solução engenhosa para conjugar os dados dos equipamentos embarcados com os dados coletados nas paradas, de maneira a aperfeiçoar e mesmo alargar os horizontes das propostas de estratégias de intervenção.

Felipe Delgado, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesen e Aldo Cipriano

O artigo objeto desta descrição (DELGADO et al., 2009), constitui-se, de acordo as datas de publicação, o segundo de uma série de artigos produzidos pelas equipes das entidades dedicadas ao estudo avançado de técnicas operacionais para sistemas de ônibus com foco nos BRT formadas em Santiago, Chile. São pelo menos três outros trabalhos que têm em comum o emprego de modelo de Controlador Híbrido Preditivo: (SÁEZ et al., 2012), (CORTÉS et al., 2010) e (MUÑOZ et al., 2013),

O estudo de Delgado et al (2009) foi selecionado pelo ineditismo da intervenção proposta. Tratou de determinar a estratégia ótima de controle de veículos para as várias estações em um sistema de transporte público, focalizando estratégias para a retenção de veículos combinadas com estratégias de limitação de embarque quando os veículos atingiam o limite de capacidade, visando aumentar a velocidade de operação do veículo.

O estudo trabalhou com uma rede simulada, de formato e características próximas à rede empregada por (EBERLEIN, 1995), constando de um único serviço unidirecional e circular de alta capacidade.

São requisitos do modelo a disponibilidade, a qualquer momento, de informações em tempo real sobre a posição do veículo e o número de passageiros a bordo de cada um, assim como sobre o número de passageiros que aguardam nas várias estações.

O modelo proposto é aplicado num corredor de transporte público imaginário com 24 estações uniformemente espaçadas a cada 500 m, sendo servida por uma frota de 14 ônibus, cada um com uma capacidade de 70 passageiros. A velocidade de operação do veículo para todos os ônibus é de 17 km/h e o tempo de embarque por passageiro é de 2 s.

A função objetivo do cenário modelado é resolvida usando três estratégias de controle diferentes. Os dois primeiros (sem controle e apenas “holding”) são benchmarks para fins de comparação, e o terceiro é o método de controle proposto para o estudo:

- Sem controle: ônibus 9 a 14 expedidos a partir do terminal com “headways” médios de 6 min.
- Apenas retenção (“holding”): aplicada na suposição (errônea) de que a restrição de capacidade do ônibus nunca será ativada.
- Controle proposto: Modelo proposto, que aplica tempos de retenção e o impedimento de embarcar em função da limitação de capacidade dos veículos.

Os resultados obtidos para os componentes do tempo de viagem gerados pela função objetiva sob as três estratégias formuladas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Paradas Forçadas - Delgado et al (2009) - Tempos de Viagem

ESTRATÉGIA	TEMPO DE VIAGEM (min)				VARIÇÃO RELATIVA NÃO CONTROLE (%)		
	Nos Veículos	Nas Estações	Extra	Total	Nas Estações	Extra	Total
Não controlada	—	7,380.90	1,341.03	8,721.93	—	—	—
Somente retenção	412.88	6,457.33	1,308.55	7,765.88	-12.51	-2.42	-10.96
Controle Proposto	110.37	6,574.89	220.45	6,795.34	-10.92	-83.56	-22.09

OBSERVAÇÕES:

$$\text{Variação \%} = \frac{(\text{"resultado"} - \text{não controle})}{\text{não controle}} \times 100$$

*"resultado" pode ser o valor de "somente holding" ou "Controle Proposto"

FONTE: (DELGADO et al., 2009)

Considerando apenas a retenção em relação ao não controle foi observado:

- o valor do tempo total de viagem diminui 11% ;
- o tempo de espera na estação declina 12,5%, mas ao custo de tempo de espera adicional na forma de atraso de espera no veículo. O tempo de espera extra é aquele imposto aos usuários que têm que esperar por mais de um

ônibus por conta da aplicação das restrições de capacidade, caindo apenas em 2,4%.

Na estratégia do Controle Proposto, observa-se uma melhora de 22,1% no valor da função objetiva em relação ao sem controle, enquanto o tempo de espera pela parada cai 10,9%, uma cifra muito similar aos ganhos obtidos com apenas retenção. Destaca-se também na Tabela 9 que o tempo de espera extra imposto aos passageiros que estão impedidos de embarcar no primeiro ônibus é reduzido em 83,6%.

A inovação mais marcante nesse trabalho é a desagregação praticamente completa dos tempos de viagem e a introdução da restrição de capacidade dos veículos como parte dos instrumentos de regulação dos “*headways*”.

Pedro Lizana, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesena., Felipe Delgado

De todos os trabalhos consultados, foi o único a abordar um caso de desenvolvimento de técnica aplicado na prática. O estudo de Lizana et al (2014) trata da formulação de modelos para busca da regularidade do serviço no Sistema Transantiago de Santiago, Chile. Implantado a partir de 2007, aquele sistema enfrentou inúmeros problemas que levaram a uma crise no transporte público da cidade. Encetou-se um processo de recuperação da credibilidade dos serviços e, em 2012 instituíram-se penalidades para operadores que não mantivessem regularidade. Em paralelo, visando preencher esta lacuna, a equipe de autores desenvolveu um software com controle em tempo real que se apoiou na estratégia de retenção baseada em “*headway*” desenvolvida por Delgado et al (2012)⁹. A principal variável empregada na solução da otimização é a retenção dos ônibus nas estações.

As restrições do modelo representam a evolução do corredor no tempo. Por exemplo, ultrapassagens não foram permitidas, o tempo de percurso dos ônibus entre as estações, assim como a demanda de passageiros são determinísticos e os tempos de parada são decorrentes dos perfis de embarque e desembarque.

Segundo os autores, os dados necessários como entrada para o modelo de otimização podem ser classificados em dois grupos: dados estáticos relacionados a

⁹ Delgado F, Muñoz JC, Giesen R. - How much can holding and limiting boarding improve transit performance – 2012 - Transportation Research Part B Vol. 46 Issue 9 – pp.1202-1217.

informações que permanecem constantes à medida que o sistema evolui no tempo; e dados dinâmicos, que variam durante as iterações para a otimização do modelo.

As informações estáticas, basicamente, são:

- número de estações na linha e a distância entre elas;
- tempo médio de embarque e desembarque por passageiro;
- Matriz de demanda Origem-Destino (OD): número médio de viagens que embarcam na parada "i" e descem na parada "j";

Os dados dinâmicos constituem-se em:

- número de ônibus que operam na linha, sua capacidade posição no itinerário;
- velocidade ou tempo de viagem entre estações consecutivas
- passageiros esperando em cada estação de ônibus
- passageiros embarcados em cada ônibus em cada estação atendida.

Conforme a disponibilidade de equipamentos e sistemas, dados estáticos podem tornar-se dinâmicos e vice-versa.

As informações de localização de veículo e da demanda de passageiros são recuperadas, filtradas e processadas. Usando estes dados como entrada, o modelo de otimização é resolvido dando o tempo ótimo de retenção e aceleração para cada ônibus em suas respectivas próximas paradas. Finalmente, as instruções de retenção e aceleração são armazenadas e enviadas para o motorista e atualizadas quando ocorre a próxima rodada de otimização. As emissões de instruções são transmitidas a cada minuto. Em seguida, as instruções de controle para as três primeiras estações a jusante de cada ônibus são enviadas para o respectivo operador.

Foram realizadas duas implantações piloto em novembro de 2012 e abril de 2013 com a linha 210 que atravessa a cidade na direção norte-sul. O serviço opera com frequência de 3 a 4 minutos de intervalo entre ônibus no pico da manhã e transporta cerca de 48 mil passageiros por dia, dos quais 9,5 mil durante o pico da manhã.

Os pilotos consistiram na execução de paradas para regulação em 24 estações de um total de 135, utilizando o sistema GPS do veículo como entrada para o modelo.

Os resultado nos dois pilotos foi a redução da quantidade de multas por falta de regularidade, que foram 50% a 60% menores que nos dias sem controle. Ocorreu também aumento de demanda da ordem de 20% o que, segundo os autores, deveu-se, provavelmente, à redução de evasão de tarifas: com a situação anterior

caracterizada por ônibus lotados, muitos passageiros não embarcavam pela porta regulamentar, a da frente, mas, sim, entrando sem pagar pela porta traseira.

2.3.2. Serviços com Paradas Limitadas (“skip stops”)

2.3.2.1. Conceitos e origens

A intervenção consiste no estabelecimento de trechos de linhas nos quais ônibus selecionados não oferecerão serviços de embarque e desembarque, parando apenas em um grupo pré-determinado de pontos.

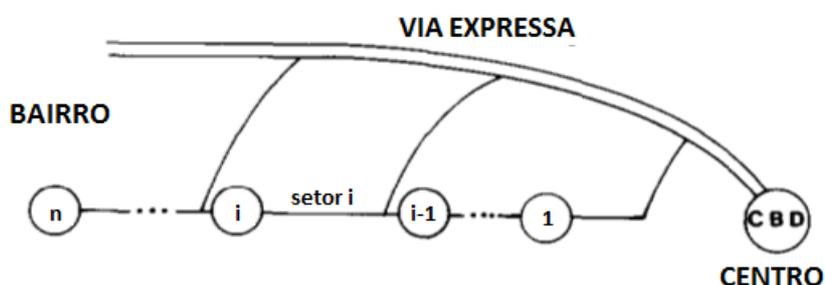
Os benefícios desse tipo de intervenção decorrem das reduções dos tempos de parada em função da eliminação de serviço em pontos determinados. Com isto, como os ganhos são refletidos nos tempos totais de viagem.

Sun e Hickman (2005) citam Vuchic (1973)¹⁰ entre os primeiros que descreveram e avaliaram de forma abrangente o “*stop-skipping*” num contexto operacional.

Um artigo de Furth (1986) trata de uma aproximação desse tipo de intervenção, propondo um modelo que poderia ser chamado de “Linhas Zonais”. Estes serviços, após atenderem todos os pontos de uma zona próxima ou contígua à uma via expressa que liga bairros ao centro, ao chegarem nesta via assumem característica de linha expressa, fazendo poucas ou nenhuma parada até chegar à região central.

O tipo de serviço é esquematizado na Figura 5.

Figura 5 - Linhas Zonais - Representação esquemática



FONTE: (FURTH, 1986) Tradução do autor

Silverman (1998) relata que nos Estados Unidos, desde as décadas de 1960-1970 surgiram os serviços com paradas limitadas (“*limited-stop services*”). O autor cita sistemas desse tipo em New York (objeto do estudo de Silverman), Los Angeles,

¹⁰ Vuchic, V. (1973). Skip-stop operation as a method for transit speed increase. Traffic Quarterly, Vol. 27, pp. 307-327.

Denver, San Francisco, Miami, Pittsburgh e Chicago. Ressalva, entretanto, ter sido na década de 1980 que esses serviços tornaram-se mais comuns.

Apona, também, à época da elaboração de seu trabalho, a existência do total de cerca de 200 linhas na cidade de New York, das quais 25 linhas com paradas limitadas. Destas 25, 14 operavam somente durante horas de pico, com 11 delas operando apenas no sentido da maior demanda. Oito linhas operavam aos sábados, e 2 destas operavam também aos domingos.

Tais linhas, portanto, tratam-se de serviços expressos com paradas regulares, não sofrendo intervenções durante sua operação, sendo formuladas na etapa de programação dos serviços. Assim, diferem essencialmente das intervenções feitas durante a operação no sentido de deixar de atender algumas paradas, por tempo não limitado e em segmentos não programados.

Este último tipo de intervenção surgiu a partir da possibilidade, trazida pelos equipamentos e sistemas de ITS relativos à Monitoração e Controle operacionais, em que as contingências podem ser detectadas, assim como é possível a realização de intervenções por meio de comunicação com os motoristas.

A maioria dos trabalhos consultados relativos à limitação de paradas trata de serviços programados com paradas limitadas. O que os estudos mais recentes sobre tais serviços programados trazem de novo é maior sofisticação nos métodos de modelagem, com a inclusão de novas e mais pormenorizadas variáveis. Assim é, entre outros, com, (LEIVA et al., 2010), (CORTÉS et al., 2010), (FENG et al., 2013), (CAO; YUAN; LI, 2014) e (LARRAIN; MUÑOZ, 2016).

Para efeito de simplificação da terminologia, passa-se a denominar a limitação previamente programada de paradas como “Limitação Programada de Paradas”, enquanto a limitação definida e implantada durante a operação como “Limitação Dinâmica de Paradas”.

Segundo Larrain e Muñoz (2016) os benefícios proporcionados por este tipo de intervenção atendem os diversos “stakeholders” do transporte. Para os passageiros, o número relativamente baixo de paradas implica na redução dos tempos de viagem. Para operadores, a redução dos tempos de ciclo na linha torna mais eficiente a operação e, por consequência, reduz os custos operacionais, além de, adicionalmente, o aumento de velocidade permitir a manutenção de um determinado nível de serviço com uma frota menor.

No entanto, vários autores, tais como (LARRAIN; MUÑOZ, 2016), (SUN; HICKMAN, 2005), (CAO; YUAN; LI, 2014) chamam a atenção para uma contradição do método: enquanto há ganhos de tempo pelos passageiros atendidos nas paradas selecionadas, há aumento do tempo de espera dos passageiros nas paradas não atendidas.

Sun e Hickman (SUN; HICKMAN, 2005) preocupam-se com os passageiros que esperam ou têm destino nos pontos não atendidos. Nesse sentido, conduzem seu estudo analisando duas alternativas: uma que considera o trecho de Paradas Limitadas imutável, enquanto a outra permite que passageiros que queiram desembarcar em pontos não servidos, podem fazê-lo. Nestes casos, os embarques serão permitidos.

O modelo desenvolvido por esses autores foi aplicado às duas estratégias e será relatado, assim como seus resultados, mais à frente neste documento.

2.3.2.2. Modelos de Limitação Programada de Paradas

Carola Leiva, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesen, Homero Larrain - 2010

Ceder (2003)¹¹, Desaulniers e Hickman (2007)¹² e Guihaire and Hao (2008)¹³ são citados por Leiva et al (2010) como trabalhos relativamente recentes sobre o tema, mas com limitação em comum por não considerar, na representação da alocação, as restrições de capacidade. Os autores da citação acrescentam que, pelo conhecimento que dispunham, Fernández et al (2003¹⁴, 2008¹⁵) foram os primeiros trabalhos a considerar as restrições de capacidade num modelo único, incorporando o comportamento do usuário.

O estudo de Leiva et al (2010) propôs um método de otimização para a especificação de serviços com paradas limitadas programadas, que buscam

¹¹ Ceder, A., 2003. Designing public transport network and routes. In: Lam, W.H.K., Bell, M.G.H. (Eds.), *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*. Pergamon, pp. 59–92.

¹² Desaulniers, G., Hickman, M., 2007. Public transit. In: Barnhart, C., Laporte, G. (Eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science*, vol. 14. North-Holland, Amsterdam, pp. 69–128 (Transportation).

¹³ Guihaire, V., Hao, J.K., 2008. Transit network design and scheduling: a global review. *Transportation Research Part A* 42 (10), 1251–1273.

¹⁴ Fernández, J.E., De Cea, J., Norambuena, I., 2003. Una Metodología para el Diseño Topológico de Sistemas de Transporte Público Urbano de Pasajeros. *Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*, Santiago, Chile, pp. 219–231.

¹⁵ Fernández, J.E., De Cea, J., Malbran, H., 2008. Demand responsive urban public transport system design: methodology and application. *Transportation Research Part A* 42 (7), 951–972.

minimizar os custos sociais da limitação num corredor de vias segregadas, assumindo como conhecidas as demandas.

Ibarra-Rojas et al (2015), em sua resenha, destacam que o estudo trabalhou com três cenários: (I) não considerando restrições de capacidade nem transferências; (II) considerando os dois atributos anteriores; (III) considerando diferentes dimensões dos veículos.

O estudo aplicou o modelo numa simulação com dados reais do Corredor da Avenida Pajaritos em Santiago, Chile, trabalhando com 19 pontos de parada com 23 linhas com limitação de paradas programadas incluindo serviços expressos, “loops” e meias viagens.

Os resultados numéricos apresentam redução dos custos superiores a 10% em todos os cenários com a implantação de linhas com paradas limitadas programadas. Os resultados também apontam que os benefícios são maiores quanto maiores forem as extensões das viagens, assim como quanto maior for a variabilidade da demanda.

Deve ser observado, entretanto, que o trabalho teve seu foco mais voltado para o desenvolvimento do modelo do que em sua aplicação efetiva. A maior preocupação com a modelagem fica expressa nas diversas considerações e sugestões indicadas nas conclusões.

Virot Chiraphadhanakul e Cynthia Barnhart - 2013

No início de seu relato, Chiraphadhanakul and Barnhart (2013) lembram que as linhas com paradas programadas limitadas são usualmente empregadas nos sistemas de ônibus de Bogotá-Colômbia (Transmilênio), Chicago, New York, Montreal e Santiago (Transantiago).

Segundo os autores, seu objetivo era encontrar o caminho ótimo para o funcionamento em paralelo de uma única linha de paradas limitadas e das linhas locais existentes, alcançando assim os benefícios da limitação sem aumentar a frota. Para chegar ao objetivo, os autores focaram em mudanças incrementais na programação original. Isto é, reconfigurando algumas linhas locais.

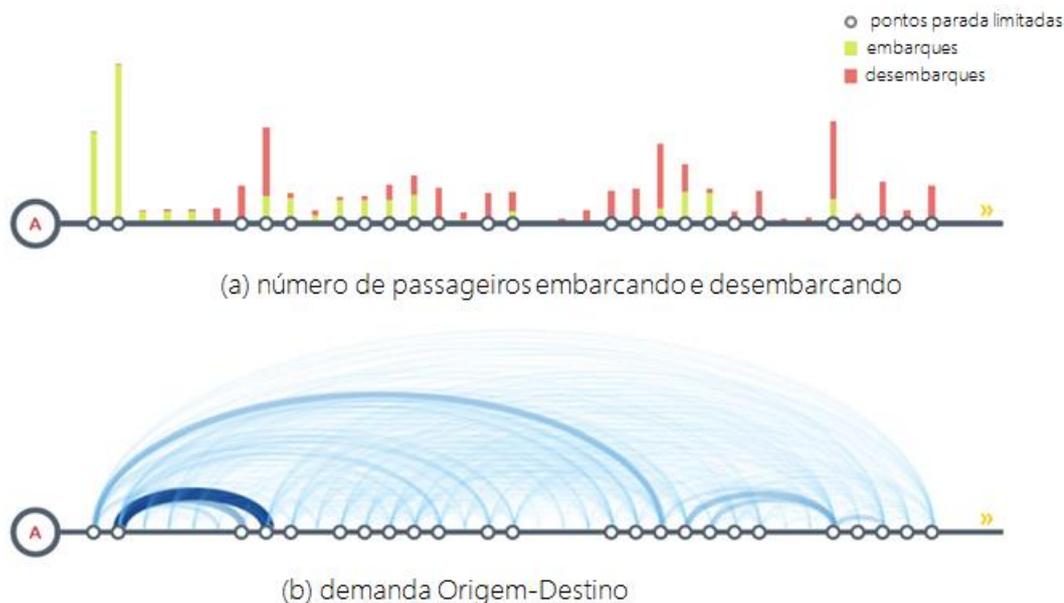
Os autores tiveram acesso a dados reais de um operador de ônibus de uma grande cidade¹⁶. O conjunto compreendeu informações sobre os percursos das linhas e respectivas expectativas de demandas (Origem-Destino) de 178 linhas com altas frequências, operando em intervalos iguais ou inferiores a 15 minutos. O experimento trabalhou com duas horas de pico da manhã (07h00 à 09h00).

Entende-se ser este um aspecto notável do trabalho: a modelagem foi testada numa quantidade significativa de linhas.

O Gráfico 5 mostra os resultados para o serviço limitado programado, com (a) número de passageiros embarcando em cada ponto e (b) demandas de origem e destino

¹⁶ O artigo não fornece dados tanto do operador quanto da cidade referidos.

Gráfico 5 “Skip-Stop” - Chiraphadhanakul and Barnhart (2013) - Resultados 1



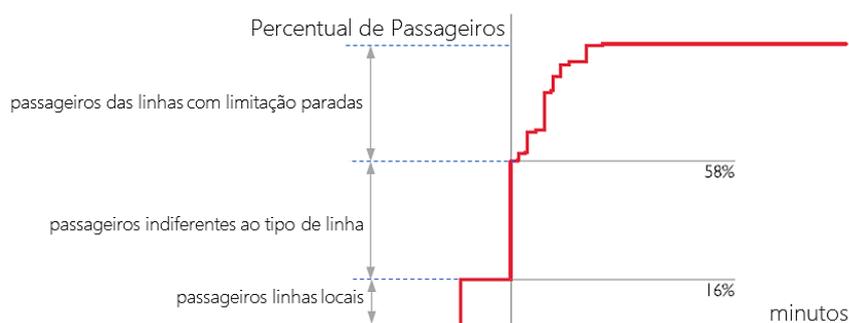
FONTE: (CHIRAPHADHANAKUL; BARNHART, 2013) Tradução e adaptações do autor

No gráfico está representada uma linha (A) representativa do conjunto. Na parte a) do gráfico está o número de embarques e desembarques em cada estação, enquanto na parte B estão representadas as curvas envoltórias de origem-destino dos passageiros, sendo que a espessura dos traços expressa o volume.

O gráfico evidencia que a maioria dos pontos com altas demandas está incluída na linha com limitação de paradas, o que não quer dizer que não haja estações da linha local que tenham demanda superior à linha com limitação.

Com o objetivo de expor o alcance das modificações nos tempos de viagem, os autores apresentaram o Gráfico 6 onde está traçada a curva de percentual acumulado de passageiros com ganhos ou perdas nos tempos totais de viagem

Gráfico 6 - “Skip-Stop” - Chiraphadhanakul and Barnhart (2013) - Resultados 2



(espera no ponto + tempo embarcado).

FONTE: (CHIRAPHADHANAKUL; BARNHART, 2013) Tradução e acréscimos do autor

Esses resultados mostram que 16% dos passageiros, não servidos pela linha com limitação tiveram aumento de 3 minutos nos seus tempos de viagem em virtude da reconfiguração das linhas locais. 42% dos passageiros não tiveram alterações e representam aqueles servidos por ambas as linhas e para os quais todas as paradas entre sua origem e seu destino são servidas por linhas com limitação. Os restantes 42% dos passageiros tiveram reduções nos seus tempos de viagem, com esses ganhos variando entre 0,4 e 5,5 minutos, com média de redução de 2,3 minutos.

O trabalho, embora tivesse em seu objetivo central o desenvolvimento de modelagem, apresenta dois aspectos relevantes: simulações a partir de dados operacionais reais e o trabalho com o elevado número de 178 linhas.

Homero Larrain, Ricardo Giesen, and Juan Carlos Muñoz - 2011

Este trabalho pode ser considerado como extensão e aprofundamento de (LEIVA et al., 2010) na medida em que toma como ponto de partida técnico a modelagem daquele artigo, acrescentando novos desenvolvimentos e ampliando o leque de opções analisadas.

No modelo, o objetivo é a minimização dos custos sociais correspondentes à soma dos custos operacionais, em tempos de viagem do veículo, dos tempos de espera e das transferências.

Os autores definiram quatro parâmetros para identificar e diferenciar vários perfis de demanda de corredores, mais precisamente 81 cenários de demanda que representam os perfis de demanda selecionados, assim como 28 linhas associadas a tais perfis.

O primeiro padrão de linha é um serviço local com parada em todos os pontos do corredor. O padrão seguinte é composto de linhas locais parciais (“*loops*”) com parada em todos os pontos entre dois pontos do corredor. O terceiro grupo contém serviços expressos construídos com diferentes combinações de pontos. O quarto grupo consta de linhas com linhas Meia-viagem (“*deadheads*”), isto é, com parada em todos os pontos no sentido de pico e retorno ao ponto inicial sem paradas no sentido oposto. As linhas remanescentes foram agrupadas num quinto conjunto composto de linhas com paradas limitadas estabelecidas com diversos critérios.

Foram também definidos os seguintes indicadores para avaliar a significância e os potenciais benefícios oferecidos pelos serviços nos cenários estudados:

I - Participação do Serviço Expresso - Participação Ótima do serviço expresso. percentagem da frota total atribuída a serviços que não tenham paradas em todos os pontos num dado cenário.

II - Numero de serviços diferentes - Este indicador refere-se ao número de serviços que coexistem dentro da concepção ótima de um determinado cenário.

III - Redução dos custos sociais - expressa a percentagem de redução do valor do custo total em comparação com o valor de um serviço local que opera na frequência ótima.

Os resultados desagregados por Cenário e por parâmetro são mostrados na Tabela

Tabela 7 - “Skip-Stop” - Larrain, Giesen e Muñoz (2010) - Resultados por Cenário

	Participação				Número de Serviços				Redução de Custo Social			
	Perfil 1 (%)	Perfil 2 (%)	Perfil 3 (%)	Total (%)	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3	Total	Perfil 1 (%)	Perfil 2 (%)	Perfil 3 (%)	Total (%)
Escala de Demanda												
Baixa	36.5	28.5	22.8	29.3	1.8	1.6	1.8	1.7	3.12	2.49	1.07	2.23
Média	47.6	33.5	39.1	40.1	2.1	1.7	1.9	1.9	3.99	3.51	1.85	3.12
Alta	56.0	33.5	44.1	44.5	2.3	1.7	2.0	2.0	4.56	3.89	2.48	3.64
Desequilíbrio												
Baixo	46.5	33.5	38.6	39.5	2.4	1.7	2.0	2.0	3.83	3.36	2.06	3.08
Médio	38.0	33.5	35.5	35.7	2.0	1.7	1.9	1.9	3.67	3.42	1.71	2.93
Alto	55.6	28.5	31.9	38.7	1.8	1.6	1.8	1.7	4.17	3.11	1.64	2.97
Compr. Médio Viagem												
Baixo	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.00	0.00	0.00	0.00
Médio	40.0	39.8	43.7	41.2	2.1	1.9	2.1	2.0	4.38	3.88	2.46	3.57
Alto	100	55.8	62.3	72.7	3.1	2.0	2.6	2.6	7.30	6.00	2.94	5.41

7.

FONTE: (LARRAIN; GIESEN; MUÑOZ, 2011)

Com relação à escala de demanda, os resultados demonstram que altos níveis de demanda tornam a implantação de serviços expressos mais atrativos do ponto de vista da participação, da variedade de serviços e da melhoria nos custos sociais.

Em relação ao desequilíbrio da demanda, este fator não parece ser particularmente relevante para os serviços expressos, com exceção do Perfil 1, em que os desequilíbrios levam ao menor uso dos serviços locais e maior redução de custo total

Os resultados revelam uma forte relação entre o comprimento da viagem e o potencial dos serviços expressos. Quanto maior o cumprimento da viagem, mais claramente se justifica a implantação de serviços expressos.

Em suas conclusões fazem algumas sugestões com relação às condições para implantação de serviços expressos, como a análise de configurações mais

complexas desse tipo de serviço. Também sugerem a análise da implantação de serviços mistos para casos em que há forte desbalanceamento de demandas entre os sentidos (pendularidade).

Assim como nos outros trabalhos aqui já examinados, os objetivos do trabalho são alcançados, visto que estavam associados principalmente ao desenvolvimento de modelos. O que se percebe é um certo distanciamento da realidade operacional dos serviços de ônibus, expresso, por exemplo, no emprego de modelos para a geração de demandas, como fizeram os autores.

Um aspecto bastante interessante deste estudo foi a realização de testes em diversas condições de demanda, de desequilíbrio de demanda, de comprimentos médios de viagem, que podem apontar para caminhos a serem seguidos na proposição de intervenções e investimentos.

Sun Feng, ZhuWen-tao, Ye Ying e Wang Dian-hai

Os autores (FENG et al., 2013) iniciam informando que, na época da elaboração do artigo, na China, as cidades de Xangai e Shenzhen já haviam começado a adotar esta estratégia operacional. No entanto, a maioria das cidades daquele país trabalha apenas com o serviço local (parada em todos os pontos), alegando complexidade operacional e a falta de metodologia na modelagem de um esquema operacional otimizado.

Eles enfatizam o fato de haver muitas vias sem segregação para ônibus nas cidades da China e que isto deve ser levado em conta, sob pena de estimativas imprecisas do tempo de viagem.

Também chamam a atenção que na bibliografia por eles referida como (EBERLEIN, 1995), (FU; LIU; CALAMAI, 2003), (LEIVA et al., 2010) a maioria dos estudos anteriores foram feitos somente para uma linha de ônibus congestionada, não apresentando uma análise do conjunto das linhas de ônibus passando pelas vias.

Baseado nesses argumentos, o estudo propõe um método de otimização para a concepção de serviços de paradas limitadas programadas visando minimizar o tempo total de viagem para passageiros em condições de tráfego misto. Não houve, portanto o objetivo de analisar os ganhos de tempo em termos de custo operacional. Não é explicitado no texto se o sistema empregado como modelo é um corredor segregado ou linhas competindo no trânsito com os demais modos. O texto leva a

crer tratar-se de linhas competidoras, até porque o modelo calcula as variações de tempo de viagem para os automóveis.

Tabela 8 - “Skip-Stop” - Feng, Wen-tao e Dian-hai (2010) - Serviço Local x “Skip-stop”

Cenário	Viajantes - Autos		Viajantes - ônibus		Tempo Total Viagens (min)
	Tempo Viagem (min)	Espera (min)	Tempo Viagem (min)	Veículo (min)	
Original	34,966	8,505	296,553	305,058	340,024
Otimizado	30,471	12,228	273,427	285,655	316,126
Varição (%)	-12.86%	43.77%	-7.80%	-6.36%	-7.03%

Os resultados do modelo são apresentados na Tabela 8.

FONTE: (FENG et al., 2013) - Tradução do autor

Nos resultados é notável a redução de tempo para os viajantes de automóveis (-12,86%) ser maior que a redução para os viajantes de ônibus. Fato que deve ser considerado ao analisar este trabalho.

Não foi localizada nenhuma referência à maior ponderação do tempo de espera que, em muitos estudos, em função da percepção negativa dos passageiros, recebem peso maior que o tempo no veículo.

2.3.2.3. Modelos de Limitação Dinâmica de Paradas

Trata-se, agora, de verificar os experimentos com a limitação de paradas dinâmica definida no subitem 2.3.2.1. acima. Para esta modalidade, a quantidade de trabalhos encontrada é mais restrita, até porque o tema somente pode ser tratado após o advento das ferramentas de ITS, uma vez que o controle em tempo real sem esses instrumentos é extremamente difícil, senão impraticável.

Xu Jun Eberlein

A Tese de Doutorado de Eberlein (1995) foi anteriormente citada nesta Dissertação no item 2.2.1.2. . Como a autora pesquisou diversas estratégias de intervenção aplicadas sobre a mesma rede e base de dados, estes aspectos não serão aqui repetidos, concentrando o relato e a análise no tratamento da estratégia de limitação dinâmica de paradas.

A autora manifesta, de início, seu interesse em comparar as condições de aplicação e resultados desta estratégia com a experiência da Meia-viagem (MV). As duas estratégias guardam semelhanças uma vez que atravessam diversas paradas sem atendê-las, tanto é que alguns autores consideram a MV como um tipo de limitação

de paradas, com o que não concorda a autora, que as diferencia pelo fato de a MV percorrer o trecho sem atendimento sem passageiros a bordo, enquanto na limitação de paradas o trecho sem atendimento é percorrido com passageiros embarcados, ampliando, de alguma maneira, a oferta de lugares.

O problema a ser solucionado em tempo real é decidir qual veículo deve ser designado para a limitação de paradas, e o trecho em que será implantada a limitação.

O objetivo desta seção do trabalho de Eberlein (1995) é a minimização dos tempos de espera totais de passageiros num serviço de trânsito urbano de alta frequência (“*headway*” previsto inferior a 10 minutos), em que os passageiros chegam aleatoriamente a estações e o percurso previsto do veículo é constante durante um período.

A autora, no caso das limitações dinâmicas de paradas, trabalha nas simulações da Limitações de Paradas simultaneamente com as meias viagens (“*deadheadings*”) de maneira a comparar seus desempenhos.

Inicialmente compara os resultados das limitações de paradas com a situação “sem controle”. Os resultados, destacados para o Sistema “F” descrito no item 2.2.1.2. são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 - “Skip-stop” - Eberlain (1995) Serviço Local x “Skip-stop” - Sist. “F”

DIAS	M	SEM CONTROLE		EXPRESSO (Limitação de Paradas)				
		Custo (Pax,min)	Desvio Padrão de “h”	Estações sem Atend. (unidades)	Veículos Expressos (unidades)	Mudança Custo (Pax,min)	Mudança Custo (%)	Desvio Padrão de “h”
Seg 1	36	49.114,70	1,32	11	10	-492,76	-1	1,08
Ter 1	35	50.409,10	1,13	11	9	-876,39	-1,74	0,7
Qua 1	34	55.021,20	1,66	12	9	-928,13	-1,69	1,3
Qui 1	37	55.002,80	1,39	15	8	-1.643,30	-2,99	0,85
Sex 1	31	43.244,70	0,99	7	6	-513,29	-1,19	0,69
Seg 2	36	38.361,50	3,94	46	12	-6.659,35	-17,36	2,29
Ter 2	35	37.232,50	3,53	47	13	-5.905,11	-15,86	1,8
Qua 2	34	39.846,70	4,00	36	9	-5.388,60	-13,52	2,66
Qui 2	37	38.018,00	3,49	39	11	-5.006,76	-13,17	2,18
Sex 2	31	30.820,70	3,27	40	11	-4.481,95	-14,54	1,71
Total	346	437.071,90		264	98	-31.895,64	-7,30	
Média		87.414,38	2,47			-6.379,13		127

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

- Os resultados da redução de custos com a implantação da limitação de paradas (7,3%) mostram bastante proximidade com aqueles obtidos com a estratégia de paradas para regulação (“holding”) (7,16%)

A simulação também promoveu uma comparação entre resultados da Estratégia de Limitação de Paradas e da Estratégia da MV (“deadheading”), que é mostrada na Tabela 10.

Tabela 10 - “Skip-stop” - Eberlain (1995) - Serviço Local x “Skip-stop” - Sist. “G”

DIAS	EXPRESSO (Limitação de Paradas)			MEIAS VIAGENS (“Deadheading”)		
	Mudança Custo (%)	Estações sem Atend. (unidades)	Veículos Expressos (unidades)	Mudança Custo (%)	Estações sem Atend. (unidades)	Veículos Expressos (unidades)
Seg 1	-1,00	11	10	-1,24	11	10
Ter 1	-1,74	11	9	-2,02	14	10
Qua 1	-1,69	12	9	-2,00	12	9
Qui 1	-2,99	15	8	-3,26	15	8
Sex 1	-1,19	7	6	-1,36	9	8
Seg 2	-17,36	46	12	-18,81	47	12
Ter 2	-15,86	47	13	-17,32	51	14
Qua 2	-13,52	36	9	-14,68	37	9
Qui 2	-13,17	39	11	-14,32	41	12
Sex 2	-14,54	40	11	-15,83	41	12
TOTAL	-7,30	264	98	-8,00	278	104

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

Nota-se que o número de estações ignoradas com a limitação de paradas é menor que aquelas ignoradas na MV em todas as observações. Em termos de veículos controlados, é de apenas 6 veículos a diferença a maior para a MV. No que tange à redução de custos, ela foi ligeiramente maior na MV.

Em seguida, o trabalho trata dos resultados para o sistema “G”. A autora alerta que o resultado ótimo para o sistema “F” pode ser diferente para o sistema “G”, principalmente porque este introduz no modelo a variabilidade da demanda nas Estações.

Inicialmente são identificados os trechos ótimos para o início do trecho com

ATRIBUTOS	TRECHOS COM LIMITAÇÃO									
	Tabela 11 - “Skip-stop” - Eberlain (1995) - Trechos com limitação - Sist. “G”									
Direção 1										
Viagens com limitação (unid)	7	8	4	1	1	1	1	10	14	47
Participação (%)	0,15	0,17	0,09	0,02	0,02	0,02	0,02	0,21	0,30	1,00
Direção 2										
Viagens com limitação (unid)	2	34	27	4	3					70
Participação (%)	3%	49%	39%	6%	4%					100%

limitação. O resultado está na Tabela 11 que indica os melhores trechos nas diversas simulações e a incidência de viagens com limitação em cada trecho.

FONTE: Adaptada de (EBERLEIN, 1995)

Em seguida são mostrados os resultados para o sistema “G” sem, no entanto compará-los com a situação sem controle, indo diretamente para a comparação com a meia viagem. O produto dessa comparação encontra-se na Tabela 12.

Tabela 12 - “Skip-Stop” - Eberlain (1995) Meias Viagens x “Skip-stop” - Sist. “G”

DIAS	M	EXPRESSO (Limitação de Paradas)				MEIAS VIAGENS (“Deadheading”)			
		Mudança Custo Espera (%)	Desvio Padrão headway	Estações com Limite (unidades)	Veículos Expressos (unidades)	Mudança Custo de Espera (%)	Desvio Padrão headway	Estações com Limite (unidades)	Veículos Expressos (unidades)
Seg 1	36	-13,44	1,44	15	10	-14,08	1,38	12	9
Ter 1	35	-15,60	1,08	19	11	-14,92	0,99	13	8
Qua 1	34	-14,54	1,64	14	8	-14,20	1,60	11	7
Qui 1	37	-9,88	1,33	20	10	-1 1,36	1,22	16	9
Sex 1	31	-11,13	0,98	12	8	-12,74	0,87	11	7
Seg 2	36	-7,46	4,39	21	15	-4,83	5,36	10	10
Ter 2	35	-6,15	4,15	22	15	-6,30	4,84	13	13
Qua 2	34	-6,93	4,09	16	12	-5,19	5,07	9	9
Qui 2	37	-4,47	4,61	22	16	-5,84	4,94	10	10
Sex 2	31	-4,07	3,96	19	12	-1	4,71	9	9
TOTAL	346	-10,35		180	117	-10,25		114	91
MÉDIA			2,77				3,10		

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

Por último, são apresentadas as diretrizes empíricas para a aplicação da limitação de paradas, quando o comando não é informatizado. A autora pondera que, nos sistemas de controle descentralizado em que um computador não está disponível para todos os inspetores, as orientações podem ajudar, sob a condição de o inspetor estar familiarizado com o padrão de demanda e recebido informações sobre os “headways” seguintes de cada veículo.

A análise de Eberlain (1995) torna-se particularmente interessante pelo grau de detalhamento, pela amplitude das análises ao introduzir os conceitos dos Sistema “F” e “G” e o Horizonte de Influência e pela comparação sistemática com a estratégia da MV.

Liping Fu, Qing Liu, and Paul Calamai - 2003

(FU; LIU; CALAMAI, 2003) estudaram modelo de limitação dinâmica de paradas com o objetivo genérico de alcançar um equilíbrio ótimo entre os benefícios para os operadores e os passageiros.

A rede escolhida consiste em uma única linha unidirecional de ônibus com “N” estações. Os ônibus são despachados no terminal de acordo com uma determinada programação ou intervalo (“*headway*”). As funções de despacho são assumidas por um centro de expedição, equipado com um sistema de distribuição auxiliado por computador e um sistema automático de localização dos veículos. Em qualquer ponto do tempo, um veículo em serviço pode estar em um dos três estados possíveis: movendo-se entre paradas, parado numa Estação para desembarque e embarque dos passageiros ou esperando para ser despachado no terminal. O problema abordado neste artigo surge sempre que um veículo está no último estado, isto é, ele está esperando para ser despachado no terminal e necessitando de instruções sobre quais paradas fazer em sua rota. Esse problema é comumente referido como o problema da limitação dinâmica de paradas.

Os autores propõem que a estratégia de limitação seja aplicada nos veículos alternadamente, isto é, um veículo com limitação e o seguinte sem limitação. Com isto, assegura-se que o “*headway*” máximo para os passageiros será de duas vezes aquele programado, o que reduz o grau de inconveniência para os passageiros, especialmente se tendo-se disponível uma estrutura mínima de aviso aos passageiros embarcando e aos passageiros esperando ao longo da linha.

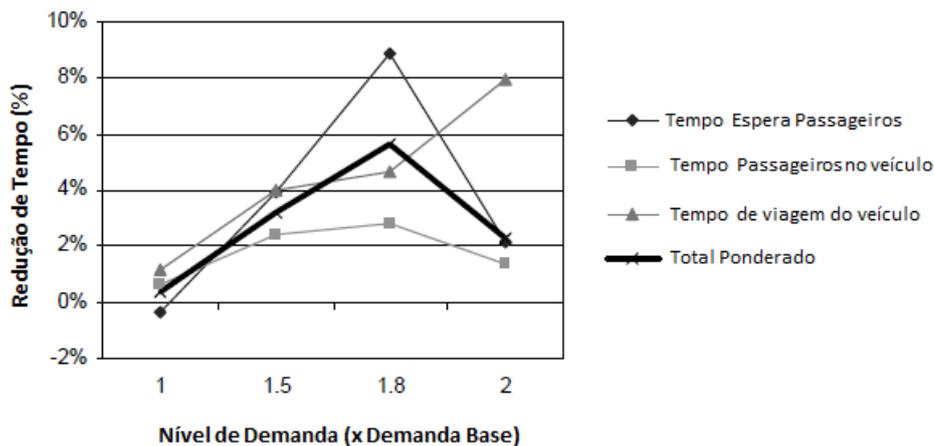
Em particular, este modelo é formulado para minimizar o custo total equivalente de tempo de espera de passageiros e tempo de passageiro no veículo, bem como tempo de viagem do veículo sujeito às equações de estado de sistema previamente formuladas, relações recorrentes, condições iniciais e a variável Restrições.

A análise de sensibilidade foi realizada com dados de uma linha de ônibus real (Linha 7D) operada pela Grand River Transit (GRT) no Município de Waterloo, Ontário, Canadá. A linha 7D atende as cidades gêmeas de Kitchener e de Waterloo, que têm uma população combinada de 293,800 habitantes conta com 28 estações, com “*headway*” programado de 7,5 minutos.

A análise em relação à demanda mostrou que, em níveis baixos de demanda, o agrupamento de ônibus (“*bunching*”) é menos provável, resultando em possível predominância do aumento do tempo de espera dos passageiros.

Com o resultado, os autores identificaram um nível ótimo de demanda no qual o benefício total ou redução no custo ponderado total é maximizado. Os resultados são mostrados no Gráfico 7.

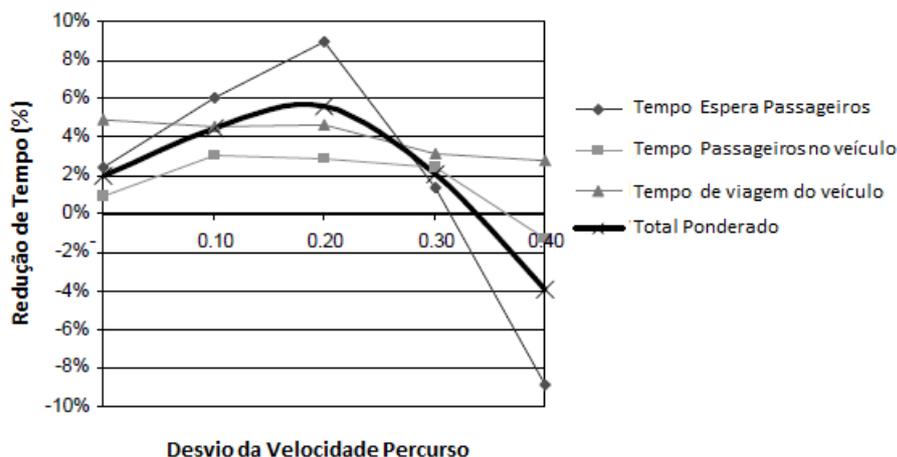
Gráfico 7 - “Skip-stop” - Fu, Liu e Calamai (2003) - Sensibilidade Níveis Demanda



FORNE: (FU; LIU; CALAMAI, 2003)

As curvas mostradas no Gráfico 8 representam a relação entre as quatro medidas de eficácia e a variabilidade do tempo de deslocamento. O cenário de alta demanda de (1,8 x demanda base) foi utilizado nesta análise e a variabilidade do tempo de deslocamento da ligação foi definida pelo COV ou a razão entre desvio padrão e média.

Gráfico 8 - “Skip-stop” - Fu, Liu e Calamai (2003) - Sensibilidade Var. Velocidade



FONTE: (FU; LIU; CALAMAI, 2003)

De outra parte, a análise de sensibilidade do “*headway*” mostrou que os benefícios da limitação de paradas diminuem de forma mais ou menos uniforme à medida que os “*headways*” aumentam. Este padrão sugere que o controle proposto é mais apropriado para linhas com um “*headway*” curto do que para valores maiores desse intervalo. Os benefícios totais aproximaram-se de zero quando o intervalo entre ônibus ultrapassa 10 minutos.

Por último, os autores lembram que estudos anteriores sugeriram que a limitação de paradas pode ser aplicada como complemento a outra estratégia de controle como a parada para regulação (“*holding*”). As diferenças de conceito podem ser complementares. Para estudar esse efeito, os autores efetuaram simulação que combinou a aplicação das duas estratégias em conjunto, comparando os resultados com o resultado de cada estratégia empregada separadamente. A Tabela 13 apresenta este comparativo.

Tabela 13 - “Skip-stop” - Fu, Liu e Calamai (2003) - “Skip-stop”+“Holding” - Results

ESTRATÉGIA	REDUÇÃO DE TEMPOS MÉDIOS (%)			Redução no Total Ponderado (%)
	Nos Veículos	Espera	Viagem Veículo	
Limitação paradas	2.84%	8.91%	4.66%	5.62%
“Holding”	6.46%	30.72%	-0.67%	16.17%
Limitação paradas + “Holding”	8.63%	32.56%	0.58%	18.11%

FONTE: (FU; LIU; CALAMAI, 2003)

Pode-se observar que a aplicação combinada apresenta melhor desempenho do que as duas estratégias aplicadas separadamente. Isto sugere que o efeito negativo

sobre o tempo de viagem de ônibus causado pelo “*holding*” foi compensado pela estratégia limitação de paradas.

(FU; LIU; CALAMAI, 2003) desenvolveram um modelo relativamente simples (a base da modelagem é uma linha bastante simplificada, mas que conseguiu extrair separadamente todas as parcelas de redução de tempos, representando um avanço entre trabalhos anteriores por permitir análises dos fenômenos com níveis um pouco maiores de precisão.

Aichong Sun e Mark Hickman

(SUN; HICKMAN, 2005) elaboraram modelo com características peculiares. Além da limitação dinâmica de paradas que é o tema deste bloco da Revisão Bibliográfica, a primeira particularidade deste trabalho é ser dirigido à aplicação da estratégia para fazer frente especificamente a interrupções no serviço, procurando relacionar a extensão e duração da contingência com as características da limitação a ser imposta.

A segunda e, talvez principal característica é a análise de duas estratégias diferentes que os autores chamam de “políticas”, sendo uma a estratégia convencional e outra a alternativa:

A Estratégia Básica ou convencional é aquela em que o trecho a ser limitado é definido pelas estações de início e término da limitação e, neste intervalo, todas as paradas são completamente ignoradas pelo veículo controlado.

Nesta opção reside o principal obstáculo à estratégia da parada limitada já citado anteriormente: o “desatendimento” soma os passageiros cujo destino é um ponto no trecho limitado aos passageiros esperando por aquele ônibus naquele segmento. Na limitação dinâmica, em que não existe uma programação com antecedência, a comunicação com os usuários, embarcados ou esperando, torna-se um sério problema.

Na Estratégia Alternativa o trecho de limitação é definido da mesma forma que na Estratégia Básica. No entanto, o veículo de controle pode permitir o desembarque de passageiros em paradas dentro do trecho limitado. Nesses pontos, será também permitido o embarque de passageiros. Esta opção procura neutralizar uma parte dos efeitos perversos da limitação, solucionando a inconveniência para os passageiros embarcados e ainda uma parcela dos passageiros esperando.

Estabelecidas as bases funcionais, os autores determinam os objetivos do trabalho que são: (i) formular a dinâmica das duas estratégias de limitação de paradas; (ii) avaliar e comparar o desempenho das duas com o emprego de um modelo de simulação.

O trabalho chama a atenção para a simulação da estratégia alternativa que é significativamente mais complicada. Inicialmente, o modelo empregado para o trecho limitado pode mudar em qualquer ponto após a interrupção. Mais especificamente, o modelo de simulação é continuamente atualizado com informações sobre a localização do veículo de controle, a localização dos veículos impactados a montante e o número de passageiros que embarcam e desembarcam desses veículos. Ao atualizar estas informações à medida que o veículo de controle se movimenta, a decisão da estação onde a limitação deve ser encerrada pode mudar dinamicamente.

No trabalho, no que poderia ser chamado de cenários, os autores formularam padrões hipotéticos de distribuição da demanda, a partir dos quais outros casos intermediários pudessem ser interpolados. Os três padrões de distribuição de demanda estabelecidos foram:

- Padrão 1: Padrão Normal (padrão simétrico), com a maior carga de passageiros no meio da linha;
- Padrão 2: Padrão orientado para o centro da cidade, com a maior carga de passageiros concentrada a jusante da linha;
- Padrão 3: O reverso do padrão do centro da cidade, com a maior carga de passageiros concentrada a montante da linha.

Outros parâmetros adotados nas simulações são mostrados na Tabela 14.

Tabela 14 - “Skip-stop” - Sun e Hickman (2005) - Parâmetros da simulação

PARÂMETROS	VALORES
Tempo de viagem - um sentido (min)	Aproxim. 60 (depende dos passageiros embarcados)
Headway médio programado (min)	7,5
Total de Estações/Terminais	Controle Proposto
Duração da Interrupção (min)	1 a 7 min com incrementos de 1 min
Localização da interrupção	A jusante das estações 1 a 18 com incremento de 1 estação
Intervalo entre sinais do AVL (seg)	40
α , β_1 , β_2 (seg) ⁽¹⁾	25, 3 e 1,5 respectivamente (3)
Número de veículos impactados	4, excluídos o veículo limite e o veículo de controle
w_1 , w_2 , w_3 ⁽²⁾	1, 0,5 e 5 respectivamente

OBSERVAÇÕES:

(1) Símbolos representam os parâmetros (α) tempo médio de embarque de passageiros (β_1) tempo médio de desembarque de passageiros (β_2) tempo de parada do veículo compreendendo desaceleração, aceleração, abertura e fechamento de portas e partida.

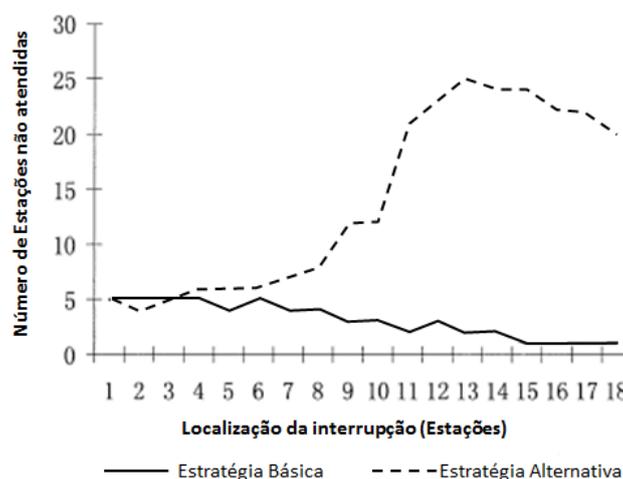
(2) w_1 , w_2 , w_3 - Pesos considerados para os diferentes componentes do custo dos passageiros na função objetivo.

FONTE: (SUN; HICKMAN, 2005) - Tradução e observações do autor da Dissertação

Em termos dos pesos utilizados na função objetivo, foi utilizado o valor de 0,5 para w_2 , indicando que o tempo no veículo é avaliado em metade do tempo de espera ($w_1=1,0$) e que o valor de 5 no tempo gasto pelos passageiros “forçados” a esperar pelos veículos quando não é feita a parada é cinco vezes mais alto do que o tempo gasto na espera.

Os resultados da simulação mostrados no Gráfico 9 indicam que o número de paradas, no trecho limitado, para a Estratégia Básica é menor do que para a Estratégia Alternativa e que o número de paradas ignoradas diminui à medida que a

Gráfico 9 - “Skip-stop” - Sun e Hickman (2005) Estrat. Básica x Alternativa



interrupção se desloca para jusante.

FONTE: (SUN; HICKMAN, 2005) - Tradução do autor da Dissertação

Em contraste, à medida que o local de interrupção do veículo se move para jusante, o número necessário de Estações a serem ignoradas com base na Estratégia Alternativa aumenta acentuadamente. Isto implica que esta Estratégia ignora mais Estações para restaurar o sistema quando ainda há um número suficiente de paradas a jusante para justificá-la.

Em sua conclusão em relação aos perfis de demanda e os articulistas relatam que, para os padrões de distribuição de passageiros normais e no sentido bairro-centro, a Estratégia Alternativa pode aproximar-se da Estratégia Básica na maioria dos casos, uma vez que ambas têm desempenho semelhante em termos da redução do custo total do passageiro.

O modelo de distribuição de passageiros orientado para o centro da cidade (bairro-centro) constitui a condição mais desejável para a Estratégia Alternativa. Para o

modelo orientado para o bairro (centro-bairro) a Alternativa raramente tem chance de superar a Básica.

Do ponto de vista da redução do tempo total de espera dos passageiros, o desempenho das duas políticas é afetado, de forma antagônica, pela variação do tempo de viagem do veículo. A variação do tempo de viagem do veículo diminui os benefícios que podem ser obtidos sob a Estratégia Básica, mas a Alternativa pode aumentar a redução total do custo do passageiro. De qualquer modo, num sentido ou no outro, o desempenho relativo das duas estratégias é bastante sensível à variabilidade do tempo de viagem do veículo.

Sua conclusão final é que a Estratégia Alternativa pode ser mais preferível do ponto de vista de gestores e operadores do transporte uma vez que não obriga o desembarque indesejado de qualquer passageiro. Isso pode ter uma implicação significativa para esses agentes, especialmente se eles consideram adotar a limitação de paradas regularmente e em tempo real.

O trabalho pode ser considerado inovador, visto que além de trabalhar com as intervenções em tempo real, propõe uma opção até então, ao que se sabe, inédita, que é a chamada Estratégia Alternativa. Ela permite mitigar parte dos impactos negativos sentidos pelos usuários. Também é abrangente, primeiro por tratar de duas modalidades de intervenção, por simular seu desempenho sob três perfis de demanda e ainda por relacionar as características da intervenção em relação às dimensões da interrupção provocada por eventos exógenos.

A interrogação que permanece, como de resto aparece nos demais trabalhos desta categoria, refere-se à maneira de implantar, na prática, medida que pode afetar profundamente os hábitos de viagem dos usuários.

Weihua Gu, Zahra Amini e Michael J. Cassidy

(GU; AMINI; CASSIDY, 2016) apresentam, neste artigo, um modelo expedito para aplicação da estratégia de Limitação de Paradas, com algumas inovações. Os próprios autores identificam este trabalho como uma extensão dos trabalhos de Freyss, et al., (2013)¹⁷ and Daganzo (2010)¹⁸.

¹⁷ Freyss, M., Giesen, R., Muñoz, J.C.; Continuous approximation for skip-stop operation in rail transit. Transp. Res. Part C 36, 419–433 - 2013

¹⁸ Daganzo, C.F.; Public Transportation Systems: Basic Principles of System Design, Operations Planning and Real-Time Control. University of California, Berkeley Course Notes UCB-ITS-CN-2010-1.- 2010.

Assim como seus predecessores, o modelo objetiva minimizar os custos generalizados de uma viagem média de transporte, tanto para um usuário quanto para a empresa operadora. Os mesmos modelos são utilizados para três modos de transporte: trens, BRT e ônibus comuns. Os autores justificam essa “versatilidade” com o argumento de que, no nível de planejamento do sistema, os 3 modos são surpreendentemente semelhantes.

No estudo, todos os custos são expressos em unidades de tempo, por ser o meio mais intuitivo para proceder a avaliações, visto que os sistemas monetários variam em todo o mundo. Os valores monetários de custo são convertidos em tempo.

O objetivo é desvendar visões gerais que podem ser úteis ao planejar sistemas de transporte. Na medida do possível, são dispensados os detalhes que tendem a ser específicos do local e, em seu lugar, trabalha-se com sistemas idealizados assumindo premissas diversas.

Quando um corredor é servido por ônibus comuns ou BRT, os veículos de cada uma das m linhas podem ser programados para chegarem juntos em cada estação de transferência sem necessidade de infraestrutura adicional. Os ônibus viajam em comboio e em sequência selecionada para evitar a necessidade de ultrapassagem.

Como o modelo admite transferências, nele foram incluídos os tempos de espera para a segunda parte da viagem.

Na parte final, os autores apresentam suas conclusões que privilegiam a generalidade em lugar de dados mais detalhados. Eles consideram que análise indica que tanto os serviços expressos quanto os de Parada Limitadas, estes em especial, podem reduzir os custos em cerca de 10%. Quando se trata de sistemas inteiramente novos, projetados com previsão para este tipo de estratégia a redução pode chegar a 30%.

O estudo de (GU; AMINI; CASSIDY, 2016) incorpora diversas inovações aos trabalhos realizados anteriormente, como foi visto ao longo da presente resenha, especialmente o tratamento isonômico a modos diferenciados de transporte. Observa-se, entretanto uma lacuna marcante, que é a falta da apresentação de resultados minimamente mais detalhados.

2.3.3. Meias Viagens (“deadheading”)

2.3.3.1. Conceito

Entende-se ser cabível, neste ponto, uma observação de ordem prática. Até a estratégia anterior, são numerosos os artigos e livros tratando daqueles temas. Nas estratégias a partir desta, a quantidade de informação técnica começa a reduzir-se, chegando, em alguns casos, a tornar-se mínima. Por isto, a partir deste ponto as referências tornar-se-ão menos prolíficas.

A aplicação da Meia-viagem (MV) corresponde a um veículo percorrer, sem passageiros, um segmento ou todo o trecho no sentido de menor demanda, inclusive utilizando trajetos alternativos com menores tempos de percurso, com o objetivo de economizar tempo e, assim, incrementar a regularidade de intervalos no sentido mais carregado. Apresenta a vantagem adicional de reduzir o tamanho da frota requerida para atendimento dos intervalos.

Por conta dos acréscimos nos tempos de espera dos passageiros no trecho não atendido, entende-se que esta estratégia deva ser aplicada preferencialmente em linhas pendulares, isto é, onde a demanda num sentido é expressivamente maior que no outro sentido.

A MV começa numa estação terminal, depois de desembarcar todos os passageiros e comunicar aos passageiros esperando que aquele veículo não atenderá.

Dada sua característica de deixar de atender estações intermediárias, a MV poderia ser considerada uma variação da estratégia de paradas limitadas.

Os estudos mostrados a seguir elaboram modelos para a otimização dos resultados decorrentes da aplicação do método, tanto estaticamente, isto é, de modo programado, ou seja, previsto antes da operação (FURTH, 1985), quanto dinamicamente, isto é, decidido durante a operação (EBERLEIN, 1995).

Cumprir observar que a estratégia é aplicada, de modo mais ou menos esporádico, em cidades brasileiras, baseada no conhecimento empírico dos operadores e gestores, sem uma retaguarda de métodos e processos para sua especificação.

Apresentam-se a seguir os principais trabalhos encontrados com diferentes visões e modelos.

2.3.3.2. Trabalhos Seleccionados

Peter G. Furth

(FURTH, 1985) foi um dos primeiros trabalhos identificados tratando das MV (“*deadheading*”) em serviços de ônibus urbanos. O autor conjectura que a estratégia não é amplamente utilizada provavelmente pelo requisito, assumido ao longo do trabalho, que as viagens que não retornam vazias no sentido inverso devem ser uniformemente espaçadas, a fim de manter lotações equilibradas e tempos de espera aceitáveis.

O artigo considera inicialmente o problema de encontrar o tamanho adequado da frota para atender a uma determinada programação de MV alternativa. Em seguida, trata da questão de projetar a programação que minimize o tamanho necessário da frota, considerando restrições de nível de serviço. Outro problema tratado é encontrar a programação que minimize o tempo de espera para um determinado tamanho de frota. O problema de minimizar a soma dos custos de espera e do custo operacional também é tratado, usando uma aproximação contínua. Finalmente, uma aplicação efetuada com dados reais demonstra como a MV alternativa pode reduzir os requisitos de frota numa linha de ônibus local de alta demanda. O autor comenta que, à época da elaboração de seu trabalho, este tipo de estratégia em uma linha local pouco aparecia na literatura.

O autor adota as premissas, válidas para todos os experimentos, de que a direção do pico é a direção rumo ao centro da cidade; que o tempo de percurso é uma função determinística do “*headway*”; e que, para manter as lotações balanceadas, as viagens em serviço devem ser programadas em intervalos regulares.

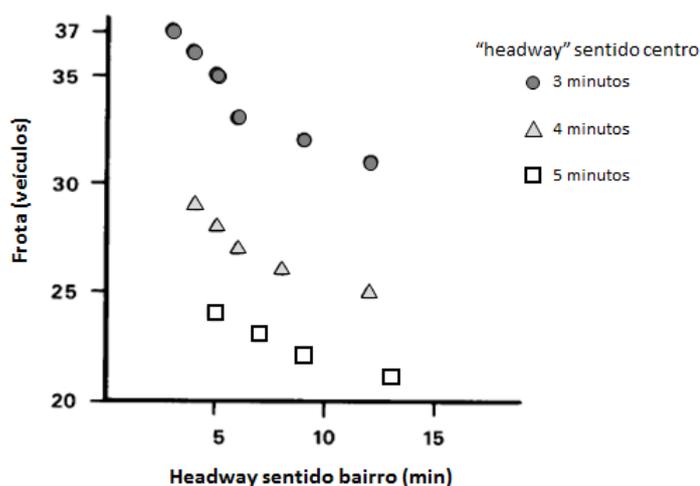
O estudo, em seguida, passa buscar soluções para diversos objetos com condições e alvos diferentes:

- determinação da frota mínima para atender a uma dada programação de Meias Viagens Alternativas;
- determinação da frota mínima sob restrições máximas de “*headway*”;
- solução exata para minimização do tempo de espera para um tamanho fixo de frota.

Foi efetuada uma aplicação do método aos dados da Linha 14 da então San Francisco Municipal Railway, hoje San Francisco Municipal Transportation Agency - SFMTA, uma linha de trólebus de 9 milhas ligando Mission Street no limite sul de San Francisco ao Ferry Terminal no centro da cidade.

O Gráfico 10 mostra o tamanho da frota requerida para diferentes valores de “headways” tanto no sentido centro (h_A) quanto no sentido bairro (h_B). Examinaram-se “headways” de 3, 4 e 5 minutos. Os únicos valores de h_B indicados no gráfico são as “soluções superiores” - o h_B mínimo possível para uma determinada frota “N”

Gráfico 10 - Meias Viagens Furth (1985)- Frotas x “headways”



e h_A .

FONTE: (FURTH, 1985)

Os resultados mostram que, por meio de alternância de “*deadheading*” chega-se a reduções significativas do número de veículos necessários. Para o h_B então existente de 4 minutos, sem “*deadheading*” são necessários 29 ônibus. Se o volume de passageiros no pico do sentido bairro for 2/3 do volume no pico do sentido centro, implicando que h_B poderia ser aumentado para 6 min, poderiam ser suprimidos 2 dos 29 ônibus, uma redução de 6,9%; E se o volume de pico no sentido bairro fosse a metade do volume de pico do centro, implicando que h_B poderia ser de 8 minutos, a redução de veículos aumentaria para 3, representando redução de 10,3%.

Xu Jun Eberlein - 1995

Por sua abrangência e grau de detalhamento já discutida anteriormente neste documento, a Tese de (EBERLEIN, 1995) aparece em boa parte das estratégias analisadas. Não é diferente para a estratégia da MV.

A autora introduz conceitos diferenciados com relação a esta estratégia. O primeiro deles é considerar que o segmento da viagem sem atendimento não necessita abranger todo o trecho entre as duas estações terminais, podendo ser um trecho menor sem atendimento que, a partir do seu final, volta a prestar o serviço, o que a

assemelha à Limitação de Paradas. Esta afirmação, de certa forma, transforma o conceito de MV, relegando-o a uma variação das Paradas Limitadas. O segundo conceito, que não é usual é a detalhada análise feita para as Meias-viagens realizadas por veículos subsequentes na linha, especialmente no caso em que um veículo com um intervalo (“*headway*”) longo e sucedido por um ou mais veículos com intervalo curto.

Uma vantagem da Meia Viagem apontada pela autora é que economiza mais tempo na estação de partida, por não haver nenhum desembarque ou embarque. Como a não prestação do serviço pode ser avisada aos passageiros esperando nesta estação não são necessárias explicações.

A autora chama a atenção para o fato de que estações com diferentes taxas de chegada de passageiros podem ser tratadas de forma diferente. Ou seja, as estações com menores taxas de chegada são mais suscetíveis de ser ignoradas, uma vez que isso resultará em menos tempo de espera extra no segmento sem serviço.

Mais à frente, Eberlein (1995) traz à discussão uma das condições estabelecidas por ela inicialmente na construção do modelo, que impedia duas Meias-viagens feitas

Tabela 15 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Frotas segundo HI

VEÍCULOS "j"	2	3	6	7	9	10	12	Total de Benefícios	Redução de Custos (%)	Tempo Processam. (s)
MEIA-VIAGEM - VEÍCULOS NÃO ADJACENTES										
n*	7	0	4	0	6	0	1	2.891,50r	9.96%	2
MEIA-VIAGEM - VEÍCULOS ADJACENTES										
n*, m=1	7	1	4	3	6	3	1	3.502,31r	12.07%	3
n*, m=2	8	2	7	5	8	3	1	3.803,02r	13.11%	42
n*, m=3	8	2	7	5	8	3	1	3.803,02r	13.11 %	135
OBSERVAÇÕES										
n* = número ótimo de estações não atendidas										
m = Horizonte de Influência										

por dois veículos adjacentes (sucessivos).

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

A Tabela 15 mostra três pares de veículos adjacentes com Meias-viagens: {2 e 3}, {6 e 7} e {9 e 10}. Na simulação não ocorreu nenhum caso com mais de dois veículos consecutivos em Meias-viagens.

Na etapa seguinte, o estudo testa a efetividade da MV no Sistema “F” usando os conjuntos de dados da Green Line, como nos casos anteriormente examinados. A

rede tem 26 estações em cada direção. A partir desses dados, foram realizados dois testes diferentes utilizando os conjuntos de dados disponíveis:

- Teste 1- Empregando o algoritmo “Meias-viagens não adjacentes.
- Teste 2. Permitindo a MV adjacente e usando a enumeração completa para obter a solução ótima para cada conjunto com Horizonte de Influência $m = 1, 2, 3$, respectivamente.

Tabela 16 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Green Line - Sistema “F” - Teste 1

DIAS	M	SEM CONTROLE		MEIAS-VIAGENS				
		Custo (Pax,min)		Estações sem Atend. (unidades)	Veículos Expressos (unidades)	Mudança Custo (Pax,min)	Mudança Custo (%)	Desvio Padrão de "h"
Seg 1	36	49.114,70		11	10	-610,50	-1,24	1,67
Ter 1	35	50.409,10		14	10	-1.019,47	-2,02	1,08
Qua 1	34	55.021,20		12	9	-1.098,12	-2	0,63
Qui 1	37	55.002,80		15	8	-1.792,36	-3,26	1,3
Sex 1	31	43.244,70		9	8	-589,08	-1,36	0,85
Seg 2	36	38.361,50		47	12	-7.214,02	-18,81	0,63
Ter 2	35	37.232,50		51	14	-6.448,33	-17,32	2,26
Qua 2	34	39.846,70		37	9	-5.848,65	-14,68	1,68
Qui 2	37	38.018,00		41	12	-5.445,93	-14,32	2,64
Sex 2	31	30.820,0		41	12	-4.880,34	-15,83	2,16
Total	346	437.071,90		278	104	-34.946,80	-8,00	
Média		87.414,38				-6.989,36		1,49

Os resultados desses testes estão listados nas Tabelas 16 e 17.

Tabela 17 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Green Line - Sistema “F” - Teste 2

DIAS	M	HORIZONTE DE INFLUÊNCIA "m" (veículos)					
		m = 1		m = 2		m = 3	
		Mudança Custo (%)	Estações sem Atend. (unidades)	Mudança Custo (%)	Estações sem Atend. (unidades)	Mudança Custo (%)	Estações sem Atend. (unidades)
Seg 1	36	-1,40	12	-1,53	16	-1,53	16
Ter 1	35	-2,02	14	-2,02	14	-2,02	14
Qua 1	34	-2,01	13	-2,01	13	-2,01	13
Qui 1	37	-3,39	16	-3,39	16	-3,39	16
Sex 1	31	-1,36	9	-1,36	9	-1,36	9
Seg 2	36	-20,14	55	-20,72	65	-20,72	65
Ter 2	35	-17,36	52	-17,47	57	-17,47	57
Qua 2	34	-16,28	42	-17,17	50	-17,25	54
Qui 2	37	-15,23	47	-15,46	54	-15,46	54
Sex 2	31	-15,83	41	-15,89	42	-15,89	42
TOTAL	346	-8,38	301	-8,56	336	-8,56	340

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

A autora comenta que, quando é permitida a adoção de MV adjacente, 8 dos 10 conjuntos de dados mostram aumentos nas reduções de custo em comparação com a Tabela 17, embora os benefícios marginais sejam pequenos. Tais melhorias são um pouco mais elevadas na direção 2, onde mais veículos adjacentes podem fazer Meias-viagens com benefícios do que a direção 1. Conclui, inicialmente, ser razoável não assumir não mais que 2 veículos em consecutivos.

A Tese passa, a seguir, a trabalhar com a MV no Sistema "G" construindo modelo que não restringe as MV adjacentes, enfatizando que este sistema é mais geral e mais complicado que o Sistema "F".

Foi realizada uma série de simulações usando o modelo com diferentes tamanhos de Horizonte de Influência m nos conjuntos de dados da Linha Verde. Adotou-se inclusive adjacência para 16 veículos, que era o número médio de veículos operacionais nos conjuntos de dados da Linha Verde. Os principais resultados são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Sist. "G" - MV adjacentes segundo HI

DIAS	M	MUDANÇA TOTAL DE CUSTO POR HORIZ. DE INFLUÊNCIA " m " (estações)					
		$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$	$m = 16$
Seg 1	36	-14,08	-15	-18,82	-20	-19,68	-19,68
Ter 1	35	-14,92	-17	-18,86	-20	-20,14	-20,14
Qua 1	34	-14,20	-15	-16,35	-16	-16,35	-16,35
Qui 1	37	-1 1,36	-16	-14,02	-16	-16,46	-15,65
Sex 1	31	-12,74	-15	-15,09	-16	-15,93	-15,93
Seg 2	36	-4,83	-9	-9,81	-10	-10,37	-10,37
Ter 2	35	-6,30	-11	-8,84	-9	-8,84	-9,01
Qua 2	34	-5,19	-6	-6,21	-6	-6,21	-6,21
Qui 2	37	-5,84	-9	-10,97	-1 1,32	-1 1,32	-1 1,48
Sex 2	31	-0,88	-7	-7,31	-8	-7,80	-7,80
TOTAL	346	-10,25	-13	-13,70	-14	-14,49	-14,40
Veículos em MV		91,00	125	118,00	119	115,00	117,00

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

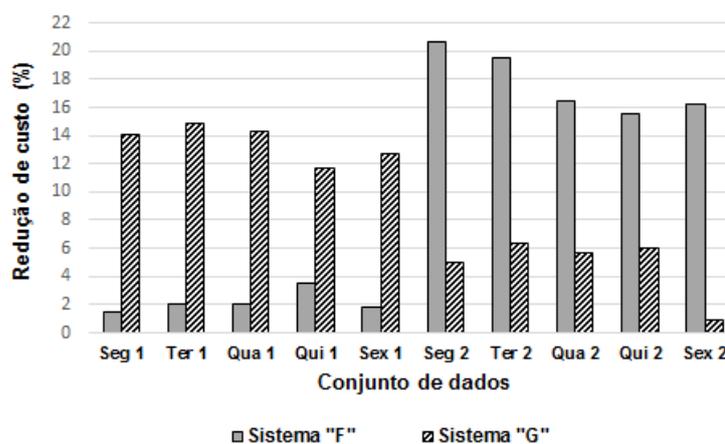
A partir dos resultados, a autora relata notar especialmente que diferentes tamanhos de Horizonte de Influência trazem diferentes biases na estimativa de custos. Quando $m=2$ é escolhido como o Horizonte de Influência, há um viés para superestimar os benefícios da MV por conta dos "efeitos de sinais alternados". Por outro lado, o uso de $m=1$ tende a subestimar os benefícios da MV. Tais vieses são amplamente eliminados quando $m=3$ é escolhido.

Concluindo as considerações com relação aos Horizontes de Influência, a autora pondera que, se forem desejadas políticas de controle mais conservadoras e o

desempenho do sistema de trânsito for altamente estocástico, $m=1$ pode ser uma escolha melhor do que $m > 1$. A escolha de $m=1$ também apresenta a vantagem de curvas de custo mais favoráveis e de condições de “*headway*” para MV benéficas. Devido à sua simplicidade, $m=1$ é a escolha mais atrativa para um sistema de controle manual, onde qualquer $m > 1$ pode apresentar-se complicado na prática.

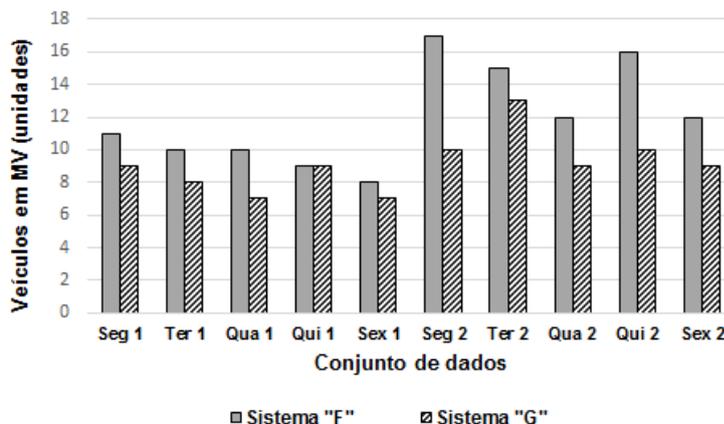
Os Gráficos 11 e 12 apresentam comparativo de resultados entre o Sistema “F” e o Sistema “G”. A comparação foi feita com base nos algoritmos que permitem as MV adjacentes. Os dois gráficos empregaram a mesma base de dados, contendo nas abcissas os conjuntos de dados referidos aos dias da semana e pareados por sentido (1 ou 2). O Gráfico 11 tem como ordenadas os dados das mudanças no Custo Total, enquanto o Gráfico 12 tem como coordenadas as quantidades de veículos com MV no dia.

Gráfico 11 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Sist. “F” x Sist. “G” - Redução Custo



FONTE: (EBERLEIN, 1995)

Gráfico 12 - Meia Viagem - Eberlein (1995) - Sist. “F” x Sist. “G” - Veículos em MV



FONTE: (EBERLEIN, 1995)

O Gráfico 12 mostra que a MV é muito mais efetiva na direção 1 do que na direção 2 para o Sistema "G"; enquanto no Sistema "F" ocorre o inverso. Já no Gráfico 13 o número de veículos em MV no sistema F é maior em todos os conjuntos de dados. Assim como nas outras seções relativas a outras estratégias, o trabalho de Eberlein (1995) apresenta grande abrangência em cada experimento, algoritmos bastante detalhados para a análise; e preocupação com a funcionalidade operacional de cada estratégia. Dois aspectos parecem marcantes no seu estudo: o emprego da mesma base de dados de viagem em todas as simulações que, de alguma forma, pode facilitar a comparação entre estratégias; o desenvolvimento de dois sistemas de complexidades crescentes, que permite análises mais completas entre os resultados.

Zhiyuan Liu, Yadan Yan, Xiaobo Qu, Yong Zhang

Trata-se do mais recente entre os trabalhos selecionados para esta seção da Revisão Bibliográfica. (LIU et al., 2013) elaboram um modelo para a solução do problema da programação da MV que objetiva, segundo os autores, preencher três lacunas encontradas nos trabalhos anteriores, quais sejam:

- a) A maioria dos modelos de otimização de Limitação de Paradas e MV assume um tempo de viagem determinista e um "headway" constante. Tais premissas são, em certa medida, irrealistas porque o tempo de viagem do ônibus é influenciado pelas condições de trânsito encontradas, sendo racional supor que o tempo de viagem entre dois pontos de ônibus consecutivos de uma rota de ônibus é uma variável aleatória contínua.

- b) Os autores entendem que os estudos anteriores normalmente investigavam separadamente os problemas de Limitação de Paradas e MV. Este, por sua vez, seria um caso especial de Limitação do ponto de vista teórico.
- c) As funções objetivas de muitos modelos construídos na literatura não consideraram os efeitos das estações sobre diferentes atores envolvidos na operação de ônibus, incluindo os passageiros e as empresas de ônibus

(LIU et al., 2013) propõem medidas para preencher as lacunas apontadas. A primeira delas é a formulação de dois indicadores (tempo total de viagem e tempo de espera de todos os passageiros) que visam refletir o custo de deslocamento dos passageiros de ônibus em termos das Limitações de Parada ou MV. Em seguida, é adotado um terceiro índice - tempo total da viagem no ônibus, que procura refletir o custo operacional total da empresa de ônibus. Desenvolvido o modelo, a experimentação numérica foi realizada sobre dados abstraídos de uma linha de ônibus real na cidade de Suzhou, China, com 19 estações. Com base em dados obtidos em pesquisa de campo, foi obtida a taxa média de chegada em todas as 19 estações. Assumindo que os passageiros que embarcam numa estação irão desembarcar uniformemente nas demais estações, chegando-se, assim, à taxa média de desembarque em cada estação.

Foram feitas quatro simulações com diferentes padrões de apuração: (i) resultado ótimo para MV do veículo 1; (ii) programação com tempo de viagem do ônibus constante; (iii) considerando circunstâncias práticas: veículo 1 não pode deixar de atender duas estações consecutivas visando evitar desbalanceamento dos “headways”; (iv) solução do problema da MV.

Os resultados destas simulações são mostrados na Tabela 19

Tabela 19 - Meia Viagem - Liu et al (2013) - Resultados - Estações atendidas por padrão

PADRÕES DE APURAÇÃO	ESTAÇÕES ATENDIDAS																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Veículo 1 - Tempo de viagem constante	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	■	A	■	■	A
Veículo 1 - Método da Enumeração	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	■	■	■	■	A
Não saltar 2 estações consecutivas	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	■	A	■	A
"Deadheading"	■	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A

LEGENDA

A Estação atendida
 Estação não atendida

FONTE: Adaptada de (LIU et al., 2013)

Entre outras conclusões, os autores consideram que os resultados ótimos de MV são bastante diferentes daqueles de Limitação de Paradas. Como o primeiro é apenas um caso especial de limitação, não é surpreendente que os resultados desta estratégia possam superar os de MV do ponto de vista teórico. Além disso, para este exemplo, os resultados ótimos de MV são ainda piores do que o caso não controlado, implicando que as MV são inadequadas para o veículo 1.

Este último resultado, comentado pelos autores, parece os ter levado, em várias ocasiões, a ressaltar que a MV é meramente um caso especial de Limitação de Paradas. Até porque, pelos resultados mostrados, a razão do nome "Meia-viagem" parece deixar de ter existido, visto que nenhum dos padrões analisados superou a casa das quatro estações não servidas. Muito menos o aspecto positivo da MV que é iniciar a viagem sem o embarque de passageiros, o que diminui o impacto sobre os usuários.

2.3.4. Inserção de ônibus extras

Dentre as intervenções analisadas neste documento, esta apresenta-se como a mais simples e de fácil execução. Trata-se meramente de introduzir um veículo adicional numa linha que tenha sofrido algum tipo de interrupção em sua regularidade operacional. Constitui-se, portanto, em aumentar a oferta de modo a assegurar a manutenção dos intervalos entre os veículos.

Não é intervenção nova. Há muito ela é exercida, particularmente nos casos de defeitos mecânicos, acidentes e outras interferências que demandam substituição de veículos.

A partir do advento dos equipamentos e sistemas de ITS, novas perspectivas abriram-se para esta estratégia, em particular a intervenção dinâmica feita a partir dos dados da monitoração da operação, em que a disrupção pode ser rapidamente identificada e a programação ser refeita online.

No caso dos sistemas de ônibus de cidades brasileiras, essa providência já é prevista há muito tempo. No entanto, ela habitualmente é feita lançando mão da chamada “Reserva Técnica”, prevista nos contratos, em que o veículo que faz a substituição permanece disponível apenas na garagem do Operador. Essa característica faz com que a substituição não seja rápida, uma vez que o veículo precisa deslocar-se da garagem até o ponto de entrada em operação, pontos muitas vezes distantes entre si.

Na intervenção dinâmica, podem ser identificadas duas atividades principais e sequenciais. A primeira delas é a detecção, identificação da causa e do local onde se originou a quebra de regularidade. A segunda atividade é a elaboração da nova programação destinada a restaurar a frequência desejada.

Deve ser observado que não foram numerosos os trabalhos acadêmicos encontrados sobre o tema, o que, de algum modo restringe maior aprofundamento da análise. Entende-se, todavia, que a simplicidade da intervenção, conforme já foi descrito acima, não deve oferecer muitas oportunidades de estudos e desenvolvimentos.

2.3.4.1. Trabalhos Selecionados

Bin Yu, Keming Wang, Zixuan Peng, Can Wang, Ziyou Gao, Baozhen Yao (YU et al., 2015)

O estudo inicia mostrando uma série de trabalhos anteriores voltados à efetividade do despacho em estratégias específicas, como é o caso da Parada para Regulação (“*holding*”), mas que são pouco numerosos os trabalhos discutindo quando se torna necessário o despacho de um veículo adicional.

Confirma que as localizações dos veículos reservas são essenciais para a estratégia estudada, assumindo, para efeito do trabalho, que tais veículos estão juntos a Estações ou Terminais no início ou no término da linha.

Os autores trabalham também com o conceito de “Horizonte de Influência” (HI) citado por (EBERLEIN, 1995) e descrito no item 2.3.1.2. neste documento, que consiste no impacto resultante de controlar um veículo exerce sobre um pequeno

conjunto de veículos. O tamanho do "conjunto impactado", corresponde ao tamanho do horizonte de influência. Yu et al (2015) consideraram dois diferentes Horizontes de Influência: o temporal, relativo ao montante de veículos considerados; e o espacial, considerando o número de estações.

Assim como descrito no item anterior, os autores consideram que antes de os ônibus extras serem despachados, deve ser avaliada a condição operacional da linha naquele período. Em seguida, as paradas da rota na qual os ônibus extras devem passar a oferecer serviço precisam ser determinadas. Para esta avaliação, são estabelecidos os dois blocos de HI para os quais será procedida a análise: para o temporal, são selecionados os veículos a montante do ponto de restrição, enquanto para o espacial são selecionadas as estações a jusante daquele ponto.

Para a estimativa da irregularidade operacional é usada a variação de intervalos entre um veículo e o que o sucede.

O tempo previsto de espera dos passageiros em uma estação pode ser usado para estimar a confiabilidade do serviço na parada, mas não reflete na confiabilidade do conjunto da linha. Como o número de passageiros em diferentes escalas tem grande variabilidade, ao avaliar a confiabilidade do serviço em uma linha o número de passageiros em cada parada é considerado como o peso relativo para a confiabilidade do serviço de toda a linha.

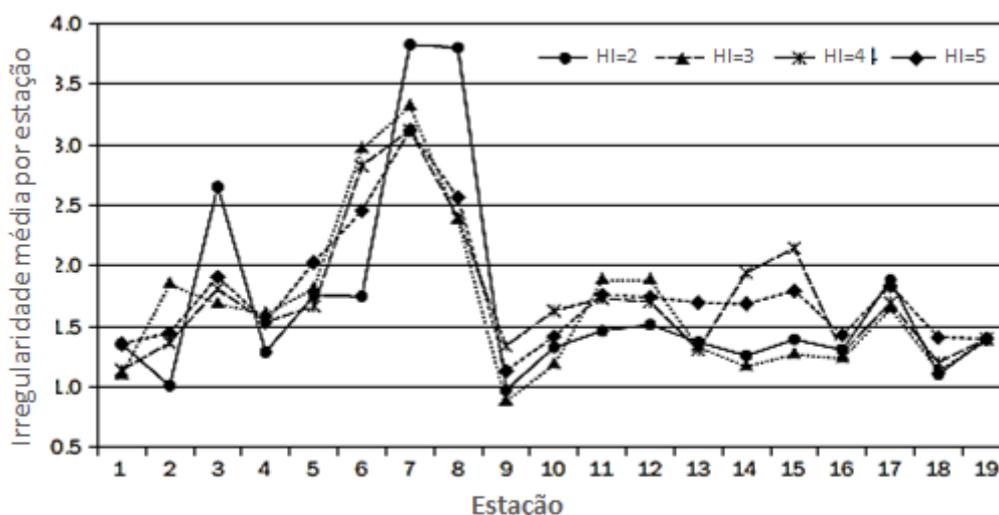
Se o serviço da linha não se mostrar adequado e alguns ônibus extras precisarem ser despachados para fornecer os serviços, a estação inicial do novo despacho deve ser determinada. Se a parada inicial para o novo serviço for determinada de forma inadequada, a estratégia de escalonamento de ônibus extra também pode afetar negativamente a qualidade do serviço. No estudo, a determinação da estação inicial de despacho para o novo serviço visa maximizar a eficiência da estratégia de agendamento de ônibus extra. O objetivo do modelo de otimização para a estratégia despacho de ônibus extra é a compensação entre os benefícios da redução do tempo de espera do passageiro e o tempo extra de operação do ônibus despachado. O algoritmo desenvolvido pelos autores foi testado em dois exemplos. O primeiro foi concebido para ilustrar a validade e viabilidade da estratégia em uma linha de ônibus simples com seis estações em cada direção, com comprimento de 3,4 km, *headway* de 3 min, com HI temporal de 2 veículos e HI espacial de 2 estações, com velocidade dos veículos de 12,18 km/h.

O segundo tem como objetivo testar o desempenho da estratégia para melhorar o serviço de uma linha real na cidade de Dalian, na China. O serviço tem a extensão de 14,5 km por sentido com 19 estações, headway de 2,5 min e velocidade comercial entre 12 a 18 km/h, frota de 48 ônibus mais 7 veículos reserva.

Visando a simplificação do processamento, foi adotado que as duas modalidades de HI teriam valores iguais, tendo sido adotados valores variando de 2 a 5.

A avaliação do comprimento dos horizontes de rolamento (m e n) é o trabalho básico para a confiabilidade do serviço do cálculo da rota. A partir do tempo zero, foi calculada a irregularidade de serviço nas estações a cada intervalo de tempo de 1 min sob os vários HI. Os resultados para cada HI foram reunidos no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Ônibus Extras (YU et al., 2015) - Resultados- Variação conforme valor HI



FONTE: (YU et al., 2015)

Pode-se observar que a irregularidade média de serviço de cada parada é semelhante quando $HI = 3 \sim 5$, sendo que esse valor é 4 ou 5 a diferença da irregularidade média de serviço em cada estação é menor que 1%. Isto indica que o aumento do comprimento do HI tem pouca significância para o cálculo da irregularidade de serviço quando $HI = 4$. Assim, foi este o valor de HI adotado no estudo.

No processo de validação do método, os autores iniciaram pela comparação de seu método de predição da confiabilidade do serviço com o método desenvolvido com mesmo objetivo numa avaliação de estratégia “*deadheading*” (intervenção discutida anteriormente nesta Dissertação). Tal estudo (YU; YANG; LI, 2012); além de contar com um dos autores do artigo ora discutido, trabalhou com linha das mesmas cidade

e rede de ônibus que a do presente teste. O método desenvolvido neste último estudo mostrou-se mais eficaz que o anterior.

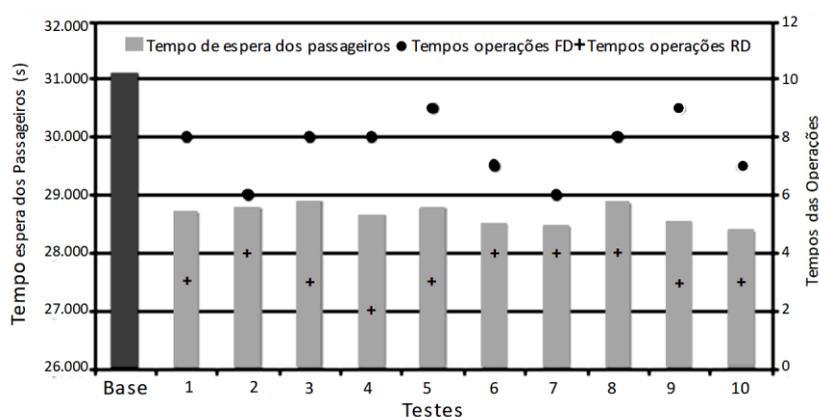
Para a aferição dos resultados foram simulados quatro cenários:

- Base: em que não foi aplicada nenhuma intervenção e que serviu como referência para as comparações;
- Despacho emitido para ônibus situado em terminal a montante do ponto de início do novo atendimento (FD na sigla em inglês¹⁹);
- Despacho emitido para ônibus situado em terminal a jusante do ponto de início do novo atendimento (RD na sigla em inglês²⁰);
- Despacho emitido para ônibus situado no próprio Terminal em que a operação teria início.

Cada cenário com os parâmetros determinados foi testado 10 vezes sob as mesmas condições. Em cada teste, o período é definido para duas horas.

O resultado geral da simulação efetuada é mostrado no Gráfico 14

Gráfico 14 - Ônibus Extras (YU et al., 2015) - Resultados - Tempos Espera Passags.



FONTE: (YU et al., 2015)

O gráfico evidencia o resultado da aplicação da estratégia de despacho de ônibus extra em relação ao resultado do cenário Base (sem aplicação). Os autores esclarecem que em 10 corridas, os tempos médios das aplicações da estratégia foram de 5,3 e a redução do tempo médio de espera dos passageiros foi de 8,01% (em minutos) em comparação com o o cenário Base.. Isso indica que a estratégia de programação de ônibus extra pode, obviamente, melhorar o serviço de trânsito. Além disso, os tempos de operações dos despachos a montante (FD) respondem

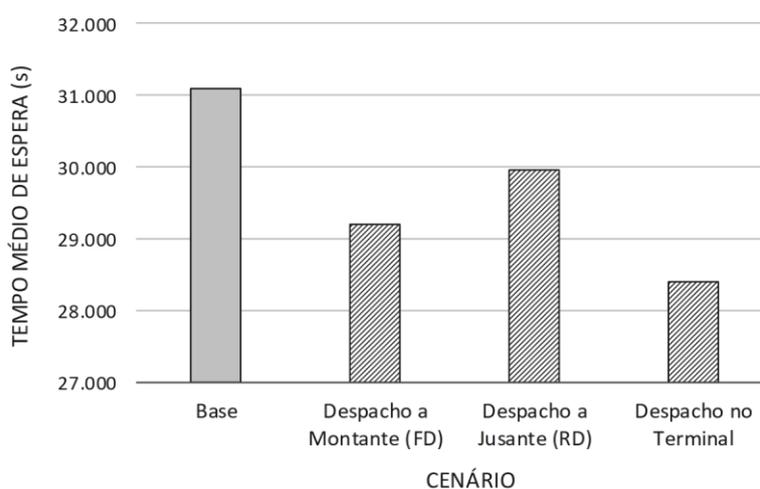
¹⁹ Forward Dispatching - FD

²⁰ Reverse Dispatching - RD

por uma grande proporção em todas as operações de despacho, enquanto as operações de despacho a jusante (RD) são aplicadas apenas algumas vezes. É por isso que o tempo de espera adicional e o custo extra de operação de despacho RD é maior do que o das operações de despacho FD.

O trabalho também fez a comparação entre os desempenhos observados para cada

Gráfico 15 - Ônibus Extras (YU et al., 2015) - Results. por Cenário - Tempos Espera



um dos cenários descritos acima. Os resultados são mostrados no Gráfico 15.

FONTE: (YU et al., 2015)

Nos três cenários em que a intervenção foi aplicada, os resultados foram positivos quando comparados ao cenário Base. No cenário com Despacho FD a redução no tempo médio de espera foi de cerca de 5%; no cenário com Despacho RD foi de cerca de 3%; e no cenário com Despacho no próprio Terminal foi de aproximadamente 8%. A maior redução do cenário com despacho no próprio Terminal onde o veículo reserva estava posicionado é evidente: neste caso não há tempo despendido no deslocamento do ônibus até o ponto do início da prestação do serviço. Por sua vez, o fato de o cenário com despacho FD ter obtido resultado melhor que o cenário RD que já havia se renunciado na análise feita a partir do Gráfico 14.

Oded Cats, Erik Jenelius (CATS; JENELIUS, 2015)

O estudo trabalha com a questão da interrupção de trechos da rede, mas a partir de um ponto de vista significativamente diverso de (YU et al., 2015). Enquanto aqueles autores trataram simplesmente da identificação da interrupção e do emprego do aumento de oferta via inserção de veículos diretamente na linha afetada, Cats e

Jenelius (2015) trataram do problema de maneira mais sistêmica, considerando o que chamam de “robustez” do sistema, abordando a questão na seguinte sequência:

- identificação prévia dos trechos mais propensos a eventos de interrupção;
- medição dos impactos da interrupção e como o incremento de capacidade pode ser avaliado;
- caracterização dos trechos capazes de oferecer oferta alternativa aos trechos interrompidos;
- construção de algoritmo dedicado a, de forma dinâmica, oferecer, por meio de modelo dinâmico de alocação e operação do sistema de transporte, alternativas de oferta de serviço ao trecho interrompido, aplicado, posteriormente, ao sistema de Transporte Público de Estocolmo na Suécia.

Pensando sob o ponto de vista dos viajantes, os autores ponderam que avaliar os impactos das interrupções envolve a comparação e a soma dos vários aspectos dos impactos para diferentes perfis de passageiros. Também consideram desejável expressar os impactos da ruptura em termos econômicos. Isso permite que os custos de prevenção, reparo e restauração sejam adicionados e comparados a outros impactos, como atrasos e lotação.

A rede foi simulada no software BusMezzo, um modelo de simulação de transporte público baseado em agentes, empregado neste estudo para emular o carregamento dinâmico de viajantes e suas interações com o sistema de transporte público subjacente.

Inicialmente é aplicada uma estrutura de avaliação para interrupções inesperadas, sendo proposta uma abordagem de avaliação em duas etapas: na primeira etapa, um conjunto de links importantes é identificado. No segundo estágio, para cada link importante identificado, é definido um conjunto de estratégias de aumento de capacidade. Essa estrutura consiste nos seguintes passos:

- O cenário base avalia o desempenho em condições normais e identifica um grupo de links mais centrais que podem vir a ser considerados importantes. A centralidade de links é avaliada pelo fluxo estimado de passageiros no link em um determinado intervalo de tempo.
- Um cenário de interrupção é simulado para cada um dos links pré-selecionados. A importância de cada link é avaliada pelo nível de impacto sobre o “bem-estar” provocado pela interrupção.

- Para cada link importante, é determinado um conjunto de links mais carregados com base em critérios específicos de volume sobre capacidade. Os links desse conjunto são considerados candidatos a receber ampliação da capacidade.
- Um cenário é simulado para cada combinação de esquema de link interrompido e melhoria de capacidade. Os esquemas de melhoria de capacidade mais eficazes são identificados com base nos impactos positivos que eles apresentam.

A robustez da rede é avaliada pelo desempenho do sistema nos casos de interrupções de serviço. Interrupções são simuladas no BusMezzo, especificando o tempo de início do incidente, sua duração e os trechos afetados. Os veículos não podem atravessar os links interrompidos enquanto a interrupção estiver em vigor.

Os autores ressaltam que a maioria dos estudos anteriores sobre a robustez de redes de transporte assumiu que apenas os links rompidos são afetados, enquanto todos os outros enlaces continuam a funcionar regularmente. Defendem que o modelo dinâmico para transporte público podem capturar os efeitos de uma falha inesperada, destacando-se entre eles:

- Efeitos a jusante (“downstream”) - os passageiros que esperam nas paradas a jusante (incluindo ao longo do segmento interrompido) podem reconsiderar e revisar suas decisões de viagem como tomar outra linha, caminhar até uma parada próxima, etc.
- Efeitos a montante (“Upstream”) - os veículos de transporte público movem-se até chegarem à fila a montante da interrupção.
- Passageiros confinados - os passageiros a bordo não podem sair e precisam esperar até que o serviço seja restaurado.
- Transbordamento - efeitos secundários são causados tanto por mudanças de oferta, como a programação de veículos ou reencaminhamento de passageiros (atrasos, recusa de embarque devido a restrições de capacidade do veículo, etc.

A estrutura de avaliação proposta foi aplicada ao sistema de transporte público de Estocolmo, na Suécia. O estudo de caso considerou uma interrupção inesperada e de curta duração. Todos os serviços existentes, que operam com “headways” inferiores a 5 minutos durante o pico da manhã (6h00-9h00), foram representados na rede de simulação. O sistema de transportes foi composto de sete linhas de metrô, quatro linhas de ônibus troncais e um VLT. A rede do metrô de Estocolmo apresenta estrutura radial que provê alta acessibilidade regional, mas baixo grau de

conectividade e grau médio de objetividade quando comparado com outros sistemas metropolitanos no mundo de acordo com a classificação proposta por Derrible e Kennedy (2010). As linhas troncais fornecem alta cobertura no centro da cidade e o VLT funciona como uma linha orbital que conecta as principais estações de transferência que estão estrategicamente localizadas ao longo das bordas sul e oeste do centro da cidade.

Cada modo de transporte público é simulado com tipos de veículos diferenciados, capacidades do veículo, velocidades de operação, regimes de tráfego, funções de tempos de parada e estratégias de controle.

Uma matriz OD foi extraída de uma matriz OD básica e dados de contagens de passageiros que estavam disponíveis na agência metropolitana de transporte público. Os dados de demanda de passageiros foram simulados apenas para a hora pico da manhã (7h00-8h00) resultando em aproximadamente 125.000 viagens de passageiros viajando entre 4.576 pares OD.

Cada cenário foi analisado com base nos resultados de 10 rodadas de simulação. Esse número de replicações gerou um erro máximo permitido de menos de 1% para o tempo médio de viagem do passageiro.

O cenário base foi o primeiro a ser simulado e analisado para permitir o cálculo da medida de centralidade de entrelaçamento de passageiros (PBC na sigla em inglês²¹) em toda a rede. Esta medida é usada para identificar os links mais centrais, que são os links importantes. Com isto, foram selecionados os cinco segmentos de rede mais centrais. Entende-se como segmento uma sequência de links consecutivos que possuem valores de PBC semelhantes e onde não há outro link ao longo da linha que tenha um valor de PBC mais alto.

Um cenário de ruptura foi simulado para cada um dos segmentos centrais. Todos trechos das Linhas de Metrô. Cada ruptura foi simulada entre 7h15 e 7h45. Assumiu-se, que os operadores de serviços não poderiam implantar nenhuma medida especial para mitigar os impactos da interrupção.

Os impactos foram calculados para cada segmento e comparados com o cenário base. Os indicadores calculados foram:

- Carregamento médio de passageiros na hora pico durante operação normal;

²¹ Sigla em inglês de "Passenger Betweenness Centrality - PBC".

- Tempo médio por passageiro, resultado da soma dos tempos a pé, de espera no ponto e de percurso;
- Número médio de transferências;
- Impacto sobre o bem-estar por passageiro que, na prática, foi a monetarização dos tempos de viagem segundo padrão sueco;
- Mudanças no indicador de impacto que correspondeu à diferença ente o impacto de cada cenário e o impacto no cenário Base.

O tempo médio de viagem, que nas condições normais era de cerca de 24 min, nos casos de interrupção sofreram aumentos entre 2 a 11%

Um subconjunto dos links importantes foi selecionado para análise de capacidade de reserva em links sobrecarregados. Uma identificação robusta de potenciais aumentos efetivos de capacidade requer a representação e a disponibilidade de alternativas de caminho de alta capacidade. Foram, então, selecionados, dois segmentos que melhor atendiam os requisitos para a aplicação da ampliação

Para cada um dos cenários de interrupção referentes aos segmentos 10-11 e 13-14s, um conjunto de links sobrecarregados foi identificado por meio da análise do impacto da interrupção nas falhas em cascata por meio da redistribuição dos níveis de saturação em toda a rede.

Os cenários de aumento de capacidade foram avaliados para cada link sobrecarregado. Esses cenários são usados para analisar se o efeito em cascata pode ser mitigado alocando a capacidade de reserva a links sobrecarregados.

Em geral, a capacidade de serviço pode ser aumentada aumentando a capacidade do veículo ou a frequência do serviço. No estudo, o aumento da capacidade foi implementado através do aumento da frequência de serviço na linha que atravessa o link sobrecarregado. Além disso, o aumento de capacidade considerado assumiu a forma de um aumento de 50% na frequência de serviço ao longo de toda a linha do link considerado sobrecarregado. Note-se que o aumento da frequência de serviço implica não apenas que os links podem acomodar um maior fluxo de ônibus, mas também menores tempos de espera para os passageiros. Além disso, também afeta as expectativas dos passageiros e suas decisões de escolha do caminho. Cabe ainda observar que o aumento de frequência corresponde, de algum modo, à inserção de mais veículos operando na linha, que enquadra a iniciativa como inserção de ônibus extras..

Em geral, os resultados das duas intervenções analisadas apresentaram mitigações das perdas nos dois cenários simulados, embora haja impactos na robustez de um dos cenários.

Os autores apontam para melhoria significativa na robustez da rede, com 70% do efeito de perturbação graças ao incremento de capacidade no trecho com sobrecarga em comparação com o cenário de operações normais no caso de interrupções.

A experiência mostra duas características inovadoras, representadas nas capacidades de:

- trabalhar com as interrupções de modo mais abrangente, na medida em que os impactos são avaliados num contexto mais amplo;
- prover as intervenções em caráter dinâmico, isto é, a partir de dados em tempo real e analisando os impactos da interferência no conjunto do sistema de transporte e não, simplesmente, no local da ocorrência.

Implantação da Rede de Ônibus Noturnos na cidade de São Paulo

Entende-se que este estudo de caso não pode ser considerado como um trabalho acadêmico, na medida em que não são relatadas iniciativas rigorosamente acadêmicas. No entanto, trata-se de uma iniciativa de ordem prática, envolvendo um sistema de grande porte, que incorporou, ao lado de diversas outras atividades, o emprego sistemático, embora empírico, do uso da inserção de ônibus extras como mitigadores de contingências operacionais para a manutenção da regularidade dos serviços.

A cidade São Paulo conta com população de cerca de 12,2 milhões de habitantes²². Sua rede municipal de ônibus, gerida pela empresa São Paulo Transportes, SPTrans e operada por empresas privadas, oferece mais de 1.300 linhas com o emprego de aproximadamente 14,5 mil veículos, transportando cerca de 9 milhões de passageiros²³ por dia.

²² BRASIL – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE – Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama> - Acesso em 20-Set-2018.

²³ Prefeitura de São Paulo – Acesso à Informação – Disponível em https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/aceso_a_informacao/index.php?p=245214 – Acesso em 20-Set-2018

Segundo a SPTrans (2009), desde meados da década de 2000, todos os ônibus dispõem de equipamentos e sistemas de ITS embarcados: microprocessador, receptor de GPS (Sistema de Posicionamento Geográfico) para localização dos veículos, modem GSM/GPRS, memória de dados do tipo flash (não volátil), circuito de entrada/saída de áudio, entradas e saídas digitais e terminal de dados, além de validadores de cartões inteligentes.

Foram desenvolvidos, entre outros, três sistemas: Infotrans que armazena dados operacionais como especificações das linhas, programações, etc, gerando, adicionalmente, informações para viajantes; Sistema Integrado de Monitoramento - SIM, que faz o monitoramento da Operação dos Sistemas, registrando e armazenando os dados; e o Sistema de Controle de Acesso e Arrecadação, o Bilhete Único, que apoia a gestão da Arrecadação, inclusive de outros modos (Metrô e Trens Urbanos) que fazem integração com o sistema municipal.

Conta ainda com centrais de controle nos Terminais, nas Garagens e um Centro de Controle Operacional - CCO.

Embora contando com esta infraestrutura de ITS, até o ano de 2014, os equipamentos e sistemas vinham sendo subutilizados, como mostraram os estudos (PEREIRA, 2015) e (FERREIRA et al., 2013).

No ano de 2013, a SPTrans começou a estudar uma rede de ônibus para prestar serviço entre 00h00 e 04h00, período em que não havia serviço de ônibus, tampouco metrô, trens e ônibus metropolitanos. Tratava-se de uma das metas de governo do então Prefeito da cidade e, por isto, havia empenho da Administração para que o novo serviço fosse implantado. Sabia-se de antemão que as baixas demandas inviabilizariam a remuneração dos serviços da forma como os Contratos de Concessão previam. Optou-se por desenvolver uma modalidade de remuneração dos operadores específica para a rede almejada: os operadores seriam remunerados pelos serviços prestados, ficando a arrecadação com a SPTrans.

No campo técnico, foram estabelecidas premissas básicas para a especificação do serviço, entre as quais se destacavam:

- dado o número reduzido de linhas, o serviço deveria apresentar alta confiabilidade, traduzida em assiduidade (não haver viagens não cumpridas) e regularidade de intervalos; este atributo deveria ser completado com o sincronismo nas partidas dos ônibus locais que receberiam passageiros das linhas troncais

- para assegurar essa regularidade, deveria ser empregado intensivamente o ferramental de ITS disponível;
- a SPTrans assumiria o controle da Operação a partir do Centro de Controle Operacional - CCO.

Os passos seguintes foram o desenho da rede, a formulação das estratégias operacionais a serem adotadas, assim como os procedimentos delas decorrentes e o programa de treinamentos.

Programou-se também as realizações de três pilotos sucessivos e em regiões diversas, com o objetivo, além de treinamento das equipes, testar as estratégias e procedimentos e verificar o funcionamento de equipamentos e sistemas.

Entre as estratégias adotadas, a primeira foi a opção por trabalhar com os sistemas e equipamentos já em operação à ocasião. O objetivo foi não vincular a implantação a possíveis prazos de aquisição e entrega de novos equipamentos ou de desenvolvimentos em sistemas. Não foi descartada, contudo, a eventual oportunidade de testes com novos recursos caso eles viessem a estar disponíveis durante a operação.

Durante a fase de levantamento e análise dos recursos tecnológicos operantes, foi discutida a questão do uso do Sistema SIM para atividades de controle, dados suas características e o baixo grau de utilização até então. Concluiu-se que as funcionalidades disponíveis seriam suficientes para a operação tal como projetada.

Da análise de possíveis contingências com relação ao ferramental de ITS, resultou a classificação do uso de equipamentos e sistemas em quatro níveis que são apresentados na Tabela 20 em ordem crescente de aplicação desses recursos.

Tabela 20 - Ônibus Noturnos SPTrans - Níveis Atuação por Dispon. Equipamentos

NÍVEL	TIPO DE RECURSO	RECURSOS TECNOLÓGICOS	MODO DE OPERAÇÃO
1	MÍNIMO	APENAS COMUNICAÇÃO COM PESSOAL DE CAMPO - TERMINAIS	CONTROLE DE PARTIDAS E CHEGADAS
2	MAPA SIM	- MAPEAMENTO DA LINHA E DOS PONTOS - MENSAGENS DE TEXTO CCO-VEÍCULO	CONTROLE DE PARTIDAS E CHEGADAS COM VISUALIZAÇÃO NO MAPA, SEM DISTÂNCIAS OU TEMPOS
3	QUADRO SINÓTICO	NÍVEL "2" MAIS: - DIAGRAMA DA LINHA - IDENTIFICAÇÃO E POSIÇÃO DOS VEÍCULOS - ESTADO DA MARCHA DO VEÍCULO (ATRASO OU ADIANTAMENTO)	CONTROLE DE PARTIDAS E CHEGADAS COM VISUALIZAÇÃO NO DIAGRAMA, SEM DISTÂNCIAS OU TEMPOS
4	QUADRO SINÓTICO COM TEMPOS	FUNCIONALIDADES DO NÍVEL "3" MAIS TEMPOS DOS VEÍCULOS (ATRASOS/ADIANTAMENTOS). <u>DEPENDENTE DE DESENVOLVIMENTO</u>	CONTROLE POR MEIO DO QUADRO SINÓTICO COM AÇÃO JUNTO AO MOTORISTA PARA RECUPERAÇÃO ATRASOS OU ADIANTAMENTOS

FONTE: Registros do autor

Estabeleceu-se ainda que, quaisquer fossem os níveis atingidos nos testes, a equipe deveria estar pronta para atuação no nível "1", isto é, sem recursos tecnológicos. A medida procurava assegurar que os técnicos estivessem aptos a operar nos casos extremos de degradação dos sistemas de monitoração e comunicação.

Cumpre observar que, por motivos técnicos, não chegaram a ser desenvolvidas funcionalidades para uso nos níveis 3 e 4. Operou-se apenas nos níveis 1 e 2, com predomínio absoluto do nível 2.

Entre as estratégias eminentemente operacionais, uma das mais importantes, dirigida à preservação da regularidade foi a alteração do processo de mobilização de veículos reservas. Os Contratos em vigor à época previam a existência da chama Reserva Técnica: as garagens eram obrigadas a repor veículos que, por algum motivo, precisassem ser substituídos durante a operação. Deste modo, os veículos da reserva permaneciam nas garagens à espera da ordem de substituição. Tal método produzia demoras nas reposições de frota, uma vez que era necessário o deslocamento do veículo desde a garagem até o local onde iniciaria sua operação.

Para solucionar o problema, foi criada o que se denominou de Reserva Operacional. Pelo novo mecanismo, um número pré-determinado de veículos deveriam permanecer em Terminais onde seriam feitas partidas de linhas, com tripulações prontas para operar. Esta modalidade não visou somente a reposição de frota, mas também e principalmente, de efetuar partidas que, por algum motivo, apresentassem atraso. Embora representasse um custo adicional, assegurava partidas com atrasos mínimos, favorecendo a regularidade.

Outra estratégia inovadora foi a instituição da verificação dos veículos antes do início da operação diária. O que foi chamado de Itens de Verificação Obrigatória - IVO não pretendeu substituir os trabalhos de Inspeção Regular da Frota realizado pela área de Engenharia da SPTrans que permaneceram sendo feitos. O que se procurou fazer foi um “check-list” de itens nos veículos que são percebidos pelos usuários e ou essenciais para o exercício do Controle Operacional, tais como tripulação uniformizada, iluminação externa e interna, limpeza externa e interna, estado de bancos e piso, funcionamento dos equipamentos embarcados e correta alocação, nos equipamentos embarcados, da linha em que o veículo iria operar. A apresentação antecipada da frota teve como objetivo, além de assegurar a presença de todos os veículos no horário da partida, permitir a realização de uma seleção prévia dos ônibus apresentados por meio de uma verificação expedita. O CCO era informado sobre as questões surgidas na verificação, sendo os veículos recusados devolvida à Operadora que deveria substituí-lo de imediato.

Os pilotos foram úteis para o aperfeiçoamento dos procedimentos, mas também mostraram alguns problemas na infraestrutura de equipamentos e sistemas de ITS que puderam ser sanados ou contornados antes da operação definitiva. Os equipamentos embarcados, pelo pouco uso e manutenção que, em boa parte, mostrava-se desleixada, apresentaram índices elevados de defeitos durante os pilotos, principalmente o inicial. Após ações das equipes da SPTrans sobre os operadores, houve uma considerável redução neste tipo de problema.

A infraestrutura de comunicações apresentou problemas de início, principalmente das áreas de sombra, em que os ônibus perdiam o contato com o sistema. A área de Tecnologia entrou em ação, mapeando a qualidade dos sinais e identificando as áreas críticas, negociando com as empresas operadoras de telefonia celular no sentido de aumentar a área de cobertura naqueles trechos.

Foram ampliados os servidores destinados ao processamento de dados no CCO, aumentados os links de comunicação entre CCO e “Data Center” e instalada nova versão do Sistema de Informações Geográficas - SIG empregado na operação.

No âmbito do SIM desenvolveram-se módulos para Cadastramento Eletrônico das tripulações treinadas, assim como o registro eletrônico das vistorias dos IVO, o que permitiu a verificação automatizada da conformidade da frota apresentada antes do início da operação.

Para a implantação, foram adquiridos 100 “tablets” para a execução eletrônica dos IVO nos Terminais.

Os treinamentos envolveram todos os agentes diretos da Operação: tripulações; equipes de campo e de retaguarda das Operadoras; equipes de apoio de campo da SPTrans, agentes de plataforma e terminais; equipes de apoio de campo da Companhia de Engenharia de Tráfego - CET; operadores dos Centros de Controle, supervisores do CCO; etc. Dado o número elevado de treinandos, foi montada uma estrutura com multiplicadores para capacitação dos funcionários das Concessionárias e das equipes da CET. Para os multiplicadores o treinamento foi provido pela SPTrans, enquanto a organização dos grupos e respectivos treinamentos foram organizados pelo Sindicato das Empresas de Transporte Coletivo Urbano de Passageiros de São Paulo - SPUrbanuss e Companhia de Engenharia de Tráfego - CET respectivamente. Para estes grupos, a equipe da SPTrans, além de montar os conteúdos, monitorou as diversas sessões. Os grupos das Permissionárias foram treinados diretamente pela SPTrans. No conjunto capacitaram-se 4.053 profissionais para o início da operação. Em novembro-2016 já haviam sido treinados 16.338 profissionais (tripulações + terminais + centros de operação das operadoras).

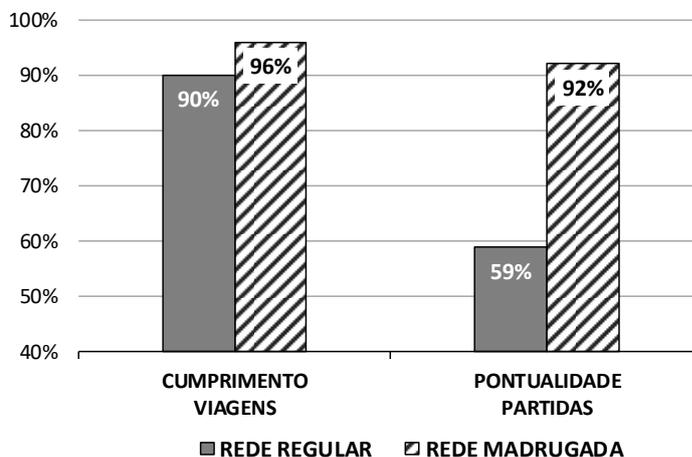
Os três pilotos foram bem-sucedidos e em junho de 2015 foi implantada a rede de linhas noturnas, chamada de “Noturno”, composta de 50 linhas estruturais com intervalos entre partidas de 15 min e 101 linhas locais com intervalo entre partidas de 30 minutos, perfazendo 151 linhas. Como a demanda, pelas poucas linhas que já vinham trabalhando no período, os intervalos foram estabelecidos arbitrariamente, procurando intervalos que não representassem esperas significativas. As citadas linhas que já operavam à noite tinham intervalos próximos a 40 minutos.

O serviço era inicialmente atendido por uma frota de cerca de 540 veículos, dos quais 70 constituíam a Reserva Operacional que, portanto, ocupava pouco menos de 13% da frota total. Pode ser considerado um percentual alto, porém justificado pelos cuidados com o início da operação que, se mal sucedida, poderia comprometer a imagem do serviço por seus usuários.

Observa-se que, embora seja um sistema diminuto em relação às dimensões do sistema regular da cidade, é um conjunto de dimensões minimamente consideráveis. Os resultados da implantação foram bastante positivos. Ao cabo de 8 meses de operação, a confiabilidade e a regularidade programadas foram atingidas. A primeira

representada pelo cumprimento de viagens e a segunda pela pontualidade das partidas, são comparadas no Gráfico 16 com o Sistema Regular que opera nos

Gráfico 16 - Ônibus Noturnos SPTrans - Resultados - Pontualidade de Partidas



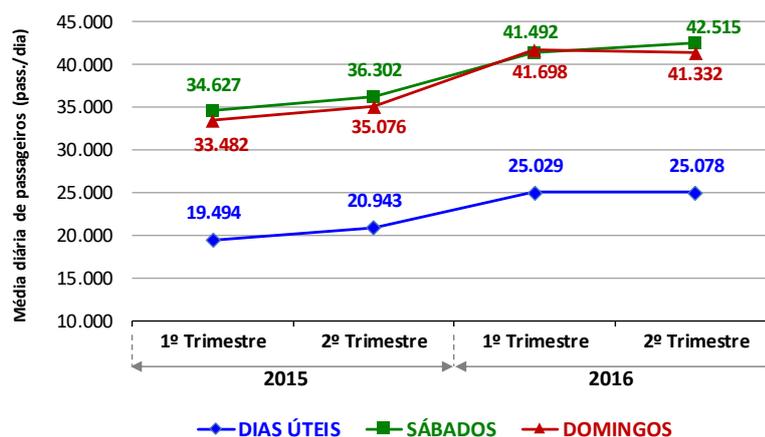
horários normais.

FONTE: SPTrans, 2016²⁴

A Reserva Operacional, embora fosse apenas uma das estratégias adotadas buscando a regularidade, mostrou-se efetiva. Nos meses de março a maio de 2015, o percentual de partidas efetuadas variou entre 3,5 e 5,1%, sendo que no mesmo período cada veículo reserva efetuou, em média, 1,4 partidas por dia.

A variação crescente da demanda é mostrada no Gráfico 17.

Gráfico 17 - Ônibus Noturnos SPTrans -Demandas - Compar. 1º e 2º trims. 2015-2016



FONTE: SPTrans²⁵

²⁴ As informações foram obtidas de Relatório Interno da SPTrans elaborado por Jeanete L. Lajinhas, aqui citado com autorização expressa da SPTrans (área de Marketing) em 16-Out-2018.

²⁵ Vide nota nº 24

Os resultados mostram alguns aspectos notáveis:

- as demandas, de 2015 para 2016, considerados os mesmos trimestres e dias da semana, subiram entre 17% e 28%;]
- as demandas nos finais de semana são consideravelmente superiores às dos dias úteis (de 65 a 77%), o que pode ser justificado pela maior movimentação de pessoas naqueles dias;
- os menores volumes nos primeiros trimestres, que guardam as mesmas proporções de um ano para o outro, podem ser atribuídos ao fato que estes períodos abrangem parte das férias escolares, o que não acontece no segundo trimestre.

O perfil dos usuários do serviço foi identificado por pesquisa de Borges, Bossi e Oliveira (2015) e mostrou:

- maioria do gênero masculino (65,1%);
- idade entre 16 a 25 anos (42,9%);
- solteiros (61,3%);
- economicamente ativos (89,5%)
- trabalham na área de alimentação, lazer e entretenimento (43,5 %)

Ao contrário do que anunciava a mídia antes da inauguração dos serviços, são poucos os passageiros cuja viagem era parte da frequência a lazer e entretenimento.

Embora o serviço implantado atendesse uma série de requisitos para a regularidade, a oferta de veículos adicionais para efeito de regulação ou para manutenção da oferta contribuiu decisivamente para o sucesso da empreitada.

2.4. INTERVENÇÕES ENTRE ESTAÇÕES

Como já foi tratado anteriormente, as intervenções entre as estações são aquelas efetuadas durante o trajeto dos veículos e não a partir das Estações ou Terminais. Tais intervenções poderiam ser divididas entre aquelas cujas decisões são tomadas num Centro de Controle Operacional (CCO) ou pelos próprios operadores e aquelas que dependem de equipamentos e sistemas que trabalham de maneira autônoma, mas, de algum modo, integradas ao CCO, como é o caso da Prioridade Semafórica e do Controle pelos Motoristas.

2.4.1. Prioridade Semafórica para ônibus - TSP²⁶

2.4.1.1. Conceituação Básica

Esta estratégia consiste no ajuste dos tempos dos semáforos em cruzamentos visando reduzir os tempos de paradas dos ônibus nas interseções, reduzindo seus tempos de viagem e, por consequência, aumentando suas velocidades comerciais e contribuindo para a regularidade. Em linhas gerais, o método trata de, assim que detectada a presença de um ônibus próximo a um cruzamento, ampliar o tempo de (PERON, 2017) verde ou reduzir o tempo de vermelho para a via ou faixa pela qual o ônibus se aproxima.

Diferentemente das estratégias tratadas até aqui, a aplicação deste método envolve conceitos e ações que extrapolam o âmbito da operação do serviço de ônibus, uma vez que apresenta duas condições peculiares:

a operação da rede semafórica, no mais das vezes, é atribuída ao gestor do trânsito, a quem cabe esta operação enquanto as necessidades de intervenções operacionais nos ônibus são percebidas e geridas pelos responsáveis pela operação dos ônibus;

o método pressupõe uma infraestrutura adicional àquela dedicada ao serviço de ônibus, destacando-se: controladores semafóricos, sistema de gestão dos semáforos e da preferência semafórica, sistema de monitoração do trânsito em geral.

Em estudo divulgado pela União Internacional de Transportes Públicos - UITP, Gardner et al (2009) procederam a uma revisão das experiências com TSP e também seus conceitos. Os autores identificaram dois tipos de controle de sistemas semafóricos: isolados e coordenados.

2.4.1.2. Cruzamentos isolados (GARDNER et al., 2009)

Os cruzamentos controlados por semáforo, localizados e operados de modo independente dos demais.

Esta forma de controle é mais empregada quando a circulação no cruzamento não é afetada pelos semáforos próximos. Esta situação é mais comum em áreas suburbanas ou em cidades de menor porte. Mesmo isolados, estes sinais podem ser

²⁶ Sigla em inglês de "Traffic Signal Priority - TSP"

vinculados a um Centro de Controle de Tráfego para, por exemplo, monitoramento de falhas.

Em termos do controle semaforico, basicamente eles apresentam duas configurações:

Tempo fixo - em que as programações são calculadas previamente e “*off-line*” e implantadas utilizando o controlador de tráfego local. As programações baseiam-se em dados históricos de tráfego para gerar valores ótimos que costumam variar de acordo com a hora do dia e o dia da semana.

Atuado pelos veículos - V/A - Já citado anteriormente, este tipo de controle depende de detectores de veículos nas aproximações do cruzamento para, a partir daí alocar tempos verdes para diferentes movimentos de tráfego de acordo com o tráfego detectado. É a forma mais comumente encontrada no Reino Unido para cruzamentos isolados.

2.4.1.3. Sistemas Coordenados (GARDNER et al., 2009)

Quando os cruzamentos controlados por semáforos estão mais próximos e sujeitos a interações de trânsito entre eles, estão estabelecidas as principais condições para a implantação de controle coordenado. Neste caso, um conjunto de semáforos são coordenados por meio de um Sistema de Controle de Tráfego Urbano - UTC na sigla em inglês²⁷. Seu objetivo principal é o controle semaforico de uma rede de intersecções e, por isto, a prioridade semaforica pode ser considerada um subproduto, embora de relevante importância. Os UTC são implementados há décadas, em grande número de cidades no mundo, particularmente em áreas centrais onde a densidade de cruzamentos é mais elevada. Na cidade de São Paulo, por volta de 1980 foi implantado o SEMCO - Semáforos Coordenados (CURY, 1977) que não previa a prioridade semaforica para ônibus.

Os sistemas UTC coordenados podem ser de tempo fixo ou reativos (sensíveis) ao tráfego.

- a) UTC de tempo fixo - nesse tipo de controle, as programações semaforicas são calculadas “*off-line*” com auxílio de softwares especialistas como o Transyt e implantados por meio do UTC. Para o cálculo são empregados dados históricos de tráfego e desenvolvidas programações ótimas que podem variar ao longo do

²⁷ No original, “*Urban Traffic Control – UTC*”

dia e da semana. Em outros casos, dados de tráfego em tempo real coletados por detectores situados estrategicamente na rede são usados para selecionar o plano mais apropriado entre os disponíveis numa biblioteca.

- b) Nesta modalidade de intervenção, as extensões de verde têm preferência sobre as reduções de vermelho. A prioridade é restrita por três fatores: o "ciclo máximo" limita o número de ciclos para os quais sistema pode executar temporizações de sinais diferentes dos da programação; o "movimento máximo" da base é um limite de variação imposto a um tempo de fase em relação ao programado; o alvo do grau de saturação para extensão e redução pode ser configurado para que o tráfego não prioritário não seja excessivamente prejudicado.
- c) Sistemas UTC reativos ao tráfego - dependem de detectores de tráfego nas aproximações de cruzamentos que forneçam dados para calcular programações otimizadas em tempo real. Os autores (GARDNER et al., 2009) listam uma série de sistemas desse tipo desenvolvidos e aplicados:
- Técnica de otimização de deslocamento do ciclo dividido - SCOOT na sigla em inglês²⁸, um dos sistemas pioneiros que começou a ser desenvolvido em 1973 no Reino Unido pelo UK Transport and Road Research Laboratory com participação das empresas Ferranti, GEC e Plessey (HUNT et al., 1982). Vem sendo empregado em numerosas cidades, com destaque para Londres (ver relato mais à frente neste documento).
 - Sistema de coordenação adaptativa ao tráfego de Sydney - SCATS na sigla em inglês²⁹ - originalmente desenvolvido para aplicação em Sidney e outras cidades australianas. Em 1980, Sims e Dobinson (1980) publicaram os fundamentos do sistema, então em fase de implantação.
 - Método para otimização de sinais de trânsito em redes controladas on-line - MOTION na sigla em inglês³⁰ - desenvolvido pela Siemens AG - segundo (GE; POSCHINGER; MÜCK, 2014), o sistema já havia sido instalado em 15 cidades da Alemanha e Europa.

²⁸ No original "Split Cycle Offset Optimisation Technique – SCOOT"

²⁹ No original "Sydney Coordinated Adaptive Traffic System – SCATS"

³⁰ No original "Method for the Optimization of Traffic Signals Online-Controlled Networks – MOTION"

- Otimização do Tráfego Urbano por Automação Integrada / Sistema de Prioridade e Otimização do Tráfego - UTOPIA / SPOT nas siglas em inglês³¹
 - sistema hierárquico-descentralizado de controle de cruzamentos semaforizados desenvolvido pela Mizar Automazione na Itália (MAURO; DI TARANTO, 1990). À época da publicação de Gardner et al (2009) já estava implantado em várias cidades da Itália, Países Baixos, EUA, Noruega, Finlândia e Dinamarca.
- Sistema em tempo real, hierárquico, otimizado, distribuído e efetivo - RHODES na sigla em inglês³² - desenvolvido nos Estados Unidos pelo Centro de Pesquisa ATLAS - Advanced Traffic and Logistics Algorithms and Systems da Universidade de Arizona. As bases do sistema foram publicadas por Mirchandani e Head (2001). Em artigo mais recente (MIRCHANDANI; WANG, 2005), os autores indicaram que, à época, o sistema encontrava-se em fase avançada de testes.

A lista relativamente extensa de sistemas com objetivos semelhantes, mostra uma diversidade de iniciativas no mesmo sentido, com alguma relação geográfica e, certamente, com bases técnicas mais ou menos diferentes. Também pode ser observado que o estudo de Gardner et al (2009), não por acaso realizado no âmbito da UITP, guarda um viés europeu: apenas um dos desenvolvimentos citados é situado na América do Norte (EUA) e nenhum na Ásia.

2.4.1.4. Tipos de prioridade

Ao tratar do conceito de “prioridade”, Vinit Deshpande (2003) principia por diferenciar a preempção da prioridade. A preempção em cruzamentos semaforizados, que poderia ser denominada de “preferência absoluta”³³, consiste na alteração imediata das fases semaforicas para dar passagem a veículos de emergência (ambulâncias, bombeiros, polícia, etc.). Trata-se de uma intervenção pontual, no mais das vezes isolada e cuja principal característica é ser incondicional, isto é, a preferência é exercida sem qualquer requisito especial senão a passagem do veículo de emergência.

³¹ Nos originais, respectivamente, “*Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation – UTOPIA*” e “*System for Priority and Optimisation of Traffic – SPOT*”

³² No original “*Real-time, Hierarchical, Optimized, Distributed, and Effective System – RHODES*”

³³ O autor emprega o termo “preemption” em inglês, cuja tradução seria “preempção”. No Grande Dicionário da Língua Portuguesa (HOUAISS; VILLAR, 2001), esta palavra têm no campo da Informática, além de outros significados, o significado “*num ambiente multitarefa, ação ou evento que causa mudança do processamento de uma aplicação para outra*”. Optou-se por empregar o termo “preferência absoluta”.

Já a prioridade consiste na concessão do privilégio de passagem a um determinado tipo de veículo (neste caso, ônibus operando um serviço regular de transporte público urbano), sob condições previamente selecionadas. Tem, portanto, um caráter de regularidade, isto é, durante um determinado período, todos os veículos operando um serviço, que atendam aos requisitos operacionais pré-estabelecidos, desfrutarão da prioridade no cruzamento em questão.

O mesmo autor (DESHPANDE, 2003) passa, então a conceituar os três tipos de prioridade para efeito da aplicação da estratégia: prioridade passiva, prioridade ativa e prioridade adaptativa em tempo real.

Prioridade Passiva

A prioridade passiva trabalha simplesmente com a programação semafórica (tempos de ciclo, tempos de verde, defasagens de fase entre semáforos, etc.), sem levar em conta qualquer dado em tempo real, tratando de coordenar os tempos em função da velocidade do ônibus e de outros parâmetros associados a estes serviços. O autor destaca que esta técnica é altamente dependente da previsibilidade dos tempos de percurso dos ônibus entre as interseções semaforizadas. Por isto, ela apresenta melhores resultados em linhas expressas, uma vez que este tipo de serviço tem menor variabilidade dos tempos de percurso. Aponta também os métodos mais comumente encontrados para a regulação sob este tipo de intervenção: redução dos tempos de ciclo; programação para coordenação de uma área; divisão dos tempos das fases, repetindo-as dentro do mesmo tempo de ciclo; restrição seletiva de acesso a vias principais.

A prioridade ativa envolve a detecção da presença dos ônibus e, dependendo da lógica do sistema e das condições do trânsito, proporciona um tratamento preferencial a eles. Esta modalidade está associada à disponibilidade de equipamentos de ITS que permitem a detecção da presença do veículo a comunicação de sua posição com o controlador e ou à central operacional, de maneira a prever o momento da chegada do ônibus à intersecção. Deshpande (2003) aponta as estratégias empregadas mais comumente neste grupo: extensão do tempo de verde na aproximação do ônibus; redução do tempo de vermelho nessa aproximação; inserção de uma fase especial para o ônibus quando ele se aproxima; truncamento do tempo de verde antes da chegada, quando o ônibus é detectado longe do semáforo (aumenta a probabilidade de chegar no cruzamento no tempo

verde); Rotação de fase, especialmente para conversões do ônibus, priorizando a fase que permite a conversão.

Prioridade Ativa (DESHPANDE, 2003)

Envolve a detecção da presença dos ônibus e, conforme a lógica do sistema e as condições de tráfego, coloca em prática a preferência para aqueles veículos.

Requer tecnologias de comunicação avançadas (ferramental de ITS) dedicadas principalmente a detectar a presença de um veículo de trânsito e prever o momento de sua chegada na interseção, assim como ser disponível comunicação entre o controlador e os ônibus. Nesta modalidade as estratégias mais empregadas são: extensão do tempo verde, inserção de fase, truncamento do tempo verde e rotação das fases do sinal.

Prioridade Adaptativa em tempo real

Ao mesmo tempo que proporcionam preferência para os ônibus, procuram otimizar o desempenho dos demais agentes. Nesse campo, podem incluir atraso de pessoas, atraso de veículo em trânsito, atraso de automóvel, assim como combinações desses critérios. Tais estratégias buscam otimizar, de maneira contínua, os tempos totais dispendidos efetivos com base em dados observados e registrados em tempo real.

O método usualmente requer a detecção precoce dos ônibus com o objetivo de dispor de mais tempo para ajustar a prioridade, minimizando os impactos negativos. Esses sistemas também exigem a capacidade de atualizar o horário de chegada dos veículos de transporte, que pode variar de acordo com o número de paradas e condições de tráfego (DESHPANDE, 2003). Para tanto, Ekeila, Sayed e Esawey (2009) apontam que um sistema de TSP dinâmico consiste em três componentes principais: um sistema virtual de detecção, um modelo dinâmico de previsão de chegada e um algoritmo dinâmico de TSP.

As medidas de prioridade ativa e adaptativa também podem ser classificadas dentro de duas principais categorias: prioridade incondicional e condicional.

Prioridade Incondicional

Nesta modalidade, detectado um ônibus ao se aproximar de um local semaforizado, a requisição de prioridade é automaticamente emitida, independentemente das

condições apresentadas pelo veículo, tais como estar operando de acordo com programação.

(EKEILA; SAYED; EL ESAWEY, 2009) indicam que o sistema de detecção usa um detector de entrada (“*check-in*”) instalado a montante da interseção a uma distância entre 50 e 100 metros. Outro detector, este de saída (“*check-out*”) instalado a jusante da interseção, imediatamente após ela. Na entrada, o ônibus detectado emite uma requisição de prioridade de passagem para o controlador semafórico do local, que verifica a fase atual do semáforo e aciona as estratégias de prioridade para a passagem do veículo. O detector de saída comunica que o ônibus completou a passagem pela interseção e o controlador retorna aos planos não prioritários.

Manual publicado pelo USDOT (LI et al., 2008) aponta que a principal desvantagem da Prioridade Incondicional é dar prioridade a um veículo que está dentro da programação ou adiantado em relação a ela. A prioridade pode aumentar o risco de sanfonamento (“*bunching*”), o que pode comprometer a regularidade do serviço.

Prioridade Condicional

No início de sua abordagem sobre a Prioridade Condicional, Li et al (2008) comentam que “...a *Prioridade Incondicional* é, essencialmente, um primeiro passo...”. Em seguida, argumentam que “A aplicação de *Prioridade Condicional*, baseada nas relativas necessidades dos ônibus, pode resultar numa aplicação mais balanceada da TSP.”.

O difere a Prioridade Condicional da Incondicional é que o benefício da preferência somente deve ser aplicado para veículos que apresentem condições operacionais desfavoráveis, especialmente os atrasos dos ônibus em relação a sua programação. Peron (2017) enfatiza que a integração da prioridade ao controle em tempo real e a sistemas de identificação e localização automática de veículos (AVI/AVL) possibilita o estabelecimento de um sistema de prioridade “inteligente” que obedeceria a determinadas premissas:

- o ferramental de ITS deve permitir a previsão da aproximação do ônibus em cada interseção; a prioridade atribuída não deve modificar significativamente a progressão normal e a duração das fases;
- devem receber prioridade apenas os ônibus que dela necessitam, segundo critérios previamente definidos, que pode ser a aderência à programação horária

ou mesmo o grau de lotação dos veículos; a prioridade deve ser atribuída somente quando existir capacidade reserva na interseção.

2.4.1.5. Aplicações da TSP

O método TSP não é novo: Sunkari et al (1994) apontam, sem identificar o estudo, que o primeiro experimento voltado a este tipo de estratégia foi realizado em Washington, USA em 1962. Nele, as defasagens entre os semáforos sequenciais foram ajustadas para aumentar a velocidade dos ônibus que eram baixas.

O caso de Londres merece destaque não somente pela evolução e pioneirismo, mas também pela intensidade. Souza et al (2010) relatam que ainda na década de 1970 foram instalados na cidade semáforos atuados pelos veículos - V/A na sigla em inglês ³⁴.. Segundo os autores, a detecção era feita por “*transponders*” instalados nos ônibus, cujos sinais eram detectados por laços indutivos embutidos no pavimento da via. O alto custo de implantação dos laços restringia a instalação em apenas uma das aproximações do semáforo. Além disto, eles eram bastante suscetíveis a danos em virtude do tráfego de veículos.

Hounsell et al (2005)³⁵ citam que aqueles conjuntos, baseados na Detecção Seletiva de Veículos - SVD na sigla em inglês³⁶ foram originalmente desenvolvidos para uso em sinais isolados, sensíveis ao tráfego, informando que na década de 1990, a instalação desses equipamentos foi acelerada e que, em 2005 havia cerca de 300 semáforos V/A equipados com SVD, principalmente na parte externa de Londres. Souza et al (2010). informam ainda que 700 cruzamentos foram equipados com SVD trabalhando sob os sistemas de Controle de Tráfego Urbano UTC ligados a computadores (SCOOT), desenvolvidos como parte do projeto PROMPT financiado pela União Europeia. Hounsell et al (2008) apontam que nesta, que pode ser chamada de “segunda geração”, os laços indutivos foram substituídos por “beacons”, antenas colocadas ao lado das vias. Esses dispositivos solucionaram o problema da fragilidade dos laços indutivos, mas prosseguiram sendo equipamentos de custo elevado.

³⁴ No original, “*Vehicle Actuated – V/A*”

³⁵ Cabe aqui citar a estreita ligação técnica entre a TfL e o Grupo de Pesquisas em Transporte da Universidade de Southampton, UK, capitaneada pelo Prof. Dr. Nick Hounsell, traduzida em diversos trabalhos acadêmicos conjuntos publicados. O material disponível não explicita, mas aponta para um tipo de Cooperação Técnica entre as duas entidades no tema “Prioridade Semafórica para Ônibus”.

³⁶ No original “*Selective Vehicle Detection (SVD)*”

No início de 2002 a Transport for London - TfL, gestora do sistema de ônibus, concluiu estudo inicial de um projeto conhecido como Desenvolvimento de Novas Tecnologias (TFL, 2009) foi criado para pesquisar a tecnologia disponível, refinar e detalhar os requisitos, estabelecendo os fundamentos para a aquisição de equipamentos e sistemas em substituição aos então em operação. Mais tarde o projeto recebeu a denominação de “iBus”, ambicioso projeto de implantação de equipamentos e sistemas de ITS em várias frentes do sistema. O mesmo documento informava que no ano de 2009 teria início a ampliação da rede de semáforos com preferência para ônibus com a utilização dos Sistemas de GPS, AVI e AVL para detecção e identificação dos veículos. A rede revigorada e ampliada foi implantada. Respondendo a consulta do autor, a TfL ³⁷informou que estavam operação, em outubro-2017, 1.841 semáforos com prioridade para ônibus, compreendendo 1.445 cruzamentos e 396 travessias de pedestres.

Além dos sistemas já citados no item 2.4.1.3. deste documento, Gardner et al (2009) apresentam uma lista de cidades dotadas deste tipo de intervenção, para as quais produziram uma comparação de seus desempenhos. As cidades constantes da lista, com respectivas dimensões de população quantidades de interseções dotadas de TSP e principais resultados são mostradas na Tabela 21.

³⁷ Consulta dirigida ao “WhatDoTheyKnow”, site aberto para solicitação de informações ao cidadão relativas ao Governo do Reino Unido e de suas entidades. Disponível em https://www.whatdotheyknow.com/request/informations_about_traffic_signa#incoming-1049898 – Resultado recebido em 09-Out-2017

Tabela 21 - TSP - Gardner et al (2009) - Cidades com TSP - Principais dados

CIDADE	PAÍS	POPULAÇÃO (habits x 1.000)	DIMENSÕES TSP	
			Número de intersecções instaladas	Ônibus equipados (veículos)
Londres	UK	7.557	3200 ^(*)	8.000
King County	EUA	1.800	28	1.400
Auckland	Nova Zelândia	438	174	734
Portland	EUA	503	250	650
Genova	Itália	650	84	500
Glasgow	UK	600	241	500
Genebra	Suíça	187	263	420
Praga	Rep. Checa	1.225	65	352
Aalborg	Dinamarca	194	51	249
Brisbane	Austrália	1.600	11	205
Cardiff	UK	315	46	191
Tallinn	Estônia	400	30	169
Toulouse	França	400	N/C	160
Los Angeles	EUA	3.500	654	28
Malmo	Suécia	276	42	N/D
Brighton	UK	248	8	N/C
Stuttgart	Alemanha	550	34	N/C
Viena	Áustria	1.600	185	N/C
York	UK	193	25	N/C
Zurique	Suíça	550	60	N/C

(*) A informação de que Londres conta com 3.200 intersecções semaforizadas com TSP não especifica o critério para a classificação como "intersecção". Essa quantidade difere daquela informada ao autor pelo Governo do Reino Unido e apresentada acima neste mesmo item.

FONTE: (GARDNER et al., 2009)

2.4.1.6. Questionamentos Técnicos

O emprego do ferramental de ITS na identificação do veículo, sua localização geográfica e a transmissão desses dados para um Data Center que os processe, acionando o mecanismo de preferência nos semáforos, representou um avanço notável. Tal desenvolvimento permitiu uma expressiva redução de custos, o que levou à possibilidade de multiplicação da intervenção. Li et al (2008) acrescentam o argumento de que os equipamentos de GPS/AVL cumprem também as funções de monitoração da operação dos veículos, reduzindo o investimento relativo no equipamento embarcado.

No entanto, foram feitos questionamentos com relação à possível imprecisão das leituras de GPS para a posição dos veículos a montante dos cruzamentos que poderia reduzir os benefícios obtidos.

A objeção foi definida com mais precisão por Hounsel et al (2005) a partir de simulações com dados da rede de ônibus londrina: ainda que a detecção seja feita em um local pré-definido, o que determinaria a distância até a linha de parada, a distância real de detecção pode ser diferente em virtude do erro de localização do GPS. Isto adiciona erros na estimativa do tempo de chegada do ônibus na linha de parada, adicionando-se variabilidade ao tempo de percurso do veículo entre a detecção e a faixa de retenção, o que pode levar a que mais ônibus percam as extensões prioritárias já concedidas, resultando em perda dos benefícios da prioridade quando comparada com o caso da localização sem erro. O trabalho concluiu que a imprecisão da localização GPS poderia reduzir os ganhos nos atrasos dos ônibus na ordem 2% a 5%. Conclui, adicionalmente que o impacto dos erros aumenta com maiores números de extensões de verde, assim como este impacto está relacionado com a variabilidade do tempo de percurso entre o ponto de detecção e a faixa de retenção na intersecção, sendo maior quando a variabilidade é baixa e menos perceptível quando a variabilidade é alta.

O estudo faz recomendação de medida para minorar os efeitos negativos dos erros citados: dada a facilidade e flexibilidade oferecidas pelo GPS, podem ser instalados detectores virtuais extras para auxiliar na priorização. Como exemplo, mostra que um detetor de “saída”, instalado a jusante do cruzamento, pode reduzir uma extensão, interrompendo-a tão logo o veículo tenha concluído a passagem ou alongar uma extensão até que o ônibus chegue ao detector de saída. Em estudo posterior (HOUNSELL et al., 2008a) a análise desse tipo de medida foi analisado mais detalhadamente.

Outro artigo da mesma equipe (HOUNSELL et al., 2008b) analisou três novos aspectos:

- a) comparou a Prioridade Incondicional com diferentes estratégias de Prioridade Condicional (alta prioridade somente para veículos atrasados e alta prioridade para veículos atrasados e extensão de verde para os demais); a comparação foi feita com relação a quatro atributos de benefícios - redução de atrasos dos ônibus, incremento na regularidade, aumento de atrasos no restante do tráfego e benefícios econômicos;

- b) simulou duas estratégias de prioridade: a então aplicada em Londres, que concedia prioridade a ônibus com headway acima do programado e a estratégia alternativa de conceder prioridade somente para os ônibus com headway maior que o do ônibus que o sucede; para a comparação, introduziu um novo tipo de benefício, os tempos de espera dos passageiros nas estações; a estratégia alternativa mostrou-se mais efetiva;
- c) uma vez que uma linha, ao se aproximar do seu destino, recebe menos embarques de passageiros, foi testada o que chamaram de “estratégia mista”: prioridade para ônibus atrasados na parte inicial da viagem e prioridade para todos os ônibus na parte final da viagem, comparando-a com a estratégia de priorizar os veículos atrasados em toda a extensão da linha; a conclusão foi que não houve diferenças de resultados no quesito tempo de espera, mas a estratégia mista mostrou-se mais benéfica no quesito tempo de percurso.

2.4.1.7. Resultados - Trabalhos Selecionados

Os trabalhos relativos a TSP encontrados na bibliografia disponível tratam, em boa parte, de modelos para a construção de algoritmos de otimização da intervenção ou de sua avaliação. Os resultados ali obtidos dizem mais respeito à acurácia do modelo do que nos resultados das intervenções. Nesta categoria podem ser enquadrados, entre outros, os trabalhos de (SUNKARI et al., 1994), (FENG et al., 2015), (KIM; PARK; CHON, 2012)

Min Yang, Wei Wang, Bo Wang e Jing Han (YANG et al., 2013)

Embora considerem as diversas intervenções voltadas ao provimento de preferência aos ônibus, os autores dedicaram-se ao estudo de TSP por meio de microsimulação com uso do software VISSIM.

O cenário estudado foi a área central da cidade de Yingtian, Situada na região sudeste da China, funciona como um entroncamento para o transporte entre o centro e o sul do país. Sua área central abriga 208 mil habitantes e uma frota de cerca de 34 mil veículos.

Foi modelado um trecho da Avenida Shengli, via arterial que cruza a área na direção leste-oeste, nos dois sentidos, com duas faixas por sentido. No sentido leste, apresentava volume de 60 ônibus/hora durante o período de pico, com volume de 3.000 passageiros/hora/sentido no trecho mais carregado.. O trecho selecionado, de

aproximadamente 1,0 km³⁸ de extensão, compreendendo 3 interseções com vias principais, todas com sinalização semafórica.

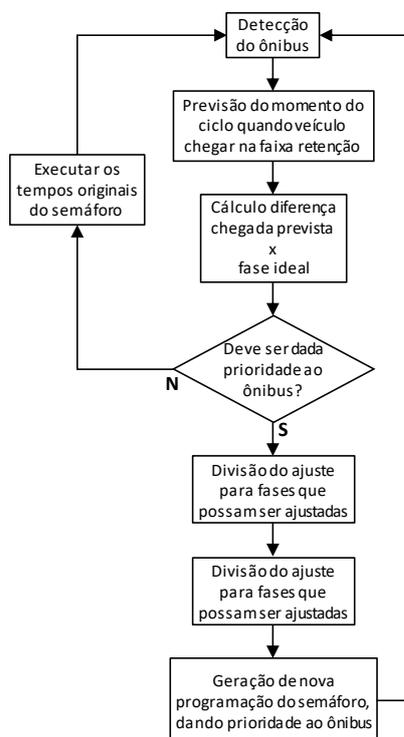
Para aliviar os crescentes congestionamentos, a cidade havia, à época do estudo, planejado prover prioridade ao transporte público com a instalação, naquela via, de um BRT, com a implantação de faixas segregadas junto às calçadas. Segundo o plano, eram previstas estações situadas à montante de cada cruzamento principal, junto à linha de retenção. O motivo de tal localização para as estações era que a parada dos ônibus fosse realizada aproveitando o tempo de vermelho no semáforo, podendo ou não ser descartada a etapa de cálculo do tempo de chegada do veículo no cruzamento.

Para o estudo foi considerada apenas a faixa no sentido leste, considerando não implantada a faixa no sentido oeste. Foram estabelecidos seis cenários para as comparações e para análise das modalidades de preferência, quais sejam:

- a) *Cenário 1 - Base* : reflete a situação atual à época da rede de tráfego do trecho analisado, sem qualquer tipo de prioridade aos ônibus..
- b) *Cenário 2 - Segregação da faixa para o BRT*: adiciona ao Cenário 1 a faixa segregada à direita da pista, sem a adoção de qualquer medida de preferência para os ônibus.
- c) *Cenário 3 - TSP ativa convencional* - aplicação das estratégias de extensão de verde e truncamento do vermelho já mostradas anteriormente neste documento. Para este cenário foram considerados dois sensores: o primeiro à montante da faixa de retenção para gerar a solicitação de prioridade e o segundo, à jusante da faixa para determinar o término do tempo de verde.
- d) *Cenário 4: Prioridade de Sinal Ativo Condicional com detecção avançada*: Esta estratégia de prioridade adotada constitui-se numa variação daquela proposta por Wadjas e Furth (2003), empregando detecção antes da parada na estação. O método permitiria antecipar o ajuste dos tempos do semáforo antes da chegada do ônibus à intersecção. Com maior flexibilidade pode levar a menores quantidades de ajuste para cada fase, reduzindo os impactos no tráfego em geral. Um breve processo desta estratégia é mostrado na Figura 6.

³⁸ Em seu texto, os autores não explicitam esta extensão, que foi obtida pelo autor a partir do Google Maps em 30-Ago-2018.

Figura 6 - (YANG et al., 2013) - Estratégia de TSP - Cenário 4 - Fluxograma Lógica



FONTE: (YANG et al., 2013)

A lógica empregada para este cenário mostra que, além da detecção avançada, foi estabelecida a condição de que os ônibus em que a previsão de chegada na interseção coincidiria com o tempo verde não seriam beneficiários da preferência. Esta medida visava a otimização do uso da preferência e a redução dos atrasos dos automóveis.

e) *Cenário 5 - Controle da Velocidade dos ônibus - Por meio do controle da velocidade de marcha de cada ônibus, sua chegada em determinada interseção pode ser prevista, permitindo a prioridade para os ônibus naqueles locais.*

O estudo procurou apurar o impacto da intervenção no serviço de ônibus, o impacto sobre os automóveis e, complementarmente, os impactos sobre os viajantes (todos os modos) em cada um dos cenários, tendo sido analisados os seguintes principais atributos e respectivos indicadores:

- *Ônibus*
 - *Atrasos* - Correspondendo à diferença entre o tempo de viagem simulado e o tempo ideal de viagem, entendendo-se como tal o tempo que o veículo dispenderia no percurso sem interrupções no trânsito ou por semáforos.

- *Velocidade de viagem* - velocidade média de percurso para o conjunto dos ônibus em cada cenário.
- *Confiabilidade* - Os autores definiram a confiabilidade como a capacidade dos ônibus chegarem nas estações de acordo com a programação. Como indicador foi considerado o desvio padrão do tempo dispendido pelos ônibus do ponto inicial ao ponto final do trecho estudado (avenida Shengli)
- *Automóveis* - foram empregados como indicadores os atrasos dos automóveis nas interseções e a velocidade média de percurso.
- *Viajantes* - atrasos médios por pessoa.

Uma súmula dos resultados é mostrada na Tabela 22.

Tabela 22 - TSP (YANG et al., 2013) - Resultados das Simulações

INDICADOR	CENÁRIO				
	1 Base	2 Segregação Faixa	3 TSP ativa convencional	4 TSP detecção antecipada	5 Controle Velocidade
ÔNIBUS					
Atrasos médios (s)	46,3	36,2	28,5	11,3	9,6
Velocidades médias percurso (km/h)	21,0	23,8	19,5	18,4	13,9
Tempos médios percurso - TMP (s)	399,5	304,3	290,0	233,8	264,8
Desvios Padrão TMP (s)	19,7	11,4	5,9	2,6	1,9
AUTOMÓVEIS					
Atrasos médios (s)	16,9	12,8	15,0	14,2	21,0
Velocidades médias percurso (km/h)	28,7	33,6	32,2	32,9	26,2
PESSOAS (ÔNIBUS + AUTOS)					
Atrasos médios (s)	26,7	20,6	16,8	13,3	17,2

FONTE: (YANG et al., 2013)

Antes do destaque dos pontos principais da tabela, cabe uma observação quanto à análise feita pelos autores sobre os resultados, que tomaram como referência o cenário (1) e todas as comparações foram feitas em relação a este cenário. Ocorre, entretanto, que o cenário (2) altera significativamente a configuração do sistema de ônibus, na medida em que seleciona uma faixa segregada de uso exclusivo de ônibus. Os cenários subsequentes (3), (4) e (5), embora tenham sido excludentes entre si, têm como ponto comum o acréscimo de preferências adicionais (cumulativas) em relação ao cenário (2). Deste modo, as comparações poderiam ter sido feitas inicialmente entre o cenário (2) em relação ao cenário (1) e dos demais

cenários em relação ao cenário (2), o que talvez pudesse indicar de maneira mais segregadas as melhorias observadas em cada estratégia testada.

Entende-se que, com relação aos resultados da Tabela 22 deva ser, inicialmente, destacado o impacto da segregação de infraestrutura para o sistema de ônibus: os quatro indicadores apurados mostram melhoras substanciais do cenário (1) para o (2), sendo notáveis as reduções no atraso médio (21,8%) e Desvio Padrão dos Tempos de Percurso (42,1%). Já nos cenários (4) e (5) as melhorias nos atrasos são substancialmente maiores, caindo de 46,3 s para 11,3 s e 9,6 s. Nestes mesmo dois cenários, a Tabela indica redução nas velocidades dos ônibus, mas no texto os autores citam que as velocidades dos ônibus teriam subido de 13,9 km/h para 23,8 km/h e 21,0 km/h³⁹. Os resultados nos demais indicadores da Tabela 22 apontam para uma possível troca de valores na linha de velocidades dos ônibus no artigo original.

Vinit Deshpande (DESHPANDE, 2003)

Em sua Dissertação de Mestrado, o autor relata, inicialmente, na Resenha Bibliográfica, diversas experiências e estudos anteriores de TSP tanto em cidades americanas (Portland, Saint Louis, San Diego, Miami, Charlotte, Chicago, Toronto), européias (Vicenza, ITA; Swansea e Londres, ENG; Lion, Toulouse e Strasburgo, FRA; Zurich, SWI; Eindhoven, NED; Stuttgart, GER) e Austrália (Brisbane) que demonstra a disseminação internacional da estratégia.

O foco principal do trabalho é um estudo de caso, com simulação de TSP, para um trecho de 2,1 km de uma via arterial (Richmond Highway) que cruza a região central do Condado de Fairfax, VA, na Região Metropolitana de Washington, DC. Três das maiores linhas de ônibus da cidade fazem uso da via, funcionando como linhas alimentadoras da Estação Huntington do Metrô da capital norte-americana com os bairros residenciais de Fairfax. O trecho selecionado compreende sete cruzamentos semaforizados.

O estudo justificou-se pela iniciativa do Departamento de Transportes da Virgínia - VDOT e do Condado de Fairfax no sentido de executar um teste operacional de campo para a aplicação de TSP na cidade. Assim, a pesquisa preocupou-se com a

³⁹ O autor tentou contato por e-mail com os autores do artigo em duas ocasiões para dirimir a dúvida. Não foi respondido até a conclusão desta Dissertação.

atitude dos diversos “*stakeholders*” envolvidos (população, técnicos, autoridades, opinião pública, etc.) frente às consequências da possível implantação.

Em função disto, as simulações voltaram-se menos às opções de estratégia e mais às consequências da implantação sobre o sistema de ônibus e sobre o tráfego em geral. Para atender a tais objetivos, não obstante o estudo discorra de três hipóteses, elas mais parecem três pontos de vista, na medida que as leituras não decorrem de diferentes simulações, mas de indicadores diferentes apurados da mesma simulação:

- a) *Hipótese #1* - em que o resultado da aplicação da TSP será associado à maior confiabilidade do serviço de ônibus. O indicador empregado foi o desvio padrão do tempo de percurso dos ônibus no trecho estudado, aplicado nos dois sentidos e nos períodos de Pico da Manhã e Pico da Tarde.
- b) *Hipótese #2* - em que o resultado da aplicação da TSP será associado à maior eficiência do serviço de ônibus. O indicador empregado foi a redução média de tempo de viagem para os ônibus devida à concessão de prioridade. Assim como na *Hipótese #1*, o indicador foi apurado nos dois sentidos, nos Picos da Manhã e da Tarde.
- c) *Hipótese #3* - No caso em estudo, havia a preocupação com o tráfego nas vias transversais, uma vez que seria penalizado para fornecer 10 segundos de extensão do tempo verde para os ônibus da via principal. Estas já recebiam 84% (150 segundos do ciclo de 180 segundos) de tempo verde e a extensão verde concedida tenderia a aumentar ainda mais essa porcentagem.

Para a construção do cenário base (situação existente antes dos efeitos da TSP), foram realizados levantamentos de campo nos períodos de pico da manhã e da tarde. Para os automóveis foi feita pesquisa embarcada de tempos de percurso total, número de paradas do pelotão no trânsito e total de atrasos. Além destes levantamentos foram medidos os comprimentos de fila nas vias transversais. Para os ônibus foram apurados os tempos de viagem, número de paradas quando participando de pelotão com os automóveis, aderência à programação e ocupação. De início, os levantamentos permitiram a identificação das interseções críticas em cada período de pico, além do comprimento das filas junto aos semáforos. Essas medidas foram posteriormente comparadas com as dimensões das filas após a simulação da aplicação de TSP.

Para a simulação considerou-se, além da prioridade para os ônibus, a preempção para veículos de segurança. A extensão do tempo de verde adotada foi de 10 segundos.

Para a modelagem no VISSIM, conforme as principais características técnicas, foram empregadas as seguintes bases de dados:

- Características Geométricas: Arquivo Synchro do VDOT;
- Características do Tráfego: Arquivo Synchro do VDOT e Medições no Campo;
- Controle Semafórico: Arquivo Synchro do VDOT;
- Informações das Linhas de ônibus: Programações dos serviços Fairfax Connector e Medições no Campo.

A simulação efetuada resultou, entre outros, nos seguintes valores principais segundo as Hipóteses apontadas anteriormente neste documento:

- d) *Hipótese #1 - Confiabilidade Geral dos Serviços de ônibus - em 23 das 30 simulações em pares, a provisão de prioridade resultou em um desvio padrão mais baixo. A redução média no indicador foi de 3,61%, sugere que a confiabilidade do tempo é maior com a prioridade condicional do que sem prioridade, confirmando a Hipótese nº 1.*
- e) *No entanto, os autores advertem que deve-se ter cautela para tirar conclusões sobre a significância estatística da diferença nos valores do desvio padrão. Enquanto o teste "t" de duas amostras mostrou que a diferença é significativa, o teste Kolmogorov-Smirnov (Teste de Entrada de Dados do Teste K-S) mostrou o contrário.*
- f) *Hipótese #2 - Eficiência dos ônibus -em 26 das 30 execuções de simulação, a provisão de prioridade resultou em um menor tempo médio de percurso, sendo que, a redução média geral foi de 2,64% no tempo médio entre o início e o final do trecho estudado. Isto indica que a eficiência do serviço de ônibus é maior com a aplicação de prioridade do que sem ela, confirmando a Hipótese nº 2. Os autores repetem, neste caso, a ressalva citada nos resultados da Hipótese #1 com relação à significância matemática dos valores obtidos.*
- g) *Hipótese #3 - Outros impactos no tráfego - foi apurado um aumento no comprimento médio das filas de automóveis nas ruas transversais de cerca de 40 cm com um valor máximo de 105 cm. Restou demonstrado que impacto significativamente pequeno no trânsito nas ruas laterais, confirmando a hipótese # 3, que afirma que a TSP será associada com pouco ou nenhum impacto*

naquele modo. Os autores reconhecem que os impactos nas transversais podem ser avaliados em termos de "tempo" (por exemplo, atraso do veículo, atraso das pessoas), mas que esta pesquisa avaliou-os em termos de comprimentos de fila para atender a preocupações específicas dos stakeholders, em especial os engenheiros de tráfego, interessados na quantidade de veículos que sofreriam atrasos nas transversais e se a fila poderia ser dissipada em um mesmo ciclo.

Deve ser observado que os ganhos de tempo no serviço de ônibus são menores do que aqueles observados em outros estudos. O acanhamento de tais benefícios talvez possa ser atribuído à preocupação do estudo com o não agravamento, do trânsito nas transversais, o que se reflete, de algum modo, nas mínimas perdas em termos de tamanho das filas de automóveis nas transversais.

Kevin Gardner, Chris D'Souza, Nick Hounsell, Birendra Shrestha, David Bretherton

O trabalho (GARDNER et al., 2009), já citado anteriormente nos itens 2.4.1.3. e 2.4.1.5. acima, fez um abrangente levantamento de implantações de TSP em 29 cidades, tendo analisado os sistemas de controle empregados em cada cidade, os métodos de priorização, arquiteturas dos sistemas, etc.

Ao final, o trabalho apresenta uma resenha dos resultados em 22 cidades que é mostrada na Tabela 23.

Tabela 23 - TSP (GARDNER et al., 2009) - Cidades com TSP - Resultados Relatados

CIDADE / PAÍS	RESULTADOS RELATADOS		
	Redução atrasos dos ônibus	Tempo Viagem / Velocidade	Atrasos Tráfego em Geral
Aalborg - Dinamarca	5.8 s/ônibus/cruz.	4% redução em média	
Auckland - N. Zelândia	11 s/ônibus/cruz.		
Brighton and Hove - Reino U.		Redução	
Cardiff - Reino Unido		3-4% redução	1 a 2% aumento
Genoa - Itália		7-10% redução	
Glasgow - Reino Unido			
Gotemburgo - Suécia		13-15% redução	5 a 10% redução
Helsinki - Finlândia		11% redução	
King County - EUA	25-34%	5.5 a 8% redução	
Londres - Reino Unido	* 9 s/ônibus/cruz. isolados * 3 a 5 s/ônibus/cruz. em rede (SCOOT)		
Los Angeles- EUA		6 a 8% redução	Típico 1 s/veic./cruz.
Portland- EUA			
Praga - Rep. Checa		2% redução	
Southampton - Reino Unido	9,5 s/cruz.		Aumento 3 a 8 sec/intersecção
Estocolmo - Suécia		10% redução	
Stuttgart - Alemanha		Aumento veloc. de 9 para 10,1 milhas/h	
Sydney - Austrália		Até 21% redução	
Tallinn - Estônia		Aumento da velocidade 2 km/h	
Toulouse - França		5 a 24% redução	
Turim - Itália		12% redução	
N/D - Japão		5% redução	

FONTE: (GARDNER et al., 2009)

Embora o número de cidades seja elevado, os dados sobre os resultados são dispersos e com diferentes indicadores, provavelmente porque resultam do levantamento de diferentes estudos, uma vez que e Gardner et al (2009) propunham-se exatamente a esse tipo de coleta.

De todo modo, no atributo “Redução nos atrasos dos ônibus”, nos casos em que os indicadores são semelhantes, verifica-se relativa proximidade entre os valores obtidos Já no quesito Tempo de viagem, as reduções mostram uma variação expressiva que vai de 2% de redução (Praga) a um teto de 24% (Toulouse).

Luciano Peron

Em sua Dissertação para o Mestrado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, dirigida ao estudo de TSP, (PERON, 2017) estudou um trecho de cerca de 1,7 km do Corredor Campo Limpo - Rebouças - Centro, na cidade de São Paulo. Trata-se de um corredor com via segregada junto ao canteiro central, com três faixas adicionais para o tráfego em geral de veículos. No trecho de estudo existem 6 semáforos que, para efeito da simulação efetuada, foram reunidos em quatro cenários, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Corredor Estudado (PERON, 2017) - Trecho, Cenários e Local. Censores



FONTE: (PERON, 2017)

A autor realizou simulações no software VISSIM a partir de dados reais dos volumes de veículos, de intervalos entre os ônibus e dos ciclos e fases dos semáforos fornecidos pelos respectivos órgãos gestores de tráfego e transportes da cidade.

A estratégia adotada foi de prioridade ativa condicional baseada no atraso e objetivada em extensão do tempo de verde.

As variáveis de controle empregadas foram:

- a) Velocidades;
- b) Tempo de viagem do ônibus e do automóvel ao longo do trecho simulado;
- c) Tempo de viagem entre os pontos de parada do trecho simulado;
- d) Tempos médios nas interseções (impacto do TSP nas vias não priorizadas).

Os resultados mostraram, nos trechos com melhor contribuição da TSP, um aumento da velocidade média dos ônibus de 8,5%, enquanto a redução dos tempos médios de viagem dos ônibus atingiu até 12%. Os tempos de viagem dos

automóveis no Corredor também foram beneficiados, o que, em parte ocorreu também nas vias transversais não priorizadas.

2.4.1.8. Conclusões Parciais

O número elevado de cidades contando com estratégias de TSP para conferir preferência aos ônibus já mostra, por si, a eficiência do método para aumentar a velocidade comercial destes veículos em meio ao trânsito e aos congestionamentos. Os estudos aqui referidos mostram resultados positivos em praticamente todos os casos, em meio a diferentes cenários e diferentes estratégias.

Pode ser apontado como aspecto negativo a necessidade de investimentos, principalmente na infraestrutura de sinalização semafórica, bem como em sistemas de processamento dos dados e programações de ciclos e fases em tempo real.

2.4.2. Controle de velocidades

Esta intervenção consiste, basicamente, na monitoração e controle da velocidade dos ônibus de um serviço, com o objetivo de manter a regularidade de intervalos e, assim, evitar ou minimizar as ocorrências de sanfonamento (*"bunching"*) dos veículos já descrita anteriormente neste documento.

Uma vez que a iniciativa visa prevenir o sanfonamento, enquanto a intervenção "Paradas forçadas para Regulação (*"Holdings"*)" mostrada no item 2.3.1. deste documento, objetiva restaurar a regularidade.

As duas intervenções, portanto, têm caráter complementar no combate ao *"bunching"*. A bibliografia disponível, pelo menos aparentemente, confirma tal complementaridade: enquanto são numerosos os estudos sobre "holding", os artigos sobre Controle Dinâmico de Velocidade mostram-se mais escassos. Parte destes analisa, de algum modo, a conjugação das duas intervenções.

O Controle da Velocidade, salvo alguma iniciativa até aqui desconhecida, somente é possível com o emprego de ferramentas de monitoração e comunicação proporcionada pelo ferramental de ITS. Não parece possível pensar num controle estático da velocidade dos ônibus de uma linha. Poderia ser tentado algum tipo de monitoração em pontos de controle ao longo da linha em que fossem medidos sucessivamente os intervalos entre os veículos, provendo instruções aos motoristas durante o período de embarque e desembarque de passageiros. Não se tem conhecimento de nenhuma iniciativa desse tipo, ao mesmo tempo em que pode ser

discutida a eficácia e o custo desse tipo de intervenção. Assim, entende-se ser razoável trabalhar apenas com o que já se denominou de Controle Dinâmico da Velocidade, provido a partir das atividades de monitoração e controle da Operação por meio dos equipamentos e sistemas disponíveis.

2.4.2.1. Resultados - Trabalhos selecionados

Os trabalhos mostrados a seguir têm naturezas, objetivos e métodos distintos. Por isto, não são possíveis comparações entre eles, mas, por outro lado, permitem diferentes visões sobre o mesmo tipo de intervenção.

Pedro Lizana, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesena., Felipe Delgado

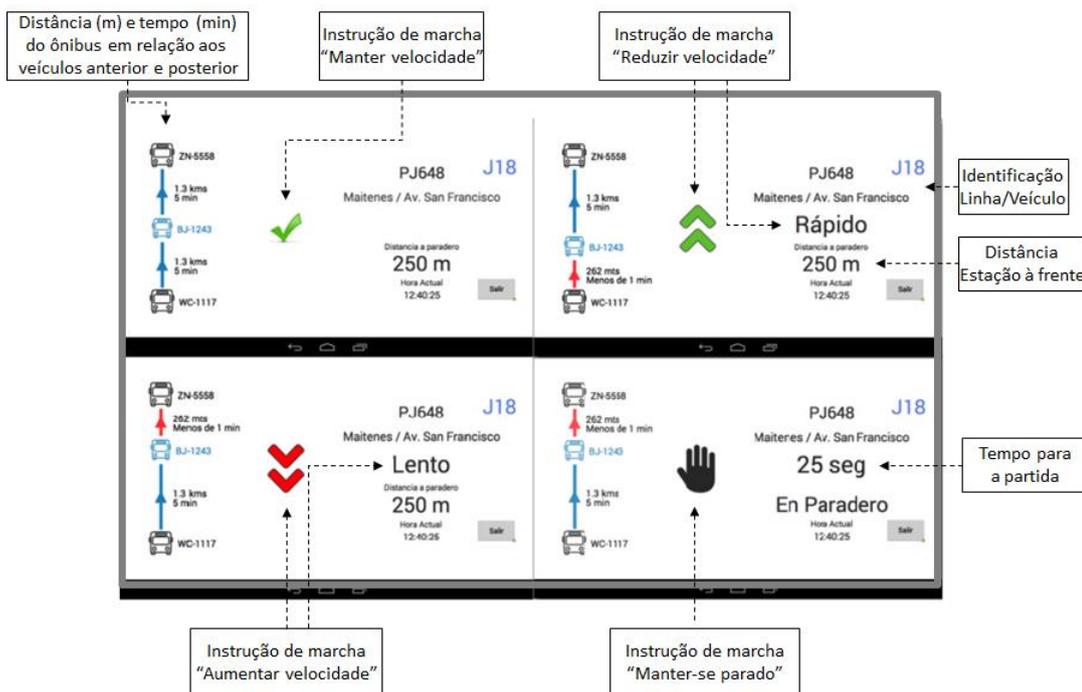
Este trabalho já foi descrito parcialmente, no item 2.3.1. “Paradas forçadas para Regulação (“*Holdings*”) desta Dissertação. Tratava-se ali da parte principal daquele documento em que foi estudada modelagem desenvolvida em busca da regularidade no Sistema Transantiago com o emprego da intervenção de Paradas para regulação.

O trabalho, entretanto, apresenta um interessante desdobramento voltado ao Controle de Velocidade.

A experiência teve caráter eminentemente prático: uma empresa operadora (Buses Metropolitana S.A.) decidiu fazer alguns testes pilotos exploratórios em seu serviço J18, linha alimentadora que opera na região oeste da cidade de Santiago do Chile. A linha tem 21 km de comprimento (70 estações), com intervalos de 7-9 minutos com demandas consideradas médias ligando áreas industriais e residenciais com o sistema de metrô.

Como a empresa não tinha consoles instalados em seus ônibus, os autores desenvolveram um aplicativo para tablet Android e foram instalados tablets dentro dos ônibus que operam o serviço. As informações e comandos são enviadas diretamente da central de processamento. Isso permite que o motorista exerça o controle sobre sua marcha em qualquer ponto de ônibus da linha ou também enquanto dirige. A Figura 8 mostra as 4 visualizações da aplicação Android, uma para cada situação do veículo

Figura 8 - Contr. Velocidades - Lizana et al (2009) - Aplicativo - Tela do Tablet



FONTE: (LIZANA et al., 2014) - Explicações acrescentadas pelo autor

Os resultados desta segunda experiência, segundo Lizana et al (2014) foram positivos, aumentando a regularidade e, por consequência, reduzindo multas.

Em suas conclusões os autores apontam a existência de diversos obstáculos, associados à implantação de qualquer novo sistema. Entre estes, apontam como mais importante a mudança cultural no controle operacional do serviço. Os autores mostram que o serviço apresenta uma tendência muito pronunciada para o "sanfonação" dos ônibus. O "headway" programado é de 3 minutos, mas o intervalo real pode chegar algumas vezes a 30 minutos. Apontam uma série de questões que devem ser enfrentadas para que o piloto possa ser bem-sucedido. Acenam que os motoristas podem ser a mais importante delas. Como o sistema permite o rastreamento de quantas instruções foram executadas por cada motorista, permite a avaliação personalizada de seu desempenho e, possivelmente, facilite a formulação de incentivos para o cumprimento da regularidade. A sugestão de (LIZANA et al., 2014) encontra eco em trabalho de Tiznado et al (2014) que realizou extensa pesquisa de campo com os motoristas do sistema Transantiago tratando de diversos aspectos de suas condições de trabalho e remuneração.

O trabalho de Lizana et al (2014) é notável e um dos mais interessantes entre tantos outros consultados, por dois motivos.

O primeiro deles por ser o único a relatar uma experiência desenvolvida, implantada e exercida na prática operacional cotidiana.

O segundo aspecto, não menos admirável, é o desenvolvimento de um ferramental de baixo custo e rápida implantação desenvolvido pela equipe para a citada linha. O texto do estudo não deixa claro, embora pareça explícito, que a experiência valeu-se da infraestrutura de ITS já instalada no Transantiago, tendo sido potencializada pelo uso de “smartphones” disponíveis no mercado para ampliar, ainda que de modo marginal, mas não desprezível, o espectro dos benefícios do uso desse instrumental. Salvo engano, este é um campo pouco explorado pelos fornecedores de equipamentos e sistemas de ITS.

No entanto, o estudo deixa no ar algumas questões que poderiam ser informadas ou mais esmiuçadas. A primeira delas é uma relativa falta de esclarecimento com relação ao sistema empregado para processar as informações de campo e transformá-las em instruções. A segunda questão diz respeito a uma certa escassez de informações dos resultados obtidos, que, pelo número de dados disponíveis a partir dos veículos, poderiam ser mais detalhadas.

Wanjing Ma, Hanzhou Xie e Baoxin Han (MA; XIE; HAN, 2012)

Entre os estudos averiguados com relação à intervenção ora analisada, foi aquele com maior amplitude de conceitos e de aspectos considerados. Os autores criaram o que chamam de Assistência de Direção Econômica para Veículos de Transporte Público - EDVT na sigla em inglês⁴⁰ que busca minimizar o consumo de energia, a emissão de poluição do ar nos ônibus e melhorar o nível de serviço desses sistemas.

Segundo os autores, aproveitando os mais recentes avanços nas tecnologias de informação e comunicação, o sistema EDTV pode fornecer aos motoristas de ônibus os melhores tempos recomendados de parada de ônibus e de velocidade de marcha para se adaptar ao plano de controle de tráfego em tempo real nas interseções a jusante da parada (semáforos). Com a finalidade de fazer frente aos impactos da variação estocástica dos tempos de paradas do ônibus, as intervenções entre dois cruzamentos adjacentes são, então, modeladas em três passos:

⁴⁰ Economic-Driving Assistance Program for Transit Vehicles - EDVT

- a) *Primeiro ajuste de velocidade*: gera a velocidade recomendada para o ônibus detectado para percorrer a distância entre o local da detecção e a parada.
- b) *Tempo de Retenção (“holding”) / Otimização velocidade*: gera o tempo de retenção recomendado na parada após a porta do ônibus ter fechado e a velocidade recomendada para o veículo percorrer a distância entre a parada e a linha de retenção a jusante desta parada.
- c) *Segundo ajuste de velocidade*: monitoramento, em tempo real, das mudanças dos tempos semafóricos, gerando a velocidade do veículo até completar a passagem na intersecção.

Visando a tratabilidade do modelo, os autores adotaram as seguintes premissas:

- o sistema de detecção e comunicação dos veículos permite a comunicação bidirecional em tempo real entre eles e os controladores de tráfego, de modo a suportar a otimização em tempo real da velocidade;
- a infraestrutura do sistema inclui faixa exclusiva nas aproximações estudadas, e todos os ônibus aceitam imediatamente a velocidade e o tempo de recomendados imediatamente e com acurácia.

Para avaliar a aplicabilidade e eficiência do método proposto, o estudo fez um estudo de caso para um cruzamento na Beiyuan Road, um dos principais corredores BRT (Bus Rapid Transit) de Jinan, China.

Existem faixas de ônibus exclusivas operando nas ruas transversais à Beiyuan Road. O modelo foi analisado sob três níveis de demanda de trânsito: nível Baixo (0,7 do volume básico, o volume básico e o volume alto (1,3 vezes o volume básico). Para a simulação foi empregado o software VISSIM de simulação. Cada simulação foi realizada com período de uma hora, tendo sido efetuada uma média de 10 rodadas para fazer frente à natureza estocástica dos resultados.

A avaliação foi feita pela comparação entre dois cenários. O primeiro deles sem a aplicação do EDTV (NEDTV), isto é usando programações fixas do semáforo. O segundo, implantou as mesmas programações semafóricas do cenário anterior, agora sob o cenário EDTV, aplicando as velocidades e os tempos de retenção recomendados pelo sistema.

Os resultados obtidos, do ponto de vista da eficiência da intervenção nos tempos de percurso dos ônibus, foram positivos, tendo alcançado, com a aplicação do EDTV, reduções entre 5,6% e 10%.

Com relação aos aspectos econômicos foi obtida redução do consumo de combustíveis entre 7,3% e 9,5%, enquanto nos aspectos ambientais, os autores consideram ter havido uma significativa redução da emissão de poluentes (embora sem detalhar sua composição) de 3,7% a 10%.

Jing Teng and Weimin Jin (TENG; JIN, 2015)

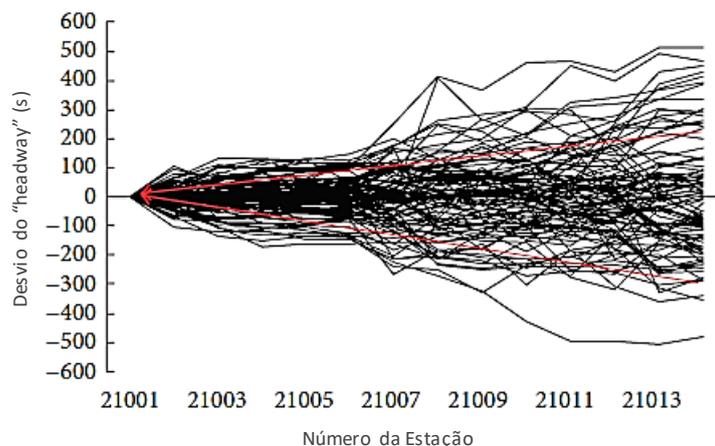
O estudo propõe um método para combater a formação de aglomeração de ônibus (“*bunching*”) que conjuga três diferentes intervenções: controle de velocidades dos ônibus, paradas para regulação (“*holding*”) e a preferência semafórica. As intervenções são aplicadas sucessivamente, na ordem em que foram citadas, desde que seja avaliado que a anterior não é capaz de solucionar o problema.

Em seu preâmbulo, os autores indicam que nas cidades chinesas, os sistemas de ônibus são caracterizados por intervalos (“*headways*”) curtos, não havendo pontos de controle disponíveis ao longo das linhas, o que favorece a tendência perversa de “*bunching*”. Eles consideram que, durante as viagens ao longo das linhas, o efeito dos fatores randômicos pode ser gradualmente balanceado, enquanto o efeito dos fatores direcionais (por exemplo, condições meteorológicas, congestionamentos de tráfego e comportamento do motorista) pode tornar-se progressivamente significativo, provocando o fenômeno de “*bunching*”. Para aliviar o efeito dos fatores direcionais, a identificação de um veículo atrasado ou adiantado deve ser previsto de forma proativa. Em assim sendo, os motoristas terão tempo suficiente para restaurar a regularidade do de seu veículo. Além disso, eles criam folgas em suas programações o que abre espaço para o controle operacional.

A partir dessa constatação, os autores defendem o controle de velocidade como um método de controle contínuo, ao contrário do controle a partir de um único ponto de controle que não se mostraria eficiente para linhas longas com alta frequência e, portanto, com forte tendência ao sanfonamento.

O princípio do controle desenvolvido no estudo partiu da análise do histórico das viagens realizadas por ônibus de uma mesma linha no decorrer de um dia (jornada) inteiro, que é mostrado no Gráfico 18.

Gráfico 18 - Contr. Velocidades Teng, Jin (2015) - Desvios “headways” Linhas Ônibus



FONTE: (TENG; JIN, 2015)

O exame do gráfico mostra que quanto maior a distância percorrida desde o terminal de partida, maior é a variância do desvio de “*headway*”, que tende a aumentar. O desvio de *headway* é tão grande (por exemplo, na estação número 21008) que é difícil restaurar a regularidade a jusante com os ônibus viajando ao longo da rota. O controle de ponto único ou controle de pequeno alcance não parece ser suficiente para restringir essa forte tendência ao “*bunching*”.

O desvio do “*headway*” no terminal de parada, em algumas paradas importantes e interseções chaves deveriam fazer os desvios caírem para limites toleráveis. As linhas vermelhas no Gráfico 18 representam os limites dos desvios considerados pouco atrasados ou adiantados, vitais para a formulação do conceito de Controle Proporcional por Limite⁴¹, em que são calculados os limites do “*headway*” para cada ponto de controle.

Em seguida é descrita a arquitetura do sistema de controle proposto. Ele guarda alguma semelhança com aquele proposto por (MA; XIE; HAN, 2012) no sentido que ambos conjugam o Controle de Velocidade dos ônibus com a aplicação do “*holding*”. Neste caso, os autores, a essa conjugação de intervenções, incorporam ainda a prioridade Semafórica, buscando superar as deficiências da aplicação do “*holding*” nos casos de linhas longas com “*headways*” curtos. O sistema propõe-se a ajustar dinamicamente a velocidade dos ônibus, os tempos de parada nas estações e os tempos do semáforo para os ônibus mais afastados do ponto de partida. Com a ajuda da comunicação em tempo real entre o centro de controle e os veículos, o

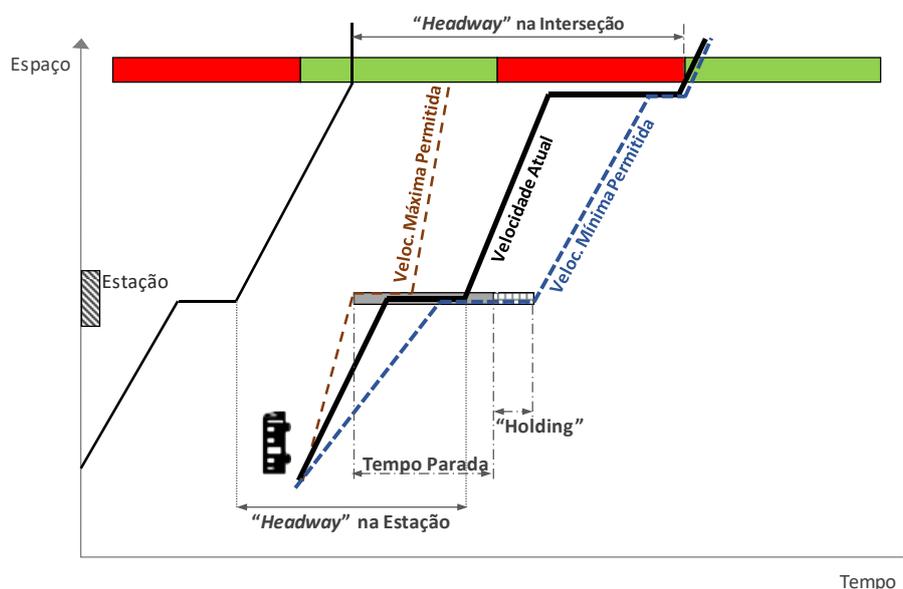
⁴¹ Em inglês, “*Proportional Control Threshold*”

“*headway*” de partida de ônibus adjacentes pode ser transmitido ao centro de controle e deste para os motoristas. Simultaneamente, por meio da comunicação entre os veículos e os controladores semaforicos, aqueles podem emitir solicitação de prioridade, fazendo com que a central de controle dos semáforos ajuste os tempos de fase. O processo é executado em quatro etapas sucessivas:

- nenhuma ação - quando o desvio de “*headway*” detectado encontra-se dentro dos limites previamente estabelecidos nos pontos chave antes identificados;
- ajuste da velocidade - deflagrado quando a desvio de “*headway*” encontra-se além dos limites estabelecidos, momento em que o motorista é notificado;
- ajuste dos semáforos - é acionado quando o controle de velocidade não for suficiente para trazer o desvio para os limites estabelecidos;
- notificação de atraso - Se qualquer ajuste apropriado se tornar impossível, as informações de atraso são notificadas aos passageiros que esperavam nos pontos de ônibus correspondentes por meio de Painel de Mensagem Variável - PMV, áudio local ou aplicativos para telefone celular.

O procedimento de ajuste de velocidade é explicado esquematicamente no Gráfico

Gráfico 19 - Teng, Jin (2015) - Controle de Velocidade - Representação esquemática



19.

FONTE: (TENG; JIN, 2015)

O procedimento de ajuste de velocidade é o componente principal do sistema de controle. Se o desvio de “*headway*” detectado na parada for menor que o limite, os

ônibus mantêm a velocidade atual. Caso contrário, os motoristas serão instruídos a alterar suas velocidades atuais. Se o desvio de “*headway*” na interseção for menor que o limite, o plano de sincronização do sinal será mantido e não será aplicado “*holding*”. Caso contrário, serão acionados o “*holding*” e/ou a Preferência Semafórica. O ajuste de velocidade também é apropriado para o controle dos ônibus adiantados.

O modelo foi simulado com dados reais da linha nº 210m, um corredor de 9,75 km de extensão e 14 estações na cidade de Shanghai, China, com “*headways*” programados de 3 a 5 min nos períodos de pico e 7 a 10 minutos nos entre-picos. Os dados experimentais foram obtidos de dados registrados pelos AVL de 15-abr a 15-set-2011, com jornadas diárias das 05h00 às 22h00. Dados dos passageiros foram obtidos de pesquisas de campo.

A simulação atualiza as localizações de todos os ônibus em sequência nas etapas regulares do tempo de simulação. O modelo de simulação compreende três módulos: despacho, operação dos ônibus e o controle. O modelo descreve o status operacional do ônibus: partida do ponto inicial, percurso na via, chegada na parada e saída da parada, servindo os passageiros na parada e ajustando a velocidade no percurso. O módulo de operação do ônibus simula o processo de operação de cada ônibus, bem como seu ambiente operacional. O tempo de viagem de ônibus geralmente é simulado usando distribuição normal e lognormal. A análise estatística dos dados históricos, permitiu a conclusão de que o tempo de viagem de ônibus segue a distribuição normal.

Com base no tempo de viagem, pode ser gerado o tempo de chegada do ônibus na parada imediata a jusante.

As programações dos semáforos de cada intersecção são geradas, ciclo por ciclo, a partir do início da simulação. O tempo de início e o tempo final da fase verde são posteriormente atualizados no correspondente estágio da simulação.

O módulo de controle simula o processo de ajustamento da velocidade do ônibus. Antes de gerar o tempo de deslocamento do próximo trecho (velocidade), ele verificará se o desvio do “*headway*” entre os veículos adjacentes está dentro dos limites previamente estabelecidos. Caso contrário, notificará a mudança da velocidade do e regenerará o tempo de percurso do o próximo trecho (velocidade).

Quando um completo processo de simulação da viagem de um ônibus for concluído, o módulo de despacho irá gerar o horário de partida da próxima viagem no ponto de partida, de acordo com a programação.

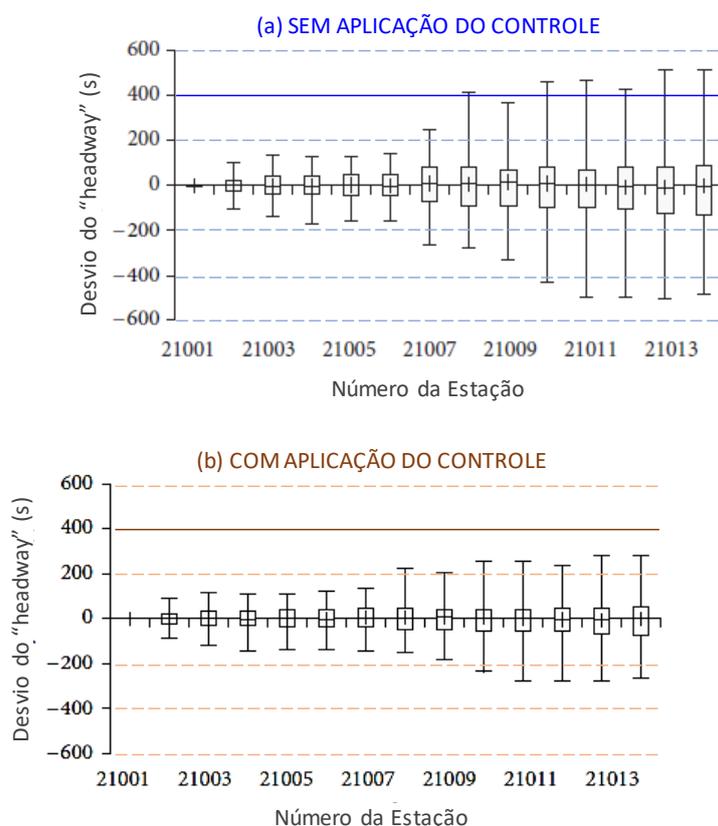
Três medidas de desempenho são empregadas para comparar as diferentes estratégias de controle adotadas:

- variação do “headway” - calculada para todas as viagens e paradas, pode refletir a estabilidade do sistema;
- tempo de espera do passageiro - a variação nos tempos reflete o impacto das intervenções sobre os passageiros
- tempo de viagem - pode refletir a eficiência do sistema.

Estes três indicadores foram empregados pelos autores para aferição dos resultados das simulações.

- Variância do “headway” - Conforme mostrado no Gráfico 20, quando o controle do veículo não foi aplicado, o desvio do “headway” nas estações iniciais varia pouco. No entanto, à medida que a distância do veículo em relação ao ponto de partida aumenta, aquela variação tende a aumentar. Na parte (a) do gráfico, em 6 das 14 estações os desvios positivos são superiores a 400 s. Quando o sistema de controle proposto é aplicado, os limites superior e inferior do desvio de curso são diminuídos em alguma extensão. Na parte (b) do gráfico, não se observa nenhum desvio, positivo ou

Gráfico 20 - Teng, Jin (2015) - Desvios dos “headways” - Resultados do controle



negativo, acima de 400 s.

FONTE: (TENG; JIN, 2015)

- Os tempos de espera dos passageiros, assim como no caso dos desvios de “*headway*” apresentam pequenas variações em relação ao estado de não aplicação da intervenção e, portanto, pequenas reduções (máxima de 1,3%) até a 5ª estação a jusante do ponto de partida. A partir da 6ª estação, as reduções do tempo de espera crescem à medida que as estações estão mais distantes. Nesse trecho, as reduções variam entre 6,1% e 9,0%.
- Quando aplicada a intervenção, tempo total de viagem apresenta uma redução praticamente residual em relação ao cenário de não aplicação (cerca de 0,6%). Os autores argumentam que essa quase paridade entre os dois cenários deve-se que os ganhos de regularidade dos “*headways*” são feitos, em parte, às custas de aumentos nos tempos de viagem.

Dois aspectos pareceram marcantes nesse estudo. O primeiro deles foi a capacidade de conjugar três tipos de intervenção diferentes num mesmo método, aplicando-as em graus sucessivos.

O segundo aspecto de interesse foi considerar, na lógica da estratégia, o controle de velocidade como intervenção principal, funcionando as outras duas como ações adicionais quando a intervenção anterior não conseguia gerar resultados.

Considera-se oportuno levar em conta que o método requer um conjunto considerável de equipamentos e sistemas necessários para sua aplicação, quais sejam: equipamentos embarcados, um duplo sistema de controle (um constituído dos instrumentos para monitorar e controlar a operação e outro para processar os controles dos “*headways*”) e a infraestrutura e os sistemas para calcular e programar a preferência semafórica.

2.5. FACILIDADES DA INFRAESTRUTURA

Os aspectos e atributos apresentados neste item não se configuram como intervenções operacionais, uma vez que são características físicas estabelecidas em projeto e não ações que façam parte da atividade operacional.

No entanto, entendeu-se ser oportuno o cotejo dos benefícios por eles proporcionados no desempenho operacional dos sistemas de ônibus, com os benefícios oferecidos pelas intervenções operacionais propriamente ditas.

Foram analisadas três características de naturezas relativamente diversas, quais sejam: a segregação das vias para os ônibus, as áreas de ultrapassagem em corredores de ônibus e a bilhetagem desembarcada.

2.5.1. Segregação de faixas ou vias para os ônibus

A segregação de vias ou faixas de rolamento para o uso de sistemas regulares de ônibus surgiu na segunda metade da década de 1970. Foi nesse período que os congestionamentos de trânsito passaram a ser percebidos como problema para a mobilidade nas cidades e, por consequência, foram procuradas saídas técnicas de custo relativamente baixo para privilegiar os sistemas de ônibus urbanos.

Ainda que de modo ligeiro, a segregação de pistas para o uso de ônibus pode ser classificada em duas categorias principais:

- a) as faixas exclusivas à direita⁴² da via, junto às calçadas, de implantação mais fácil, mas que apresentam alguns inconvenientes, principalmente as conversões à direita para os demais veículos; podem apresentar sentido concordante com a via ou não (contrafluxo); podem apresentar faixa adicional para ultrapassagens nas paradas;
- b) as faixas segregadas junto ao canteiro central, com segregação por sinalização ou por barreiras físicas - apresentam menos interferências, mas sua implantação habitualmente requer adaptações de infraestrutura (alargamento de canteiros centrais nas paradas, dispositivos para travessias de pedestres, etc.)

Cabe observar que, uma vez que os relatos feitos neste item não se referem especificamente a intervenções a serem aplicadas durante a operação dos serviços de ônibus, não serão feitas resenhas detalhadas sobre os métodos empregados nos trabalhos consultados. Nesses casos, o foco foi centrado nos resultados obtidos.

2.5.1.1. O caso da cidade de São Paulo

Como relata Moreno Neto (1977), a Companhia de Engenharia de Tráfego - CET de São Paulo, iniciou a implantação de faixas exclusivas na cidade no ano de 1977, no âmbito dos esforços para superar os efeitos da crise internacional do petróleo então em curso. Vuchik (2002) indica que, por volta daquela época uma série de cidades também instalaram faixas exclusivas: Ottawa, Washington, Los Angeles, Pittsburgh,

⁴² A identificação das faixas “à direita da via” é aplicável apenas para os países que convencionaram a circulação de veículos numa via de mão dupla deva ser feita na metade da pista do lado direito. O regime de trânsito adotado na Inglaterra e outros países é o inverso: circulação pela metade da pista do lado esquerdo.

Lima e Cidade do México. Ao lado de outras iniciativas dedicadas à prioridade ao transporte público por ônibus, o autor considera-as como parte do conceito de BST - Bus Semirapid Transit então em desenvolvimento.

Alternando implantações mais ou menos esparsas com períodos longos sem qualquer implantação de faixas exclusivas, a cidade chegou em 2012 com cerca de 90 km de vias com esse tipo de preferência. Nos anos seguintes, a Prefeitura de São Paulo desencadeou um esforço de implantações sucessivas com o objetivo de elevar as velocidades dos ônibus, de modo a reduzir os longos tempos de viagem enfrentados pelos usuários do sistema e, ao mesmo tempo, aumentar a eficiência dos serviços. Os resultados são mostrados na Tabela 24.

Tabela 24 - Faixas Exclusivas - S. Paulo - Implantações Período 2012-2015

REGIÃO	FAIXAS EXCLUSIVAS IMPLANTADAS (km) POR ANO				TOTAL ATÉ 2015
	Até 2012	2013	2014	2015 ⁽¹⁾	
Centro	5,1	25,8	2,5	0,3	33,7
Sul	7,4	76,4	20,5	3,4	107,7
Norte	18,9	40,0	20,8	1,6	81,3
Leste	47,3	117,9	18,9	4,3	188,4
Oeste	11,0	31,3	15,1	0,8	58,2
TOTAL ⁽²⁾	89,7	291,4	77,8	10,4	469,3

OBSERVAÇÕES

(1) Dados compreendem até o mês de março-2015. Na tabela original eram previstos mais 11,5 km a serem implantados

(2) Na tabela que serviu como fonte, no total do ano 2012, há uma diferença a maior de 0,3 km, provavelmente devida a arredondamentos de casas decimais. Nesta tabela, as contas foram refeitas

FONTE: Companhia de Engenharia de Tráfego - CET-SP apud (TATTO, 2015)

Pode-se considerar um esforço significativo, na medida em que, no período apresentado, a quilometragem de faixas exclusivas mais que quintuplicou.

Em termos de segregação, podem ser considerados como um degrau acima das faixas exclusivas, estão os Corredores exclusivos de ônibus. Trata-se de um conceito relativamente disperso, visto que são podem ser encontrados com diferentes configurações. Em boa parte dos casos, como na maior parte dos Corredores na Cidade de São Paulo, a faixa é segregada no lado esquerdo da pista, com estações claramente definidas nos canteiros centrais, o pavimento é rígido em parte dos casos e pode ou não haver monitoramento operacional com equipamentos de ITS fixos e embarcados.

Recentemente o Instituto Brasileiro de Defesa do Consumidor - IDEC publicou relatório (IDEC, 2018) que reúne e analisa dados sobre a implantação de Corredores

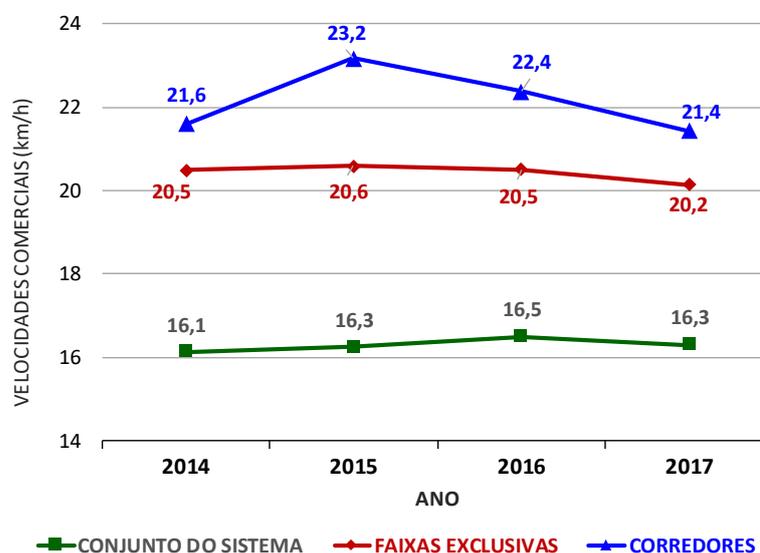
Tabela 25 - Corredores e Faixas Exclusivas - 12 Capitais BR - Implantações até 2018 de Ônibus e Faixas Exclusivas nas 12 capitais mais populosas do Brasil. Os resultados são mostrados na Tabela 25.

CIDADE	EXTENSÃO PRIORIZAÇÕES (km)		VIAS CARROÇÁVEIS (km)
	Corredores de Ônibus	Faixas Exclusivas	
Belém	18,2	5,8	3.134,0
Belo Horizonte	41,7	75,5	4.799,3
Brasília	68,8	26,1	13.780,5
Curitiba	171,2	5,7	4.514,9
Fortaleza	6,6	91,4	4.400,0
Goiânia	44,0	24,2	6.150,9
Manaus	0,0	16,3	5.000,0
Porto Alegre	108,2	20,1	2.788,9
Recife	4,0	63,1	2.585,3
Rio de Janeiro	244,0	55,5	9.933,9
Salvador	905,0	1,2	3.781,0
São Paulo	285,9	500,4	20.183,9

FONTE:(IDEC, 2018)

Resta, verificar a efetividade das medidas. Os dados publicados pela Prefeitura de São Paulo com relação às velocidades dos ônibus no conjunto do sistema regular e nos trechos onde existem Corredores e Faixas Exclusivas são mostrados no Gráfico

Gráfico 21 - S.Paulo - Velocidades por Sistema Ônibus - Pico Manhã 2014-2017



21.

FONTE: (SÃO PAULO, 2018) ⁴³

Os resultados podem ser considerados expressivos: comparando-se as velocidades comerciais em relação ao conjunto do sistema, o aumento da velocidade comercial dos ônibus usufruindo a preferência nas faixas exclusivas varia entre 27,1% (ano de 2014) e 23,6% (ano de 2017). Já nos Corredores as velocidades são superiores entre 31,5% (2017) e 35,7 (2016). Neste último caso, os valores podem ser impulsionados pelo Expresso Tiradentes: embora com extensão relativamente pequena, aquele sistema tem via inteiramente segregada e na maior parte elevada, o que faz com que suas velocidades comerciais médias variem entre 35,0 e 47,7 km/h.

Desde o início do período, verifica-se uma tendência, ainda que ligeira, de diminuição dessas diferenças que talvez mereça uma análise mais detalhada. De qualquer maneira, os benefícios gerados pela faixa exclusiva são notáveis. Visto que os investimentos para esse tipo de implantação são expressivamente baixos, especialmente no caso das faixas exclusivas (resumem-se a investimentos em sinalização e fiscalização), trata-se de inversão em infraestrutura a ser considerada. Não foram encontrados dados relativos aos custos desses tipos de medida. No entanto, entende-se que deva ser estudada a relação custo-benefício desta intervenção. Ela pode se apresentar como intervenção de curto prazo, baixos custos e resultados relativamente altos, até que soluções mais robustas possam ser implantadas.

O único estudo sobre o custo de implantação de faixas exclusivas foi efetuado em Londrina-PR (DUTRA; BECKER, 2015) , município com 543 mil habitantes. O trabalho aponta que, para a implantação de 14,2 km de faixas exclusivas, foram despendidos cerca de R\$ 90 mil em sinalização, correspondentes, à época, a US\$ 40,4 mil⁴⁴ . Mesmo descontadas possíveis subestimações de custo, pode ser considerado um valor diminuto para resultados expressivos.

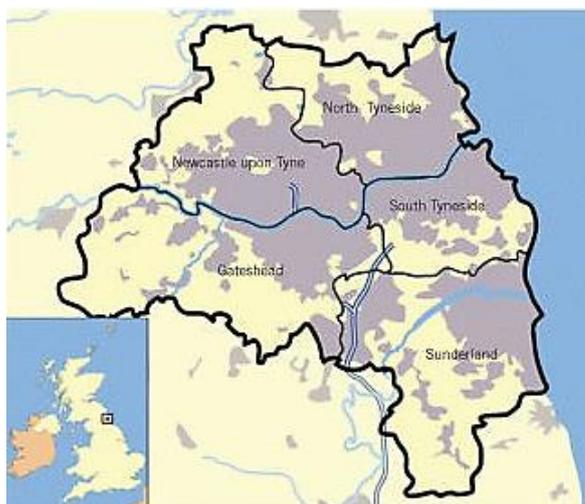
⁴³ Entende-se cabível uma observação: os dados publicados pela Prefeitura de São Paulo cobrem o período de 2009 a 2017. No entanto, para os veículos transitando nas faixas exclusivas, esses dados somente são mostrados a partir de 2014. Dada a intenção de comparar as informações, o período considerado no gráfico restringe-se a 2014 a 2017.

⁴⁴ Cotação para 30-Jun-2013 pelo site <https://financeone.com.br/moedas/cotacoes-do-dolar> : 01 US\$ = R\$ 2,215

2.5.1.2. Faixas Exclusivas de Ônibus x Faixas sem Automóveis

Artigo de Corinne Mulley (2010) apresenta um comparativo entre implantações de medidas restritivas aos automóveis no Reino Unido. Tyne and Wear é um condado metropolitano situado na Região Nordeste da Inglaterra à beira do Canal da Mancha, com área de 540 km² e população de 1,1 milhão de habitantes. Envolve 5 distritos conurbados, cada um deles com autoridades próprias na gestão da mobilidade, à quais cabe a autorização para implantação de medidas de prioridade nas vias. Tal circunstância deu origem a dois tipos de medida implantadas: faixas exclusivas de ônibus tradicionais e uma nova modalidade, as faixas sem automóveis (“*no bus lanes*” em inglês) nas quais não é permitido o trânsito de automóveis, mas é permitido o trânsito de outros tipos de veículos, em particular os ônibus e veículos de carga. A Figura 9 mostra a localização da cidade, os distritos que a compõem e as principais vias onde foram implantadas as medidas.

Figura 9 - Tyne and Wear - UK - Faixas para Ônibus e Faixas Sem Automóveis



lanes” em inglês) nas quais não é permitido o trânsito de automóveis, mas é permitido o trânsito de outros tipos de veículos, em particular os ônibus e veículos de carga. A Figura 9 mostra a localização da cidade, os distritos que a compõem e as principais vias onde foram implantadas as medidas.

FONTE: (MULLEY, 2010)

Foram implantados 17,4 km de Faixas Exclusivas de Ônibus e 11,7 km de Faixas Sem Automóveis, totalizando 29,1 km de vias com restrições.

O estudo propôs-se a efetuar análises mais abrangentes do que as habitualmente encontradas nesse tipo de intervenção. Além da apuração das variações nas velocidades, tempos de percurso, atrasos, etc., a autora procurou agregar análises das interferências entre os fluxos de veículos, verificando os impactos das medidas restritivas sobre os caminhões, impactos ambientais, impactos na segurança viária, fluxos de tráfego, infrações no uso das faixas e percepção das comunidades em

relação às prioridades. No entanto, enfrentou dificuldades para a obtenção de dados do quadro “Antes” da Implantação. Foram então selecionadas 12 vias, mesclando vias com faixas de ônibus, com faixas sem automóveis e, para efeito de comparação, sem nenhuma medida restritiva, visando o tratamento estatísticos dos dados para obtenção de informações sobre os tempos de viagem. Os dados mostraram limitações que não permitiam oferecer evidências conclusivas.

Foram, então realizadas simulações com o software VISSIM com uma série de variações de dados que poderiam afetar os tempos de viagem e que também poderiam servir de apoio às demais análises. Os passos seguidos e resultados obtidos são relatados a seguir:

- a) Tempos de Viagem - para cada tipo de medida restritiva foram testadas variações na extensão da intervenção, no fluxo total de tráfego, no percentual de Veículos Pesados de Carga - HGV ⁴⁵ na sigla em inglês, na composição do tráfego, nos “*headways*” dos ônibus e o avanço de ônibus. Os resultados mostraram que o aumento no grau de restrição leva a aumentos nos tempos de percurso, ainda que os ônibus apresentam o menor aumento de tempo quando circulam na Faixa Exclusiva para Ônibus. Os HGV apresentam aumento mínimo no caso das Faixas sem Carro em relação à não intervenção. Em relação à extensão da medida restritiva, em geral quando mais extensa a restrição, menor é a variabilidade do tempo de percurso. A variação no fluxo de veículos teve forte impacto nos tempos de percurso dos automóveis.
- b) Impactos ambientais - para avaliar os impactos de uso dos combustíveis e as emissões, foi empregado o mesmo modelo simulado no VISSIM, cujas saídas foram exportadas para o software EnvPro, que calcula os consumos de combustíveis e a emissão de poluentes a partir da velocidade e aceleração de cada veículo em cada intervalo. Todos os resultados convergiram para o aumento de emissões à medida que aumentam as restrições, ou seja, na ordem crescente de “Sem Prioridade” para ‘Faixa sem Automóveis’ para “Faixa de ônibus com Taxis” para ‘Faixa de Ônibus’, sugerindo que o impacto ambiental mínimo com nenhuma prioridade e entre as medidas restritivas testadas o melhor resultado foi da “Faixa sem Automóveis”. Cabe aqui uma observação: estudo de Castro e Strambi (2008) efetuou análise emissões de poluentes em

⁴⁵ No original em inglês, “*Heavy Goods Vehicle – HGV*”

faixas exclusivas no Corredor Pirituba-Lapa-Centro em São Paulo. Embora seja iniciativa em cenário bastante diverso daquele analisado por (MULLEY, 2010), os resultados para o caso de São Paulo foram positivos, ao contrário do que se observa na experiência inglesa.

- c) Impactos na Segurança Viária - o estudo empregou dados de acidentes com vítimas ocorridos entre janeiro-2003 a dezembro-2005 da Unidade de Dados de Acidentes e Tráfego de Tyne and Wear - TADU⁴⁶ na sigla em inglês, tendo sido identificados, nas vias com restrições, 360 acidentes com vítimas internadas em hospitais. Os resultados mostram que 19 desses acidentes, ou seja, 5,3% do total foram atribuídos à existência das medidas restritivas. Dos 19 acidentes, 18 foram considerados “leves” uma vez que os ferimentos demandaram apenas assistência médica no local. A conclusão foi que o índice de acidentes para qualquer tipo de intervenção foram considerados baixos.
- d) Impactos no Fluxo de Veículos - a análise deste aspecto foi incluída no estudo porque, segundo a autora “...pois há um preconceito geral de que a implementação de medidas de prioridade tem o efeito de desviar o tráfego para vias onde não há restrições”. Para a análise, foram empregados dados de Contagens Automática de Tráfego coletados pela TADU. As conclusões do estudo apontam para a falta de evidências concretas para confirmar aumentos significativos no tráfego desviado. O fato de ter havido redução de volumes de tráfego em algumas vias com restrições é considerado pela autora como “mais uma expressão de “extinção de tráfego”, que resulta de uma mistura de mudança de modo, desvio de viagem, reprogramação, ou supressão de viagem em virtude do aumento de congestionamentos.
- e) Infrações no uso das faixas - esta avaliação foi incluída pela autora por haver “uma percepção geral de que as faixas com prioridade são mal fiscalizadas e isto limitaria a efetividade das medidas.” Para efetuar a análise foram efetuadas contagens manuais classificadas em 2005 e 2006 por períodos de 14 horas. Os resultados mostram que o desrespeito às faixas de ônibus é menor (0,71%) do que nas faixas sem automóveis (2,41%). É citado o fato de que as faixas de ônibus são válidas 24 horas por dia, enquanto as faixas sem automóveis ficam ativas das 07h00 às 19h00. Em contrapartida, o estudo lembra que a

⁴⁶ No original em inglês “Tyne and Wear Traffic and Accident Data Unit – TADU”

fiscalização é tão mais difícil quanto maior a heterogeneidade do tráfego permitido.

- f) Percepção da Comunidade - para este tipo de avaliação foi realizada uma dupla pesquisa de atitudes aplicadas pela Internet. Foram desenvolvidos dois questionários: um direcionado ao público em geral, tanto usuários quanto não-usuários do espaço viário; um segundo questionário foi direcionado mais especificamente a operadores do transporte rodoviário que são afetados mais criticamente no caso das Faixas Exclusivas de Ônibus. O questionário para o público recebeu 1.300 respostas. Os questionários com os motoristas de veículos de carga receberam poucas respostas e os resultados numéricos não foram apresentados. Houve um número significativo de entrevistados que demonstraram falta de conhecimento da existência de faixas restritivas. Mesmo fazendo tabulação apenas com os 730 viajantes cujos destinos faziam com que eles forçosamente passassem por vias com restrições em seus deslocamentos diários, um número elevado (quase 30%) dos entrevistados revelou desconhecer as faixas especiais. Outra seleção de 836 entrevistados que empregam meio de transporte que passa por áreas com restrição e que declararam estar cientes da existência das faixas, recebeu, como era de se esperar, respostas positivas de usuários de ônibus e de bicicletas e respostas negativas de motoristas e passageiros de automóveis.

As conclusões do estudo reforçam a crítica à existência de múltiplos trechos curtos com restrição, fazem alusão aos resultados mistos nos tempos de percurso e consideram que as Faixas sem Automóveis são preferíveis a outras formas de priorização para todos os modos motorizados.

O trabalho apresenta dois pontos notáveis. O primeiro deles é Faixa sem Automóvel, um tipo alternativo de restrição implantado naquela cidade inglesa. O segundo ponto notável é a análise multifacetada das intervenções, tornando-a mais abrangente e completa.

2.5.1.3. Faixas de Veículos com Alta Ocupação - HOV⁴⁷ na sigla em inglês

Segundo Vuchic (2002), o conceito de faixas ou vias HOV foi introduzido nos Estados Unidos no final dos anos 70, que poderiam ser consideradas uma variante

⁴⁷ No original em inglês "*Lanes of High Occupancy Vehicles - HOV*".

das faixas exclusivas de ônibus. Elas surgiram pela transformação da maioria das vias e faixas exclusivas de ônibus, onde passaram a ser aceito o trânsito de veículos com número de passageiros acima do mínimo estabelecido em cada cidade. O autor comenta que essa mudança pode ter melhorado a utilização da infraestrutura em termos do número de veículos atendidos, mas beneficiou o compartilhamento de viagens (conhecidos em inglês como “*carpools*” ou “*vanpools*”), enquanto os usuários de ônibus experimentaram a degradação do serviço e da imagem dos sistemas de ônibus.

À época da redação do artigo, Vuchic (2002) citou o então novo fenômeno do “carpool ad hoc”, exercido nas próprias faixas e vias exclusivas, que considerava um “roubo” direto de passageiros dos ônibus. A diminuição no número de passageiros acabou resultando no definhamento dos serviços de ônibus. O autor considerava que assim, nos Estados Unidos, as vias exclusivas de ônibus praticamente desapareceram, com exceção de Pittsburgh e outras poucas outras cidades.

2.5.1.4. Experiência em Bangkok, Tailândia

Estudo de Tanaboriboon e Toonim (1983) relata e analisa implantação, feita em 1980, de aproximadamente 95 km de faixas exclusivas na cidade de Bangkok, a maioria delas em vias com três faixas por sentido nas duas direções. Em geral a vigência da restrição se dava nos picos da manhã e da tarde (das 06h30 às 09h00 e das 15h30 às 18h30). O estudo chama a atenção pelo fato de, historicamente, a cidade apresentar níveis elevados de congestionamento de trânsito.

Para a realização do trabalho, foram efetuadas pesquisas de campo nos cenários “antes” e “depois”, sendo feitas contagens classificadas de veículos, e medição de tempos de percurso de ônibus e automóveis. Na etapa de tabulação, foi feito o tratamento estatístico dos dados.

Os resultados mostraram que os tempos de viagem dos ônibus tiveram reduções em todas as vias, variando entre 0,7% e 23%. Visando apurar a regularidade do serviço de ônibus, os autores valeram-se do desvio padrão na distribuição do tempo de viagem registrado. Os resultados mostraram que em apenas em um caso houve um aumento no desvio padrão, por volta de 0,65 min (46,8%), enquanto para as outras nove instâncias, as reduções no desvio padrão variaram de 0,05 min a 1,39 min, equivalentes a 4,6% e 68%. Por testes estatísticos, apenas em uma instância, o desvio padrão foi significativamente aumentado; em dois casos, não houve

mudanças significativas. No entanto, em sete outros casos, evidenciou-se a melhoria significativa da regularidade do serviço.

Com relação a mudanças nos tempos de viagem dos automóveis, em sete casos em quatro seções de estudos, os tempos de viagem de automóveis foram melhorados. O tempo de viagem economizado variou de 0,01 min a 3,01 min, equivalentes, respectivamente, a 0,4% e 47%. No entanto, as reduções nas quatro seções deste estudo foram pequenas e, a partir de testes estatísticos, não houve mudanças significativas. As reduções em duas outras vias do estudo foram estatisticamente significativas ao nível de 5%. Essas reduções no tempo de viagem foram maiores que as obtidas pelos ônibus. Apenas em dois casos, ambos ao longo da Sukhumvit Road, os carros foram afetados negativamente: os tempos de viagem de carro nesta seção de estudo aumentaram em 1,79 minutos e 3,52 minutos, ou 14% e 28%, respectivamente. Estes aumentos foram estatisticamente significativos

Na via Sukhumvit, a implantação das faixas de ônibus não conseguiu melhorar o serviço de ônibus. Além disso, afetaram negativamente o tempo de viagem dos automóveis e introduziram maior incerteza no tempos de viagem. Os autores atribuem estes resultados específicos a dois fatores principais, associados às características locais e às condições de tráfego naquela via: muitas ruas locais sem saída e vários cruzamentos de ruas secundárias com a via Principal que, por sua vez apresentavam volumes elevados de veículos.

Os autores concluem que, apesar do insucesso na Via Sukumvit, a implantação logrou um impacto positivo no nível de serviço dos ônibus sem afetar o nível de serviço do tráfego dos demais veículos.

2.5.2. **Ultrapassagens**

Repetem-se neste caso, as características mostradas no item anterior: uma facilidade proporcionada pela infraestrutura que, ao mesmo tempo provê benefícios para a operação do sistema, é, também, contribuição ou mesmo requisito para outras intervenções que ampliam benefícios. Trata-se, neste caso, da existência de pontos de ultrapassagem entre ônibus dentro de áreas segregadas.

Wu, Liu e Jin (2017) resumem esse compartilhamento entre uma intervenção e uma facilidade de infraestrutura quando tratam da intervenção de paradas forçadas para regulação (“*holdings*”):

“...se o sistema de ônibus depender exclusivamente das estratégias operacionais, a eficiência poderá ser reduzida. Por exemplo, uma desvantagem de estabelecer os “holdings” é que a intervenção, por si, pode resultar em tempos de parada nas estações mais longos e maior tempo real de percurso. Embora o esquema de “skip-stop” possa aumentar a velocidade comercial, também aumenta o tempo de espera dos passageiros nas estações sem serviço. A eficiência operacional de um sistema de ônibus envolve movimentos de ônibus e passageiros. Se mais flexibilidade puder ser fornecida por qualquer um dos processos, a eficiência operacional poderia ser invreimentada. Uma solução possível é permitir a ultrapassagem entre os ônibus. Quando o veículo em movimento mais lento impede que os seguintes o ultrapassem, muitas vezes ele ocasiona a fila.”

2.5.2.1. Trabalhos Seleccionados

Weitiao Wu, Ronghui Liu, Wenzhou Jin (WU; LIU; JIN, 2017)

O objetivo principal dos autores foi identificar possíveis medidas que possam potencializar a intervenção de “holding” pela inclusão da ultrapassagem e da troca de filas de passageiros nas estações de embarque.

(WU; LIU; JIN, 2017) enfatizam que as ultrapassagens de ônibus ocorrem ou entre as estações (devido a variações nas condições de viagem), ou nelas (devido a variações na demanda de passageiros). Com relação a estas últimas, embora as ultrapassagens possam resultar em “*bunching*” de veículos “saltadores” nas estações, o “*bunching*” pode ser evitado pela operação de ultrapassagem. Por exemplo, um veículo posterior pode deixar a parada mais cedo do que o ônibus à frente quando menos passageiros estiverem fazendo fila. Deste modo, economiza-se o tempo parado em “*holding*”.

Outra solução é distribuir as filas de passageiros em espera como resposta às chegadas de ônibus e aos níveis de superlotação, de forma guiada ou autônoma.

Por exemplo, pede-se aos passageiros que embarquem no ônibus seguinte se o ônibus atual estiver próximo à lotação, ou mudem de fila em direção a ônibus menos congestionados depois que o “*bunching*” ocorrer. Em vez de usar limites de embarque para redistribuir os passageiros entre os veículos, como Delgado et al. (2012) sugeriram, nesta pesquisa, os autores sugerem uma distribuição orientada do

comportamento de passageiros entre os veículos acumulados na parade. Isso se assemelha a uma abordagem de atribuição proporcional com base na capacidade residual disponível. Os autores chamam essas soluções de "estratégia de controle ad hoc", na medida em que elas aproveitam o Embarque Distribuído de Passageiros (DPB⁴⁸ na sigla em inglês), em vez de depender de ações de controle passivo impostas aos veículos.

O modelo desenvolvido compõe-se de três submodelos: o de movimentação geral dos ônibus, o de comportamento de passageiros nas filas e o de controle por “*holding*”⁴⁸. Foram assumidas as seguintes premissas

- a chegada dos passageiros às estações segue uma distribuição uniforme, o que os autores consideram razoável para um serviço de alta frequência;
- o fator preponderante para a ocorrência de “*bunching*” é a variabilidade dos tempos de percurso dos ônibus em cada trecho, o que se opõe a parte da literatura disponível, que considera como fator principal os atrasos iniciais nas viagens;
- quando existe mais de um ônibus disponível para o embarque na estação, os passageiros aguardando o embarque dividem-se de acordo com a capacidade disponível dos ônibus.

Foram selecionados três indicadores principais para quantificar os efeitos da ultrapassagem e do DPB sob diferentes estratégias de controle:

- Tempo médio de percurso dos ônibus - TMP;
- Variabilidade do “*Headway*” - DPH - correspondente ao Desvio Padrão dos headways durante cada simulação;
- Tempo médio de Espera dos Passageiros - TEP.

Visando a comparação entre os resultados perante os cenários possíveis, foram selecionados dois cenários com suas opções:

- Aplicação de “*holdings*”:⁴⁸ NH - sem aplicação da intervenção; SH - aplicação da intervenção no regime de programação por Tabela Horária; HH - aplicação da intervenção no regime de “*headway*”.
- Aplicação de ultrapassagens: com ultrapassagens e sem ultrapassagens

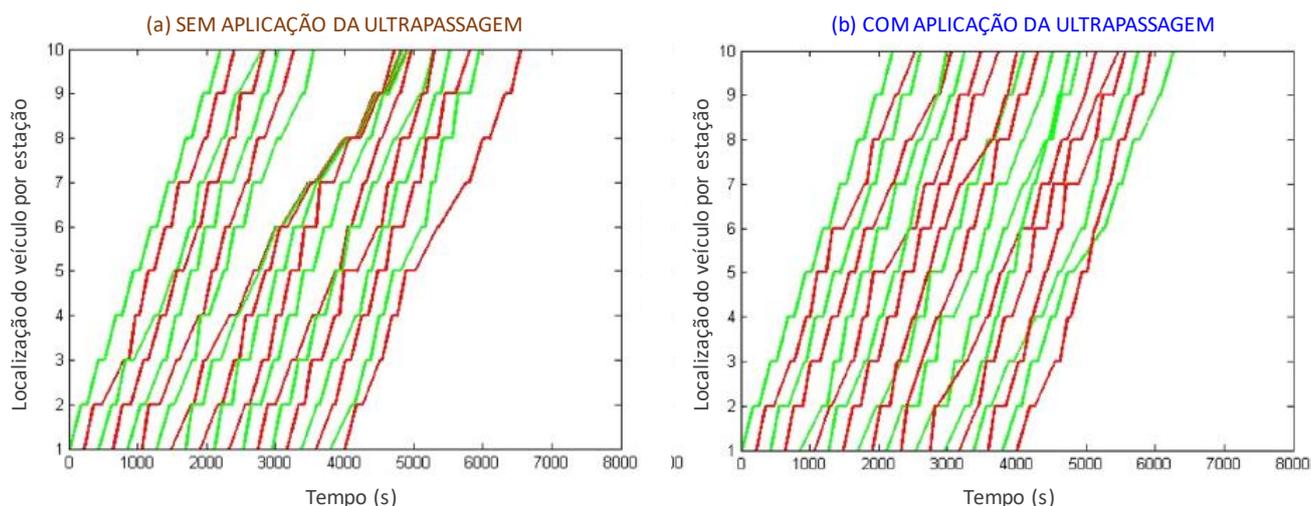
⁴⁸ No original em inglês “*Distributed Passenger Boarding – DPB*”

Para a validação do modelo desenvolvido, foram efetuados dois testes. O primeiro, um pequeno teste numérico (TNum) com o objetivo de aferir os efeitos relativos da ultrapassagem e do DPB.

Neste teste, foi desenvolvida uma linha simples de ônibus com 10 estações e com números arbitrados de passageiros embarcando e desembarcando em para estação. O intervalo mínimo de segurança adotado foi de 0,3 min e a taxa de embarque foi de 15 passageiros/min que corresponde a 4 s/passageiro. O “*headway*” de partida foi $H=3,5$ min e Capacidade do ônibus foi $C = 50$ passageiros/veículo.

Entre vários resultados, o mais significativo para o tema deste item foi a efetividade da aplicação da ultrapassagem. Entre eles, o exemplo mais claramente visível foi no caso de aplicação de ultrapassagem numa simulação em que aplicou-se,

Gráfico 22 - Aplicação de “*Holding*” mais Ultrapassagens - Gráficos Tempo-distância



simultaneamente o “*holding*” em casos de programação por tabela horária, mostrado no Gráfico 22.

FONTE: (WU; LIU; JIN, 2017)

Os gráficos refletem com bastante clareza os ganhos em regularidade com a aplicação do “*holding*” desde que conjugado com a possibilidade de ultrapassagem: o distúrbio verificado na sexta e sétima partidas no gráfico (a) são atenuados significativamente no gráfico (b) com a aplicação da ultrapassagem.

A Tabela 26 apresenta várias medidas de desempenho para os cenários de teste. A probabilidade de ocorrência do “*bunching*” é outro reflexo da variabilidade do *headway*. De acordo com o TCRP’s Transit Capacity e Quality of Service Manual, a parcela de ônibus agrupados pode ser definida como a porcentagem de *headways*

que são mais curtos ou mais longos do que a metade dos planejados (Relatório TCRP 100, 2003) apud (WU; LIU; JIN, 2017) . Dado que o HH convencional (mostrado como HH1 na Tabela 26), produz alguns headways longos que se propagam aos ônibus subsequentes, dois cenários adicionais são testados para o esquema HH: (i) HH2, em que o Fator de “Headway” Mínimo $\beta = 0.7$, enquanto o Tempo Máximo de “ *Holding* ” $g_{\max} = \infty$; (ii) HH3 em que $\beta = 0,7$ e $g_{\max} = 1,5$ min. Deste modo, em vez de aplicar as ações de controle sugeridas por HH1, os dois cenários adicionais aplicam apenas frações deles.

Tabela 26 - Aplicação de “Holding” mais Ultrapassagens - Resultados Testes

CENÁRIO		HEADWAY (min)		TEMPO ESPERA (min)		TEMPO PERCURSO (min)		PROBABILID. "BUNCHING" (%)
Holding	Ultrapass.	Média	DPH	Média	Dpadrão	Média	Dpadrão	
NH	Sim	2,81	0,39	2,46	0,19	32,40	1,14	50,2
	Não	4,52	0,78	2,65	0,30	39,80	3,01	68,1
SH	Sim	2,84	0,37	2,41	0,17	34,10	1,16	48,3
	Não	4,32	0,75	2,56	0,26	40,00	2,89	64,0
HH1	Sim	1,64	0,32	2,08	0,10	44,80	2,42	14,1
	Não	2,39	0,57	2,44	0,18	51,00	4,19	16,3
HH2	Sim	2,00	0,32	2,03	0,14	37,30	1,63	17,1
	Não	2,91	0,58	2,43	0,19	44,60	3,65	17,8
HH3	Sim	2,21	0,34	2,09	0,17	35,80	1,23	28,0
	Não	3,48	0,75	2,59	0,24	41,80	2,73	36,9

FONTES: (WU; LIU; JIN, 2017)

A leitura dos resultados deve levar em conta que eles abarcam 3 intervenções. Entende-se que o único cenário que não contempla o “*holding*” é o NH, por isto é o que melhor retrata a participação da ultrapassagem, ainda que em conjunto com o DPB.

No tocante ao “*headway*”, no cenário NH, a ultrapassagem corresponde a uma redução de 37,8%, a maior em todos os outros cenários, embora todas as reduções com a aplicação da ultrapassagem sejam superiores à não aplicação em taxas acima de 30%.

No tempo de espera dos passageiros, no cenário NH mostra redução 7,2% superior à não aplicação. Neste quesito, os demais cenários mostram que a aplicação mostra-se mais eficaz em todos eles, porém com variação dos percentuais.

No quesito Tempo de Percurso dos Ônibus, o cenário NH representa a maior diferença a favor da aplicação da ultrapassagem (18,6%) enquanto nos demais cenários essa diferença oscila entre 12,2% e 16,4%.

Também no quesito variabilidade, os resultados da aplicação da ultrapassagem resultam em desvios padrão permanentemente menores que aqueles apurados sem a aplicação.

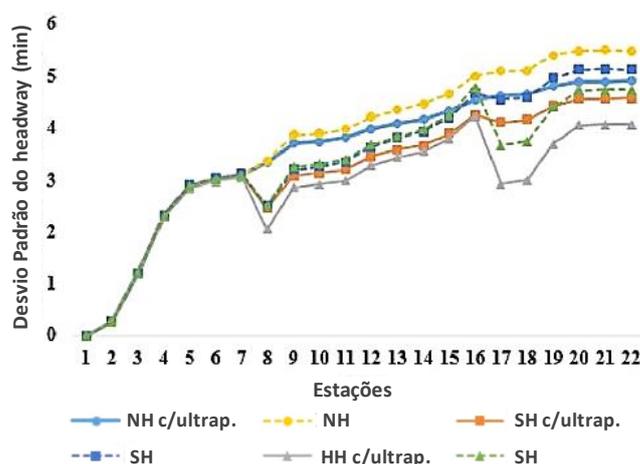
Uma outra observação, feita pelos autores, é que, em comparação com o caso de não-retenção, o controle de “*holding*” melhora a regularidade do “*headway*” e reduz o tempo de espera do passageiro à custa do tempo de viagem mais longo. Parece natural que esta última “compensação” ocorra, na medida em que as paradas para o “*holding*” tendem a penalizar os tempos de percurso.

O segundo, um teste empírico (TReal) com o objetivo de analisar as tendências das medidas principais ao longo da linha estudada. Este experimento foi efetuado com base nos dados da Linha 256 na cidade Guangzhou, China, um serviço que circunda a cidade com extensão próxima de 26 km, 23 estações e demanda de cerca de 25 mil passageiros por dia. Todos os ônibus na linha têm capacidade de 100 passageiros / veículo. Os dados dos fluxos de passageiros embarcados foram fornecidos pela empresa operadora. Foram empregados dados da hora de pico da manhã (09h00 às 10h00) em dos sentidos da linha. O “*headway*” programado para esse período era de 7 minutos.

Wu; Liu e Jin (2017) estabeleceram as paradas 8 e 17 como pontos de controle. Foram considerados três cenários, NH, SH e HH, cada um deles com as opções de permissão ou não de ultrapassagem.

Como esperado, os resultados mostraram que a queda de confiabilidade propaga-se à medida que os veículos se afastam do terminal de partida, como pode ser visto no Gráfico 23. No entanto, a variabilidade do “*headway*” e o Tempo Médio de Espera diminuem consideravelmente logo após os pontos de controle onde os “*holdings*” são aplicados.

Gráfico 23 - Aplicação de “Holding” mais Ultrapassagens - Resultados ao longo linha



FONTE: (WU; LIU; JIN, 2017)

À parte a análise da perda de confiabilidade ao longo da linha que, de resto já havia sido constatada em outros trabalhos aqui reunidos, os resultados para o teste com dados reais guardam bastante semelhança com os alcançados no teste numérico.

Os autores concluem que os resultados obtidos no conjunto sugerem que os métodos de controle podem melhorar a confiabilidade do serviço e reduzir o tempo

de viagem em veículos na presença de ultrapassagem e DPB, e tais recursos poderiam melhorar o desempenho em maior grau quando a linha é mais longa, particularmente para a política de não aplicação de “*holding*”.

Alejandra Valencia e Rodrigo Fernandez (VALENCIA; FERNANDEZ, 2012)

Embora com título voltado a método de medição de velocidades em corredores de ônibus, o estudo desenvolvido com base numa simulação macroscópico, tratou de algumas variáveis que afetam essas velocidades: espaços de parada nas estações, número de berços, tempos semafóricos e facilidades para ultrapassagens nas estações.

A modelagem foi aplicada com dados levantados para o pico da manhã ao longo da Avenida Vicuña Mackenna em Santiago, Chile, uma via arterial com elevado volume de ônibus e com as seguintes características operacionais: 7,33 km de extensão, 21 interseções, 23 estações, volume de cerca de 150 ônibus/hora, 1.900 passageiros/h-km, média de ocupação de 65 passageiros/ônibus.

No estudo das principais variáveis o trabalho simulou três condições e verificou a variação dos indicadores em relação a cada uma das condições. Para o espaço de parada nas estações e para as ultrapassagens foram testados três cenários de fluxo de ônibus: 50, 100 e 200 ônibus/hora. Para os tempos de sinal foram testados três cenários de tempos de ciclo semafóricos: 60, 90 e 120 segundos.

Para a variável “Ultrapassagens nas Estações” foram selecionados três indicadores: Total de Atrasos nas Estação, Velocidade Comercial e Tempo de Percurso. Os resultados são mostrados na Tabela 27.

Tabela 27 - Ultrapassagens - Comparat. “sem” x “com” ultras. por volume ônibus

CENÁRIOS Fluxo de Ônibus (ônibus/h)	ATRASOS TOTAIS NAS PARADAS (s/ônibus)		VELOCIDADE COMERC. (km/h)		TEMPO PERCURSO (min/km)	
	Sem Ultrap.	Com Ultrap.	Sem Ultrap.	Com Ultrap.	Sem Ultrap.	Com Ultrap.
50	732,6	634,2	18,0	19,3	3,3	3,1
100	420,8	368,3	22,3	23,3	2,7	2,6
200	381,0	352,8	21,8	22,3	2,8	2,7

FONTES: (VALENCIA; FERNANDEZ, 2012)

Em todos os indicadores e cenários houve ganhos com a possibilidade de ultrapassagem nas estações. Nos três indicadores, os ganhos reduzem-se com o aumento do fluxo de ônibus, o que parece lógico e esperável. As variações percentuais em cada indicador foram as seguintes:

- Atrasos nas paradas : reduções de 13,4% a 7,4%;
- Velocidades Comerciais: aumentos de 7,2% a 2,3%;
- Tempo de Percurso: reduções de 6,9% a 2,2%.

Entende-se, salvo melhor juízo, ser natural que os maiores ganhos tenham sido nos atrasos nas paradas, visto que o peso das ultrapassagens é maior nos atrasos, uma vez que os outros dois indicadores referem-se a toda a extensão do corredor analisado.

2.5.3. Bilhetagem Desembarcada

Este item trata do impacto sobre o desempenho de um serviço de ônibus exercido por um sistema de bilhetagem desembarcada, que as operações de compra, pagamento e validação do direito de viagem são feitas antes do embarque do passageiro no veículo.

Pode-se afirmar que o advento dos ferramentais de ITS, como já foi visto ao longo deste documento, revolucionou diversos campos de estudo no âmbito dos serviços de ônibus urbanos. Um deles é a arrecadação eletrônica de direitos de viagem que, mais simplificadamente, pode ser, e efetivamente é, denominada como “bilhetagem”. Fundem-se aqui as tecnologias desenvolvidas associadas ao transporte público com aquelas associadas aos meios de pagamento: de um lado facilitando e ampliando os modos do cidadão efetuar seus pagamentos e, de outro, modificando as relações entre gestores e prestadores de serviços e seus clientes, os usuários. A aquisição dos direitos de viagem, antes feitas em espécie no interior dos veículos, atualmente encontram opções mais fáceis e numerosas. Mais que isto: esse mercado parece,

pelo menos até aqui, dinâmico: em intervalos relativamente curtos, novas modalidades são oferecidas ao público. Podendo ser consideradas efeitos marginais dessa evolução, estas tecnologias acabam por afetar, positivamente, a operação dos sistemas. A questão que aqui se coloca, é qual a participação que elas desempenham na melhoria dos níveis de serviço dos sistemas de transporte público. Os tempos de parada nos pontos constituem-se num dos condicionantes que levam os ônibus a apresentarem velocidades de percurso inferiores às dos automóveis. Chen et al (2013) enfatizam sua importância: “*Atrasos nos pontos de ônibus afetam seriamente a eficiência da operação de ônibus e a melhoria dos níveis de serviço de transporte público e influenciaram muito as escolhas dos serviços de ônibus pelos passageiros*”.

São numerosos os estudos tratando do assunto. Em 1982 foi concluído um levantamento de dados sobre o tema em diversas cidades dos Estados Unidos que ensejou uma análise bastante ampla. O trabalho foi objeto, em seguida, de artigo de Levinson (1983) que resume diversos padrões vigentes no país à época, culminando com uma equação linear para determinação do tempo total de parada de um ônibus numa estação, incluindo tempo de abertura e fechamento de portas:

$$T = an + b$$

onde:

T = Tempo total de parada de um ônibus em uma estação

a = tempo de movimentação de embarque ou desembarque por passageiro

n = número de passageiros nas operações de embarque e desembarque

b = tempo de abertura e fechamento de portas

Em artigo que desenvolveram sobre modelo para o cálculo dos atrasos em estações, Li, Duang e Yang (2012) citam a existência anterior de modelos lineares semelhantes ao de Levinson (1983), como os de Guenther e Sinha (1983)⁴⁹ e Lin e Wilson (1992)⁵⁰.

Uma quantidade não desprezível de trabalhos analisando os diversos fatores que afetam os tempos de parada nas estações é de autoria de Alejandro Tirachini.

⁴⁹ GUENTHNER, R.P.; SINHA, K.C. Modeling bus delays due to passenger boardings and alightings, Transportation Research Record, 1983, 915: 7-13.

⁵⁰ T. Lin, N.H. Wilson, Dwell time relationships for light rail systems, Transportation Research Record, 1992, 1361: 287-295.

Deste autor, são encontrados diversos trabalhos relativos ao tema tais como (TIRACHINI, 2013a), (SUN et al., 2014), (SÁEZ et al., 2012).

Entre os estudos sobre o tema, destacam-se os de Alejandro Tirachini, em particular (TIRACHINI, 2013a) que fez um apanhado de diversas experiências anteriores em

Tabela 28 - Tempos de Embarque e Desembarque - Dados de Estudos anteriores

AUTORES	LOCAL	VEÍCULOS/PORTAS	BILHETAGEM	ABERTURA + FECHAM. PORTAS (s)	DESEMBARQUE (s)	EMBARQUE (s)
Aashtiani and Iravani (2002)	Teerã	Ônibus - 2 ou 3 ptas.	-	12,00	0,99 - 1,04	1,64 - 2,00
Dueker et al. (2004)	Portland - EUA	Ônibus	-	5,14	1,70	3,48
Fernández et al (2009)	Santiago - Chile	Ônibus e Metrô 2, 3 ou 4 portas	Cartão sem contato estação	Metrô: 3,24 Ônibus: 8,04 - 9,32	Metrô: 0,70 Ônibus: 1,39 - 3,32	Metrô: 1,13 Ônibus: 2,05 - 6,04
Guenthner and Hamat (1988)	Michigan - USA	Ônibus 1 porta	Dinheiro, bilhetes e passes	2,25	1,81	5,66
TRB (2000)	USA	Ônibus 1 a 6 portas	Dinheiro e cartões pré-pagos	-	0,4 - 2,0	0,5 - 3,0
Li et al. (2006)	Broward, FL - USA	Ônibus 2 portas	Dinheiro e cartões pré-pagos	-	4,47 - 4,90	4,59
Lin and Wilson (1992)	Massachussets - USA	VLT - Um e dois carros/composição	Desembarcada	1 carro: 8,10 - 12,50 2 carros: 9,69 - 15,69	1 carro: 0,55 - 1,15 2 carros: 0,27 - 0,42	2 carro: 0,23 - 1,41 2 carros: 0,36 - 0,66
Rajbhandari et al (2003)	N. Jersey - USA	Ônibus	Dados de APC	1,32 - 5,99	1,93 - 4,63	4,65 - 6,91
York (1993)	Londres e Exeter - UK	Ônibus - 1 e 2 portas (piso baixo com degraus na entrada)	Dinheiro e cartões pré-pagos	2,38 - 8,26	0,99 - 2,94	1,84 - 8,87

diferentes locais no mundo. A resenha dessa coleta é mostrada na Tabela 28.

FONTE: (TIRACHINI, 2013a)⁵¹

São notáveis as variações nas quantidades de portas por veículo, assim como das modalidades de pagamento e bilhetagem. Os resultados refletem essa diversidade: os tempos de abertura e fechamento de portas varia de 3,24 s a 15,69 s; os tempos de desembarque variam entre 0,4 s e 4,90 s; os tempos de embarque variam entre 0,23 s e 8,87 s.

Outro estudo do mesmo autor (TIRACHINI, 2013b) analisa mais especificamente a influência do modo de arrecadação nos tempos de viagem. Utilizando estimativas

⁵¹ Trabalhos citados na fonte:

- Aashtiani, H. and Iravani, H., 2002. Application of dwell time functions in transit assignment model. *Transportation Research Record*, 1817, 88–92.
- Dueker, K.J., Kimpel, T.J., and Strathman, J.G., 2004. Determinants of bus dwell time. *Journal of Public Transportation*, 7 (1), 21–39.
- Fernández, R., del Campo, M., and Swett, C., 2009. Data collection and calibration of passengerservice time models for the Transantiago system. *European Transport Conference*, The Netherlands, 6–8 October.
- Guenthner, R.P. and Hamat, K., 1988. Transit dwell time under complex fare structure. *Journal of Transportation Engineering*, 114 (3), 367–379.
- TRB, 2000. *Highway capacity manual*. Washington, DC: National Research Council.
- Li, M.-T., et al., 2006. Simulation model for estimating bus dwell time by simultaneously considering numbers of disembarking and boarding passengers. *Transportation Research Record*, 1971, 59–65.
- Lin, T. and Wilson, N.H.M., 1992. Dwell time relationships for light rail systems. *Transportation Research Record*, 1361, 287–295.
- Rajbhandari, R., Chien, S., and Daniel, J., 2003. Estimation of bus dwell times with automatic passenger counter information. *Transportation Research Record*, 1841, 120–127.
- York, I.O., 1993. Factors affecting bus-stop times. *Transport Research Laboratory*, Project Report 2, Crowthorne.

dos tempos de embarque de passageiros com métodos alternativos de pagamento (dinheiro, tarja magnética, cartão sem contato e pagamento externo), foram calculados os benefícios da implantação das tecnologias de bilhetagem como a velocidade operacional, a economia nas demandas por tamanho da frota, combustível e mão de obra, custo, tempo de viagem para os usuários e poluição do ar.

As pesquisas de tempo de percurso foram realizadas manualmente, coletadas nos dias de semana de novembro de 2007 a março de 2009 em área suburbana de Sydney. Austrália. É uma área residencial de baixa densidade, a aproximadamente 25 km do centro da cidade, com uma demanda relativamente baixa de transporte público (2,1 pax / ônibus -km em média) e velocidade de operação de ônibus de 25,9 km / h em média. Tem-se aqui um serviço tipicamente suburbano, com linhas de longa distância e baixa densidade de passageiros, fato que deve ser elevado na devida conta em qualquer tipo de comparação com cidades brasileiras.

As pesquisas de tempo de viagem foram coletadas manualmente por um único observador a bordo dos ônibus, em viagens de ida ou ida e volta. Todos os ônibus têm 12 m de comprimento, com duas portas: embarques na porta da frente e desembarque na porta traseira.

Para as comparações de tempos entre as diversas modalidades de embarque, o autor separou o tempo de pagamento do tempo de validação, uma vez que também a validação pode ser embarcada ou desembarcada.

Foram consideradas as seguintes modalidades de pagamento e de validação:

- (S1) Cobrança de tarifa a bordo, pagamento em dinheiro ao motorista.
- (S2) Cobrança de tarifa desembarcada e verificação de tarifa a bordo usando bilhete com faixa magnética. O bilhete deve ser inserido em um leitor dentro de ônibus. Assumida a existência de dois leitores de cartões são assumidos na porta da frente.
- (S3) Cobrança de tarifa desembarcada e verificação de tarifa a bordo usando um cartão sem contato. Dois leitores de cartões sem contato são assumidos na porta da frente.
- (S4) Cobrança de tarifa e verificação de tarifa desembarcadas. O embarque é possível apenas por uma porta.
- (S5) O mesmo que (S4), mas o embarque é possível através de duas portas.
- (S6) O mesmo que (S4), mas o embarque é possível através de três portas.

Nos casos (S1) - (S5) assumiu-se que os ônibus possuem duas portas, e nos casos (S1) - (S4) o embarque é realizado somente pela porta da frente enquanto a saída é permitida somente na porta traseira. No caso (S5) o embarque e desembarque são permitidos tanto na frente quanto na traseira, de forma seqüencial, enquanto os ônibus no caso (S6) possuem três portas e o embarque e desembarque são novamente realizados através de todas as portas.

Os resultados do que o autor chamou de Tempo de Serviço por Passageiro - PST na sigla em inglês⁵² são mostrados na Tabela 29 e são referidos aos tipos de pagamento e validação (S1) a (S6) acima indicados.

Tabela 29 - Tipos Bilhetagem e Validação - Tempos Embarque e Desembarque

OPÇÕES DE BILHETAGEM					
Refer.	Modalidade	Pagamento	Validação	Portas	PST (s/passag.)
(S1)	Dinheiro	Emb	Emb	Frontal Emb Traseira Des	11,06
(S2)	Bilh. Tarja Magnética	Desemb	Emb	Frontal Emb Traseira Des	3,78
(S3)	Cartão Sem Contato	Desemb	Desemb	Frontal Emb Traseira Des	2,93
(S4)	Cartão Sem Contato	Desemb	Desemb	Frontal Emb Traseira Des	2,35
(S5)	Cartão Sem Contato	Desemb	Desemb	2 Emb/Des Sequencial	1,74
(S6)	Cartão Sem Contato	Desemb	Desemb	3 Emb/Des Sequencial	1,32

FONTE: (TIRACHINI, 2013b)

Deve ser observado que o PST deve ser lido com cautela: como ele representa a soma dos tempos de embarque e desembarque, seus valores somente representam efetivamente o tempos totais reais nos casos (S5) e (S6) em que o embarque sucede o desembarque.

Tirachini (TIRACHINI, 2013b), no entanto, antecipa resultado de um trabalho posterior ao aqui relatado que ainda não havia sido publicado, em que separa os tempos de embarque e desembarque e ainda faz a distinção, no pagamento em dinheiro, entre a necessidade ou não de troco, com todos os resultados obtidos com ônibus de piso baixo. O resultado é mostrado na Tabela 30.

⁵² No original em inglês "Passenger Service Time – PST"

Tabela 30 - Tempos Embarque e Desembarque - Resultados por tipo de pagamento

SENTIDO	OPÇÕES			
	Modalidade	Pagto.	Validação	Tempo (s/passag.)
Emb.	Dinheiro exato	Emb	Embarcada	5,66
Emb.	Dinheiro com troco	Emb	Embarcada	12,73
Emb.	Bilh. Tarja Magnética ⁽¹⁾	Desemb.	Embarcada Validador Dir.	4,61
Emb.	Bilh. Tarja Magnética ⁽¹⁾	Desemb.	Embarcada Validador Esq.	5,56
Emb.	Livre ⁽²⁾	Sem pagto.	Livre	1,46
Desemb. Porta Dianteira	-	-	-	1,86
Desemb. Porta Traseira	-	-	-	1,22

OBSERVAÇÕES

(1) O autor considerou a existência de dois validadores embarcados, um do lado direito da entrada e outro do lado esquerdo, tendo obtido tempos diferentes para cada validador

(2) Na falta de sistema de bilhetagem inteiramente desembarcad em Sydney, o autor considerou dados de uma linha livre, isto é, sem pagamentos, cujo efeito, em termos de tempos de embarque é o mesmo do que a bilhetagem completamente desembarcada.

FONTE: (TIRACHINI, 2013b)

Nos dois casos (Tabelas 27 e 28) as diferenças entre o pagamento embarcado com dinheiro e os sistemas que contam com pagamento desembarcado que, chegam a 88% de redução nos PST e 74 % nos tempos de embarque. Também é notável, na Tabela 28, a diferença de tempos entre os pagamentos em dinheiro exatos e com devolução de troco. Deve ser lembrado, entretanto, que as diferenças em relação ao pagamento em dinheiro devem levar em conta que a cobrança, neste estudo, considera o pagamento para o motorista o que, muito provavelmente aumenta o tempo de embarque em relação à situação de pagamento feito ao cobrador, como acontece na maioria das cidades brasileiras.

A variação entre a bilhetagem inteiramente desembarcada e somente o pagamento desembarcado e a validação embarcada também merece destaque: no primeiro caso o PST reduz-se em 26% e o tempo de embarque em mais de 60%. As diferenças são elevadas, mas cabe destacar que a validação desembarcada exige investimentos na implantação de estações fechadas como são as dos BRT. Em casos de corredores com paradas de diversas linhas que podem ter tarifas diferenciadas, a validação desembarcada não é possível.

2.6. CONCLUSÕES PARCIAIS

A gama de intervenções operacionais analisadas é bastante extensa e, certamente, permitiu o conhecimento básico de cada estratégia.

A pesquisa de referências bibliográficas mostrou variações significativas nas quantidades de trabalhos em função dos temas. Ao mesmo tempo em que existe abundância de estudos com relação às Paradas para Regulação (“holding”), são escassos os trabalhos relativos ao Controle de Velocidade durante a marcha, como também para o Controle a partir dos Motoristas.

Entende-se ter sido oportuna a inclusão dos itens que aqui foram classificados como “Facilidades de Infraestrutura”, medidas que fazem parte da infraestrutura dos serviços, mas que também contribuem para a melhoria do desempenho operacional dos sistemas, incluindo sua regularidade. Além disto, alguns desses itens são requisitos para a aplicação de intervenções operacionais como, por exemplo, as faixas de ultrapassagem em corredores são requisitos para a aplicação de Meias Viagens e Paradas Limitadas.

Vale repetir que o ferramental de ITS tornou-se protagonista neste cenário, visto que praticamente todas as intervenções são beneficiadas pelo emprego dessas tecnologias e que parte delas não pode ser aplicada sem o uso desse ferramental.

Seria interessante fazer um cotejo entre os resultados das intervenções resenhadas. Essa tarefa parece bastante complicada. São inúmeros os fatores que interpõem obstáculos para as comparações, podendo ser destacados: a variedade de métodos empregados pelos trabalhos assim como dos experimentos efetuados; a diversidade das realidades nas quais os testes foram aplicados; as numerosas combinações entre mais de uma intervenção no mesmo experimento.

Embora sem o devido rigor científico e apenas computando as reduções observadas nos tempos de viagem, pode-se afirmar que as intervenções de Paradas Limitadas e têm indicações de resultados entre 1 a 10%. A Meia Viagem tem redução de tempos de viagem entre 6,9% a 10%, mesma faixa do Controle de Velocidade. A Preferência Semafórica colcoa-se em patamar mais elevado, com reduções de 2% até 41%. São, entretanto, as facilidades de infraestrutura que apresentam as reduções mais altas e robustas: a Segregação de Vias varia entre 2% e 41,4% e as faixas de ultrapassagem variam entre 4% e 44%.

As intervenções que já são praticadas ou, no mínimo, cogitadas de implantação em nossas cidades são as Meias Viagens, já empregadas, ainda que de modo empírico e esporádico, em alguns sistemas de ônibus; e a Linha Expressa, que surge como uma variante para redução de tempos de viagens em extremidades de linhas

pendulares na periferia. Esta última modalidade foi cogitada no estudo da nova Rede de Ônibus da cidade de São Paulo.

3. METODOLOGIA

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Revisão Bibliográfica desempenhou papel relevante e extenso neste documento, na medida em que procedeu uma resenha das principais intervenções operacionais buscando alcançar e manter a regularidade e eficiência nos serviços de ônibus. Por isto, a tarefa transcendeu a característica de meramente situar o tema tratado na dissertação, procurando conhecer seu funcionamento e entender seus resultados. Em tal resenha, trabalhou-se em duas frentes: a primeira delas a caracterização de cada intervenção, a identificação de suas vantagens assim como de suas limitações e os resultados obtidos nos trabalhos acadêmicos. A segunda foi confrontar, sempre que possível, os métodos desenvolvidos pelos autores e as características principais dos experimentos efetuados, de maneira a identificar as diferenças entre eles, de modo a ampliar o conhecimento “na horizontal”, isto é, como vem sendo tratada cada uma das intervenções.

Na presente etapa, entendeu-se ser importante trabalhar com a aplicação simulada de uma ou mais intervenções no sistema de ônibus de uma cidade brasileira. Foram diversos processos de seleção que serão detalhados mais à frente neste documento e que podem ser resumidos em: seleção da cidade, seleção da intervenção, seleção do sistema e do trecho a ser simulado, assim como do software a ser empregado.

Procedidas as simulações, a fase seguinte (Capítulo 4) foi a de análise dos dados obtidos, de maneira a chegar-se a um cotejo com a situação atual buscando uma comparação de resultados para cada estratégia empregada, verificando, sempre que possível testes de sensibilidade da intervenção frente a possíveis variações nos parâmetros que a cercam.

3.2. O PROCESSO DE DETERMINAÇÃO DO OBJETO DA SIMULAÇÃO

A simulação pretendeu testar os impactos de um ou mais tipos de intervenção buscando, de um lado, verificar os resultados operacionais e de outro, testar a sensibilidade da intervenção às variáveis que possam afetar tais resultados.

As escolhas do objeto foram feitas sequencialmente conforme descrito a seguir.

3.2.1. Escolha da cidade

A escolha da cidade em que o serviço selecionado se insere foi pautada por quatro fatores principais:

- a cidade deveria ser um grande centro urbano, de maneira a representar essa dimensão, com todos os aspectos positivos e negativos que encerra tais como demandas elevadas por viagens, importância relativa do sistema de ônibus na mobilidade urbana e, particularmente, no Transporte Público;
- a cidade deveria dispor de sistemas de baixa a média capacidade, em que os resultados de uma possível intervenção possam ser mais nitidamente percebidos;
- a existência de dados reais do serviço a ser simulado, com o maior detalhamento possível;
- a proximidade física que permitisse levantamentos em campo programados ou surgidos ao longo do trabalho.

A escolha recaiu na cidade de São Paulo pelo atendimento a todos os fatores acima apontados.

Trata-se da maior concentração urbana brasileira, uma Região Metropolitana (RMSP) com 39 Municípios, abrigando população de cerca de 21,6 milhões de habitantes⁵³ numa área de 7,9 mil quilômetros quadrados⁵⁴. O maior de seus municípios e, não por acaso ou coincidência localizado na parte central da região, é o Município de São Paulo, capital do Estado, com área de 1,5 mil quilômetros quadrados abrigando população de cerca de 12,2 milhões de pessoas⁵⁵.

Na RMSP são realizadas diariamente 43,7 milhões de viagens, sendo parte deste número as 29,7 milhões de viagens motorizadas⁵⁶.

A RMSP conta com uma rede de metrô e trens que totaliza 367 km (93,6 km de Metrô e 273 km CPTM)⁵⁷. No decorrer do ano de 2017, em média por dia útil, o

⁵³ IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Tabelas e gráficos especiais – Estimativas 2018 – <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-detalle-de-midia.html?view=mediaibge&catid=2103&id=2278> – Acesso em 15-Set-2018

⁵⁴ EMPLASA – Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano – Região Metropolitana de S. Paulo – Disponível em <https://www.emplasa.sp.gov.br/RMSP> - Acesso em 10-Out-2018.

⁵⁵ IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Brasil em Síntese – São Paulo – Panorama – Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama> - acesso em 10-Out-2018

⁵⁶ Companhia do Metropolitano de São Paulo – Metrô – Pesquisa de Mobilidade 2012 – Síntese das Informações – Disponível em http://www.metro.sp.gov.br/metro/arquivos/Pesquisa_Afericao_2012_Sumario_de_Dados.pdf - Acesso em 10-Out-2018.

⁵⁷ Site MetrôCPTM – Disponível em <https://www.metrocptm.com.br/agora-ligada-aos-ramais-1-azul-e-2-verde-linha-5-lilas-vai-atrair-meio-milhao-de-pessoas-por-dia/>. Acesso em 10-Out-2018.

Metrô transportou 3,7 milhões de passageiros⁵⁸ e a CPTM 2,7 milhões de passageiros⁵⁹, perfazendo o total aproximado de 6,4 milhões de passageiros⁶⁰.

Mesmo não computando os sistemas de ônibus locais dos demais municípios e o sistema de ônibus urbanos metropolitanos, somente a rede da cidade de São Paulo transportou nos dias úteis em 2017, cerca de 9,5 milhões de passageiros distribuídos em 1.308 linhas, divididas em 830 linhas no Subsistema Estrutural e 508 linhas no Subsistema Local.

Gerido pela São Paulo Transportes S.A. - SPTrans, empresa Municipal, o sistema é operado por empresas e cooperativas privadas que detêm uma frota total de cerca de 14,6 mil ônibus⁶¹. Esse sistema conta com 286 km de corredores exclusivos e 500 km de faixas exclusivas.

Por contar com equipamentos e sistemas para controle operacional, a disponibilidade de dados é considerável, mesmo levando em conta que a SPTrans não chega a fazer uso intensivo desse instrumental.

Entende-se restar demonstrado tratar-se de um sistema de grande porte e que desempenha papel relevante no Transporte Público da cidade, podendo ser considerado como representativo das grandes cidades brasileiras.

3.2.2. Escolha do Serviço

O cardápio de serviços é extenso e diversificado num conjunto tão amplo como a rede municipal de ônibus de São Paulo. Nesse quadro, foram estabelecidos alguns critérios para a escolha do tipo de serviço.

- deveria ser um Corredor com infraestrutura a mais completa possível, de maneira a permitir a análise de intervenções atendendo aos requisitos para sua viabilização como via segregada, possibilidade de ultrapassagens ao longo do trecho, etc;

⁵⁸ Imprensa Oficial do Est. de São Paulo – Companhia do Metropolitano de São Paulo – Relatório da Administração 2017 – Disponível em <http://empresaspublicas.imprensaoficial.com.br/balancos/metro/metro2018.pdf> - Acesso em 15-Out-2018.

⁵⁹ Companhia Paulista de Trens Metropolitanos – CPTM – Relatório da Administração 2017. Disponível em <https://www.cptm.sp.gov.br/Content/Documentos/RA%202017%20-%20FINAL.pdf> – Acesso em 15-Out-2018

⁶⁰ Os números apresentados representam a soma dos passageiros transportados em cada linha, não correspondendo ao número de passageiros de entraram nos dois sistemas.

⁶¹ Site PMSP – Acesso à Informação – Indicadores do Sistema de Transporte – 2017 – Disponível em https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/institucional/sptrans/acesso_a_informacao/index.php?p=152415 – Acesso em 15-Out-2018. Média de passageiros por dia útil calculada a partir dos valores mensais apresentados no site.

- deveria ter demanda significativa, de maneira a trabalhar, nas simulações com valores de maior monta que, por sua vez, permitem a identificação de alterações e de testes de sensibilidade com relação a variáveis cuja alteração pode afetar de modo mais incisivo nos resultados.

Demandas elevadas estão associadas a menores “*headways*”. Observações de alguns artigos analisados apontam uma que as intervenções a serem testadas apresentam melhores resultados com “*headways*” mais curtos. Por exemplo, (FU; LIU; CALAMAI, 2003) apontam que “*a análise de sensibilidade do “headway” mostrou que os benefícios da limitação de paradas diminuem de forma mais ou menos uniforme à medida que os “headways” aumentam*”.

Definido que seria um Corredor com demandas elevadas, restava selecionar qual dos Corredores em operação na cidade atenderia aos critérios e necessidades. O objeto selecionado foi o Corredor Nove de Julho - Santo Amaro - Varginha - CSA, que liga o centro à região periférica ao sul da cidade, com extensão total de 14,8 km compreendendo 37 estações no sentido Bairro Centro e 29 estações no sentido Centro-Bairro (WAKAI; HORTELLANI, 2017), com plataformas independentes por sentido, embora em alguns trechos não apresente as características completas de corredor segregado. A região periférica atendida tem ocupação do solo predominantemente residencial de renda média e baixa. O corredor transporta em média nos dias úteis cerca de 366 mil passageiros (LARA; MARX, 2014). Trata-se de um dos três mais importantes corredores de ônibus na cidade.

3.2.3. Seleção do trecho e da linha a serem simulados

O Corredor selecionado (Nove de Julho - Santo Amaro) é equipamento urbano com características não homogêneas. Procurou-se selecionar um trecho em que o corredor seja completo, isto é, todos os requisitos anteriormente determinados estivessem presentes. Resultou um segmento de cerca de 4,7 km localizado numa área localizada no anel semi-periférico da cidade. Em seu formato original, o trecho abrangia 9 paradas em duplo sentido, mas há cerca de 2 anos uma estação foi desativada para dar lugar à obra de uma estação de monotrilho que está sendo construído transversalmente ao Corredor.

Assim, hoje abrange 8 paradas duplas por sentido. A disposição do trecho do corredor selecionado e de suas estações são mostrados na Figura 10.

Tabela 31 - Linha 6913-10 - Varginha - Terminal Bandeira - Características Frota

ATRIBUTOS	TIPO DE ÔNIBUS		
	Articulado	Bi-articulado	Super Articulado
Comprimento (m)	21	23	27
Capacidade Total Real de Passageiros (passageiros)	115	194	170
Número de Portas Lado DIREITO (unidades)			
- Entrada	1	1	1
- Saída	2	3	2
Número de Portas Lado ESQUERDO (unidades)			
- Entrada	1	1	1
- Saída	2	3	2
Participação na Frota em Operação - número de ônibus de cada tipo operando (unidades)	1	40	12
Caso haja mais de um tipo de ônibus, há uma ordem de partida inicial conforme o tipo? se sim, qual a ordem?	Determinada no despacho (terminal) conforme as demandas observadas		

FONTE: Viação Cidade Dutra - SP⁶²

Como a frota conta três tipos de ônibus articulados e o sistema VISSIM somente aceita um tipo de veículo por linha, a capacidade total de um veículo resultou de média das capacidades, ponderada pelas quantidades de cada tipo de veículo, resultando a capacidade de 185 passageiros/veículo.

3.2.4. Coleta de Dados

Foram obtidos dados reais com as entidades gestoras do transporte público e do trânsito, de empresas operadoras e mesmo de uma “startup”, quais sejam:

- Links (vias) e estações - obtidas através de imagens de satélite, com auxílio do Google Street View.
- Identificação, Itinerários, Frequência, Frota e Demandas de todas as linhas que percorrem o Corredor total ou parcialmente, incluindo matrizes de embarque e desembarque em cada estação para o período de Pico da Manhã do dia 07-Nov-2017, assim como as coordenadas das paradas (estações). Parte destes dados foram apurados em estudo acadêmico de Arbex e Cunha (2015). Os dados foram fornecidos pela São Paulo Transportes - SPTrans, órgão gestor da rede de ônibus da cidade.
- Detalhes técnicos dos tipos de veículos em operação na linha selecionada envolvendo: dimensões, número de portas de entrada e de saída por lado do

⁶² Troca de e-mails com Sr. Eugênio Carlos – Gerente de Operações da Viação Cidade Dutra – Dados fornecidos em 04-Mai-2018.

veículo, dimensões de cada porta e lotação efetiva- fornecidos pela Viação Cidade Dutra, empresa operadora da linha selecionada (ver Tabela 31 acima).

- Localização, grupos, tempos de ciclo e tempos de fase de todos os semáforos em funcionamento no Corredor - Dados fornecidos pela Companhia de Engenharia de Tráfego - CET-SP, órgão gestor do trânsito na cidade.
- Levantamento de todos os pontos ou trechos com possibilidade de ultrapassagem entre os ônibus operando no Corredor, feito pelo autor.
- Velocidades médias de percurso dos ônibus ao longo do trecho estudado relativas ao dia 07-Nov-2017, segmentado por trechos que apresentam condições físicas e de tráfego razoavelmente homogêneas ⁶³ - Dados fornecidos pela Scipopulis - startup que processa os dados operacionais da rede da SPTrans, extraindo velocidades médias diárias por período e por trecho.

3.2.5. **Seleção das Intervenções Operacionais a serem simuladas**

Embora todas com objetivos comuns, quais sejam, assegurar ou restaurar as condições de eficiência e regularidade dos sistemas de ônibus, as intervenções, apresentadas anteriormente neste documento, revestem-se de diferentes graus de complexidade técnica e ou operacional.

Como já foi visto, são pouco numerosas, senão inexistentes, as experiências de aplicação desses métodos em grandes cidades brasileiras, mesmo aquelas que contam com ferramental de ITS instalado e em funcionamento. Por isto, entendeu-se ser importante inicialmente o estabelecimento de requisitos que as intervenções selecionadas atendam, as saber:

- (i). deveriam ter naturezas próximas, de modo a permitir a análise de mais de uma modalidade no mesmo conjunto, o que permitiria comparações de efetividade;
- (ii). tendo em vista a pouca experiência prática de gestores e operadores e visando possíveis aplicações reais em futuro não tão distante, deveriam ser evitadas estratégias que demandassem recursos técnicos sofisticados e ou investimentos específicos em infraestrutura, que corresponderiam a prazos longos para sua implementação;

⁶³ Levantados pelo autor por meio de observação no campo.

(iii). seria desejável que fossem, na prática, medidas não percebidas negativamente pelos viajantes, dadas as condições por vezes precárias a que eles são submetidos em seus deslocamentos no transporte público;

(iv). deveriam ser preferidos métodos que, ainda de modo empírico, já tivessem sido aplicados anteriormente nos sistemas de ônibus locais ou que o sejam esporadicamente; tal característica converge com a premissa anterior (ii): se elas vêm sendo aplicadas, é sinal de que não devem ter encontrado maiores resistências pelo público;

(v). seria desejável que a implantação prática da intervenção não demandasse alta capacitação técnica das equipes operacionais assim como equipamentos e sistemas de ITS ainda não disponíveis nas cidades brasileiras.

Definidos os requisitos, eles foram associados a cada tipo de intervenção, registrando-se se o requisito é atendido (P) ou não (N). Os resultados são mostrados

Tabela 32 - Seleção de Intervenções - Critérios e Premissas

na Tabela 32.

FONTE: Autor

INTERVENÇÃO OPERACIONAL	PREMISSAS				
	(i) Afinidades de Natureza	(ii) Sem Investims. Infraestrutura	(iii) Percepção Usuários	(iv) Aplicação anterior	(v) Sem Capacit. Equipes Equipams.
Paradas para Regulação - "holdings"	N	P	N	N	N
Limitação de Parada - "skip-stop"	P	P	N	N	P
Meias Viagens - "deadheadings"	P	P	N	P	P
Linhas Expressas	P	P	P	P	P
Inserção ônibus	N	P	P	P	P
Controle Velocidade	P	P	P	N	N
Prioridade Semafórica - TSP	N	N	P	N	N
Bilhetagem desembarcada	N	N	P	N	N

Verifica-se que o tipo de intervenção que melhor atende aos requisitos formulados é o que compreende as Linhas Expressas. Tal intervenção apresenta características operacionais muito próximas das intervenções "Meias Viagens" e "Skip-Stop". Há que se considerar que, ainda de modo informal e empírico, há informações, não confirmadas, de que as "Meias Viagens", já vêm sendo praticadas por operadoras esporádica e empiricamente. Além disto, são aquelas que parecem ser menos

visíveis pelos usuários, dado que os ônibus, no sentido em que o serviço não é prestado, não necessitam exibir as informações de destino da viagem na parte externa do veículo.

É exatamente este aspecto que leva Eberlein (1995) a considerar que a Meia Viagem não é uma variação exata da Parada Limitada. Adicionalmente, foi verificado que, no estudo da regionalização da Rede de ônibus da SPTrans, projeto elaborado no período 2015-2016, estariam sendo consideradas “Viagens Expressas” como opção para o alívio de linhas muito carregadas nos períodos de pico.

Por último, deve ser lembrado que a Meia Viagem e as Paradas Limitadas (“*skip-stop*”) têm como objetivos: reduções nos tempos de viagem, proporcionando aumento do número de partidas sem aumento da frota, podendo, ainda, contribuir para o restabelecimento da regularidade. Tais intervenções podem favorecer tanto os usuários pela redução de seus tempos de espera e de percurso, quanto os operadores, que podem produzir o mesmo serviço com uma frota menor.

Já a Linha Expressa, que tem a mesma natureza das outras duas em termos de aplicação (deixar de cumprir serviço em partes da linha), tem objetivos diversos: pode reduzir os tempos de viagens de parcela significativa de usuários de linhas longas, com demandas altas e pendulares. Indiretamente, contribui para aumentar a oferta, propiciando mais partidas com a mesma frota, embora em menores volumes que a Meias Viagem e os “*Skip-stops*”.

Por tudo isto, foi adotado que a simulação partisse da “Meia Viagem”, migrando, em seguida para o “*Skip-stop*” e para a “Viagem Expressa”, procurando medir a efetividade de tais medidas na melhoria da regularidade dos serviços.

3.2.6. Seleção do Sistema de Simulação

O exame prévio dos tipos de sistema disponíveis no mercado deixou claro que um software de macromodelos não atenderia os objetivos da simulação, visto que, numa visão mais geral, os sistemas com essas características tratam com massas mais abrangentes e menos detalhadas de simulação. O atributo que, talvez, melhor explique essa inadequação, é a constatação de que esses sistemas identificam apenas o conjunto de um “serviço completo” de ônibus, não tendo capacidade de identificar o desempenho individual dos veículos (horários de partida e chegada, intervalos entre veículos, tempos de retardamento por veículo, tempos de percurso por veículo, etc. Deste modo, optou-se pela aplicação do software de

microsimulação VISSIM, comercializado pelo PVT Group e disponível na USP em sua versão 10.00-10.

3.3. METODOLOGIA EMPREGADA NAS SIMULAÇÕES

3.3.1. **Objetivos**

Como já foi visto ao longo deste documento, as simulações têm como objetivos principais avaliar os benefícios operacionais imediatos decorrentes das intervenções e medir a sensibilidade desses resultados em função de variações na intensidade da aplicação.

Dadas as limitações encontradas no software para integrar as sub-linhas, isto é, um circuito completo da linha é composto pela simulação de duas sub-linhas. Por isto, a meta inicial em termos de resultados foi verificar de que maneira a aplicação das intervenções (com exceção da Linha Expressa) na sub-linha com menor demanda gera aumento de oferta no sentido de maior demanda.

Quanto à sensibilidade, a comparação foi feita em termos das variações nos tempos totais de viagem em relação à Linha L10, que é a linha com as características da operação real (Linha 9613-10)

No caso da Linha Expressa, o objetivo foi medir os ganhos totais dos passageiros transportados no sentido de maior demanda, com apuração de resultados em termos de passageiros x hora. Neste caso, também foi apurado o incremento de oferta na linha com a redução dos tempos de viagem.

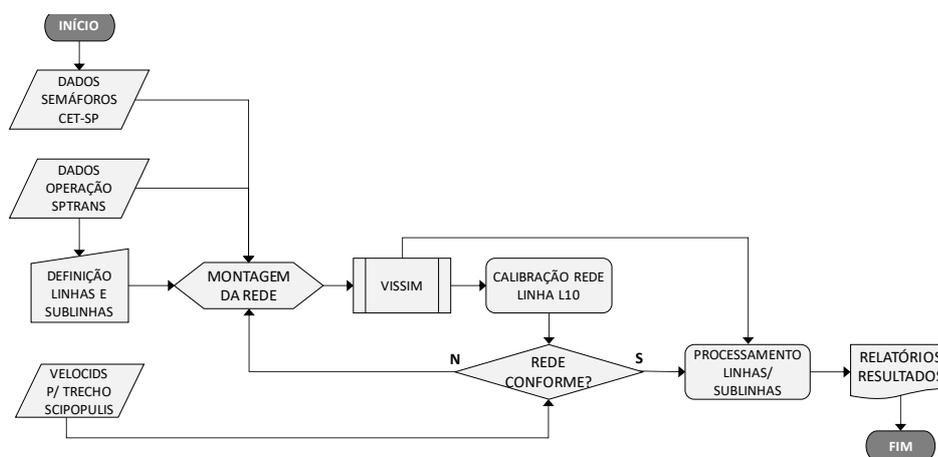
3.3.2. **Método e Critérios Gerais**

Em geral, o método de simulação do VISSIM não difere de outros sistemas de microsimulação.

Como já foi visto, os experimentos serão simulados e comparados sempre com a Linha L10, que era a linha real em operação na época da coleta de dados.

O Método é mostrado esquematicamente no Fluxograma constante da Figura 11.

Figura 11 - Metodologia nas simulações - Fluxograma geral do Método



FONTE: Autor

3.3.3. Montagem da Rede

3.3.3.1. Premissas adotadas

A rede foi montada no Sistema VISSIM, tendo sido assumidas as seguintes premissas:

- a) uma vez que a configuração do corredor no trecho em estudo é de faixa(s) inteiramente segregada(s), sem haver, portanto, interferências entre a circulação dos demais veículos e a circulação dos ônibus, foi considerada somente a circulação dos ônibus, dado que não há interação entre o tráfego dos coletivos e o dos demais veículos;
- b) como os volumes de embarques e desembarques por estação foram fornecidos para o conjunto do período, não havendo contagens volumétricas de veículos, as quantidades de embarque/desembarque por estação foram consideradas lineares ao longo da hora de pico;
- c) foram considerados os tempos de embarque de 4 segundos/passageiro e de desembarque de 2 segundos/passageiro a partir da análise dos documentos acadêmicos mostrados anteriormente ⁶⁴;
- d) as linhas foram inseridas no sistema a partir dos dados fornecidos pela SPTrans: quantidades de embarques e desembarques em cada estação, tipo de veículo, quantidade de portas de entrada e de saída, pontos de entrada e saída do corredor, etc.;

⁶⁴ Ver item 2.5.3. Bilhetagem Desembarcada neste documento

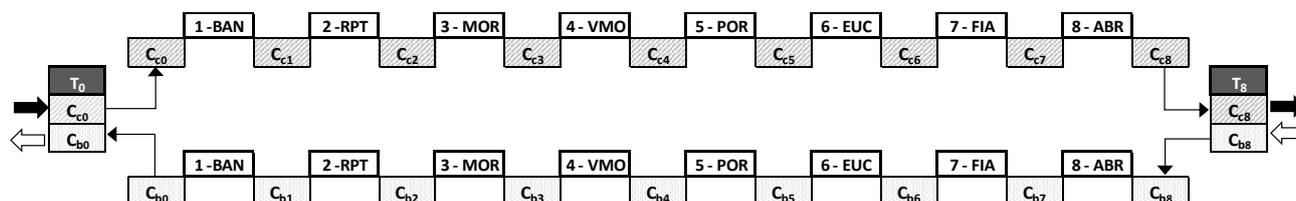
- e) todas as estações apresentam plataformas independentes nos dois sentidos. As oito estações consideradas na simulação são nomeadas a seguir, seguidas das respectivas siglas que serão empregadas ao longo deste texto:
- Banespa - BAN
 - Roque Petroni Jr. - RPT
 - Morumbi - MOR
 - Vieira de Moraes - VMO
 - Portugal - POR
 - Eucaliptos - EUC
 - Fiandeiras - FIA
 - Afonso Braz - ABR;
- f) O sentidos percorridos pela linha e que identificam as sub-linhas ao longo deste trabalho são os seguintes:
- Sentido Bairro-Centro - de BAN para ABR - Sentido “c”
 - Sentido Centro-Bairro - de ABR para BAN - Sentido “b”.

3.3.3.2. A inserção do trecho simulado no conjunto da Linha

A primeira dificuldade observada foi que o trecho selecionado para as simulações tinha uma extensão relativamente pequena para uma das linhas mais extensas e movimentadas do Corredor. Por isto, seria interessante que fossem considerados os carregamentos originais para efeito das intervenções e de sua análise.

Para isto, foi criado um artifício, considerando que, em cada extremidade do trecho, havia um “Terminal Virtual” (com distância zero em relação à estação mais próxima), com embarque em número de passageiros igual ao número que prosseguiria na linha no início do trecho e desembarque em número de passageiros igual ao que continuaria na linha depois do trecho considerado, sem que os tempos desses embarques ou desembarques fossem computados na simulação. A representação

Figura 12 - Montagem da Rede - Representação Esquemática



esquemática desta configuração é mostrada na Figura 12.

FONTE: Autor

3.3.3.3. A Necessidade de criação de Sub-linhas

Foi constatada a dificuldade, senão impossibilidade de simular no VISSIM uma linha completa com dois sentidos. Também não seria possível aplicar uma estratégia em que parte das partidas na linha sofressem algum tipo de intervenção, como, por exemplo, não prestar serviço em alguns pontos.

Para contornar tal dificuldade, optou-se por dividir a linha em sub-linhas. A linha de referência foi denominada de *L10* tendo sido dividida em suas sub-linhas:

- Sub-linha L10c - Sentido Bairro-Centro
- Sub-linha L10b - Sentido Centro-Bairro

A divisão em sub-linhas também foi empregada na simulação das intervenções.

Para identificação da intervenção e de suas sub-linhas foi adotada a seguinte terminologia:

- Meias Viagens - Sub-linhas entre L11b a L17b - sentido b;
- Limitação de Paradas (Skip-Stop) - Sub-linhas L21b a L221b - sentido b
- Linhas Expressas - Sub-linhas L31c a L35c - sentido c.

3.3.4. **Plano de Simulação - Intervenções a serem testadas, suas variações e regimes operacionais**

Escolhidos os três tipos de intervenção operacional, tratava-se de selecionar as variações em cada modalidade, isto é a maior ou menor intensidade das estratégias, procurando identificar a sensibilidade correspondente a cada variante. As opções selecionadas são mostradas na Tabela 33.

Tabela 33 - Plano de Simulação - Intervenções adotadas - Modalidades e Sub-linhas

INTERVENÇÃO / SENTIDO DA APLICAÇÃO	IDENTIF.	INTENSIDADE/SEQUÊNCIA DA INTERVENÇÃO	SUBLINHA CRIADA	PARTIDAS POR HORA	ESTAÇÕES ATENDIDAS	
		Operação Normal	L10c	12	8 Ests.(todas)	
			L10b	12	8 Estações	
Meia Viagem Sentido b (Centro-Bairro)	MV 1/1	1 partida SEM Serviço	L11b	6	Nenhuma	
		1 partida seguinte COM Serviço	L12b	6	8 Estações	
	MV 1/2	1 partida SEM Serviço	L13b	4	Nenhuma	
		1 partida seguinte COM Serviço	L14b	4	8 Estações	
		1 partida COM Serviço	L15b	4	8 Estações	
	MV 2/1	2 partidas seguidas SEM Serviço	L16b	8	Nenhuma	
		1 partida seguinte COM Serviço	L17b	4	8 Estações	
	Skip-Stop Sentido b (Centro-Bairro)	SS 1-2/1	1 partida NÃO ATENDE 2 PARADAS	L21b	6	6 Estações
			1 partida seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L22b	6	8 Estações
		SS 1-3/1	1 partida NÃO ATENDE 3 PARADAS	L25b	6	5 Estações
1 partida seguinte ATENDE TODAS PARADAS			L26b	6	8 Estações	
SS 1-2/2		1 partida NÃO ATENDE 2 PARADAS	L27b	4	6 Estações	
		1 partida seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L28b	4	8 Estações	
		1 partida seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L29b	4	8 Estações	
SS 2-2/1		2 partidas seguidas NÃO ATENDEM 2 PARADAS	L221b	8	6 Estações	
		1 partida seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L222b	4	8 Estações	
LINHA EXPRESSA Sentido c (Bairro-Centro)		LE 1/1	1 partida EXPRESSA - Serve 3 Estações iniciais	L31c	6	3 Estações
	1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS		L32c	6	8 Estações	
	LE 1/2	1 partida EXPRESSA - Serve 3 Estações iniciais	L33c	4	3 Estações	
		1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L34c	4	8 Estações	
		1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L35c	4	8 Estações	

FORNTE: Autor

A Linha L10 corresponde ao conjunto da Linha objeto do estudo, sendo dividida em duas sub-linhas: L10c - trecho da linha no sentido “c” - Bairro-Centro; e L10b - trecho da linha no sentido “b” - Centro-Bairro. Ambas terão, no primeiro momento 12 partidas por hora, atendendo 8 Estações localizadas no respectivo sentido.

As intervenções inicialmente testadas foram a Meia-Viagem e o Serviço com Paradas Limitadas (“Skip-Stop”).

Como as intervenções dos dois primeiros grupos (Meia Viagem e Skip-Stop) serão aplicadas no sentido “b”, nestes casos a Sub-linha L10c será comum a todas as intervenções, uma vez que sua operação não sofrerá nenhuma alteração.

As variantes previstas foram estabelecidas visando duas vertentes: a variação dos resultados conforme a intensidade maior ou menor da intervenção, intensidade essa ditada pela proporção entre partidas com intervenção e partidas sem intervenção. Na Tabela 31 acima, cada aplicação indica a sequência de partidas com alterações seguidas das partidas sem alterações. Assim, por exemplo, na aplicação MV 2/1,

duas partidas sofrem intervenções de Meia Viagem, seguidas de uma partida sem intervenção.

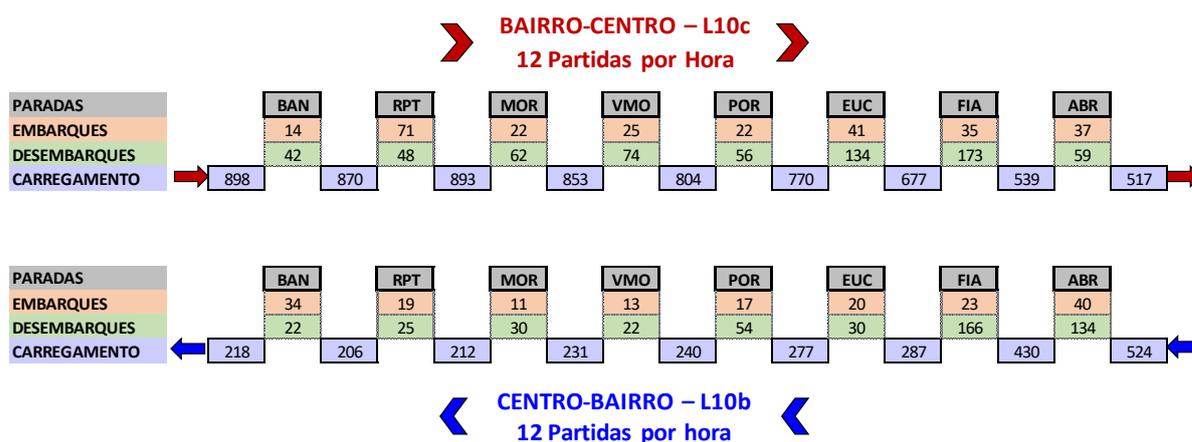
As Sub-linhas foram criadas na medida em que a aplicação da intervenção altera as características das Sub-linhas. Por exemplo na aplicação MV 1/2 que corresponde a uma partida com intervenção seguida de duas partidas sem intervenção, foram criadas duas sub-linhas para as partidas com serviço, visto que a primeira partida após a intervenção receberá um número maior de embarques, que não foram atendidos pela sub-linha anterior, que sofreu a intervenção.

As quantidades de partidas por hora para cada sub-linha foram determinadas pela sequência de partidas prevista. Observe-se que em cada aplicação a somatória do número de partidas das sub-linhas é igual ao total de partidas na sub-linha L10b, assim como as somas de embarques e desembarques nas sub-linhas corresponde aos totais de embarque e desembarque na Sub-linha 10b.

3.3.5. Criação das Sub-linhas para as Simulações

Os embarques e desembarques em cada estação são determinados pelos volumes horários cedidos pela SPTrans. O quadro geral de volumes para o conjunto da Linha 6913-10 (correspondente à Linha L10 neste documento), são mostrados na Figura

Figura 13 - Plano Simulação - Linha Sem Intervenção L10 - Embs. Desembs. HPM



13, divididos por sentido.

FONTE: Autor, com base em dados SPTrans

Nos subitens a seguir são detalhadas as características adotadas em cada Sub-linha nas intervenções simuladas.

3.3.5.1. Meias Viagens

a) MV 1/1 - Uma partida sem prestar serviço seguida de uma partida prestando serviço

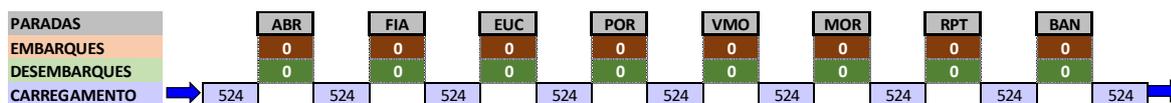
Uma vez que as Meias Viagens pressupõem um sentido da viagem sem atendimento às estações (sentido b - Centro-Bairro), quando aplicada a estratégia, os embarques e desembarques na sub-linha representando a intervenção (L11b) serão iguais a zero. Em contrapartida, na Sub-linha seguinte que prestará o serviço completo (L12b), os embarques corresponderão ao dobro daqueles mostrados na Sub-linha L10b, visto que arcarão com os embarques de sua viagem somados àqueles não atendidos pela viagem anterior.

As partidas de uma linha são defasadas da linha seguinte em 5 minutos.

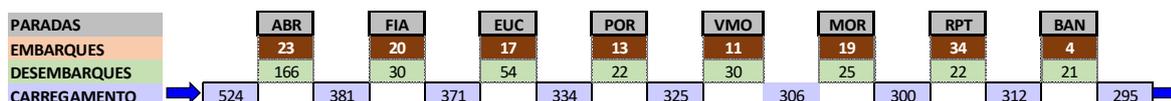
O diagrama dos embarques, desembarques e carregamentos é mostrado na Figura

Figura 14 - Meias Viagens - 1 Partida SEM serviço - 1 Partida COM serviço

LINHA – L11b – NÃO ATENDE NENHUMA ESTAÇÃO - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 6 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L12b – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 6 PARTIDAS POR HORA



14.

FONTE: Autor, com base em dados SPTrans

b) MV 1/2 - Uma partida sem prestar serviços seguida de duas partidas prestando serviço

Para a aplicação deste caso, foram montadas 3 linhas, todas no sentido b - Centro-Bairro, com as seguintes características:

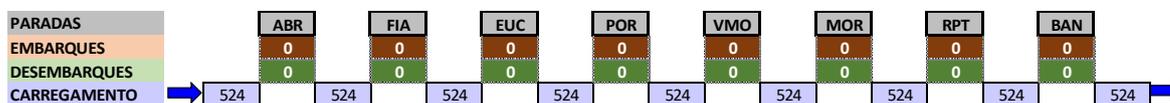
- Linha 13b - Não atende nenhuma parada - 4 partidas por hora;
- Linha 14b - Atende todas as paradas - 4 partidas por hora - tem embarques dobrados em virtude do não atendimento da Linha 13b;
- Linha 15b - Atende a todas as paradas - 4 partidas por hora - embarques e desembarques normais.

As partidas de uma linha são defasadas da linha seguinte em 5 minutos.

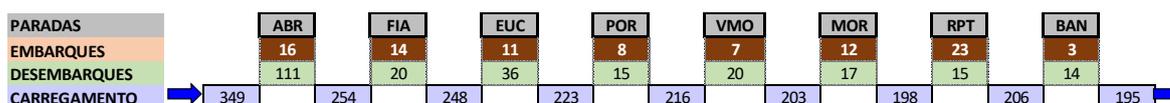
O diagrama dos embarques, desembarques e carregamentos é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Meias Viagens - 1 Partida SEM serviço - 2 Partidas COM serviço

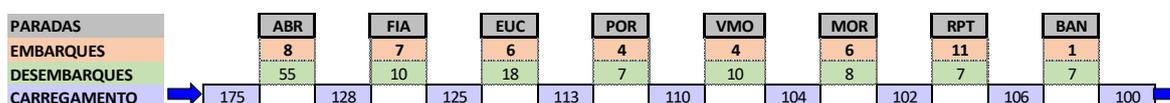
LINHA – L13b – NÃO ATENDE NENHUMA ESTAÇÃO - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L14b – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L15b – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



FONTE: Autor com base em dados SPTrans

c) MV 2/1 - Duas partidas sem prestar serviço seguidas de uma partida prestando serviço em todas as estações

Como para esta aplicação, as duas primeiras partidas têm características semelhantes, foram criadas apenas duas linhas, embora com frequências diferentes:

- Linha 16b - Não atende nenhuma parada - 8 partidas por hora;
- Linha 17b - Atende todas as paradas - 4 partidas por hora - tem embarques triplicados em virtude de dois não atendimentos seguidos na Linha 16b.

As partidas são escalonadas da seguinte forma, considerando a primeira partida às 00h00 e um ciclo de partidas:

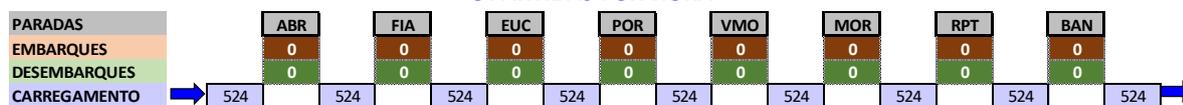
- 1ª partida L16b: 00h00;
- 2ª partida L16b: 00h05;
- 1ª partida L17b: 00h10.

A 3ª partida da linha L16b será feita às 00h15 e assim sucessivamente, conservando-se os 5 minutos entre partidas.

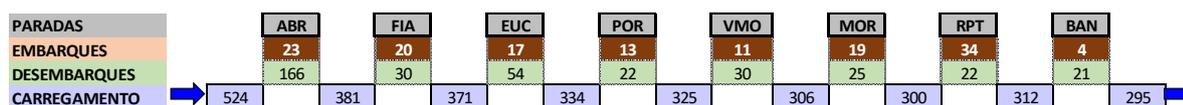
O diagrama dos embarques, desembarques e carregamentos é mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Meias Viagens - 2 Partidas SEM serviço - 1 Partida COM serviço

**LINHA – L16b – DUAS PARTIDAS SEGUIDAS NÃO ATENDEM NENHUMA ESTAÇÃO - SENTIDO CENTRO-BAIRRO
8 PARTIDAS POR HORA**



LINHA – L17b –PARTIDA SEGUINTE ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



FONTES: Autor com base em dados SPTrans

3.3.5.2. Limitação de Paradas - “Skip-Stop”

Pela mesma lógica da intervenção de Meias Viagens, esta estratégia é aplicável preferencialmente no sentido de menor demanda em serviços com demandas pendulares.

Por outro lado, como as simulações procuram também medir a sensibilidade dos resultados em função da intensidade de aplicação da intervenção, nesta modalidade foram também previstas aplicações com variações de maior ou menor frequência, de maneira a buscar perceber a variação dos resultados frente a tais mudanças.

Para os “saltos”, foram selecionadas as estações no sentido Centro-Bairro com menores número de embarques, visando minimizar os aumentos de espera dos passageiros não atendidos. Tendo em vista esta premissa foram selecionadas para o não atendimento, as estações POR e MOR.

As quatro estratégias testadas são mostradas nos subitens a seguir.

- a) SS 1-2/1 - Uma partida sem prestar serviço em duas estações seguida de uma partida prestando serviço em todas as estações

Neste caso trata-se de uma partida deixar de atender a duas estações com menores quantidades de embarques, para atender na partida seguinte a todas as estações.

Para tanto foram criadas duas sub-linhas:

- L21 que deixa de atender as estações POR e MOR - os desembarques nestas estações foram transferidos para as estações seguintes, respectivamente VMO e RPT e, no cálculo de benefícios, serão computados como benefícios negativos, visto que os passageiros que desembarcariam perderam tempos de transferência e com percursos negativos. Os embarques

não atendidos foram apontados na segunda linha (com atendimento), com maior tempo de espera.

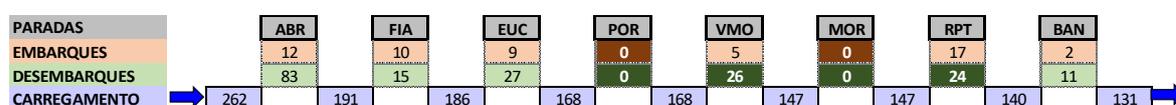
- L22 que atende a todas as estações e arcam, nas estações sem atendimento na L21, com embarques adicionais que esperaram por esta sub-linha.

Cada uma das duas linhas apresenta 6 partidas por hora, com defasagem de 5 minutos entre as partidas de cada uma.

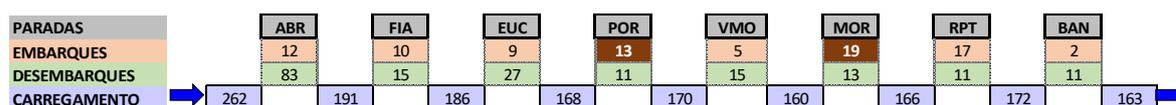
As características de cada sub-linha são mostradas na Figura 17.

Figura 17 - “Skip-Stop” - 1 Partida SEM serviço 2 Estações - 1 Part. COM serviço

LINHA – L21b – NÃO ATENDE DUAS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 6 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L22b – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 6 PARTIDAS POR HORA



FONTE: Autor com base em dados SPTrans

- b) SS 1-3/1 - Uma partida sem prestar serviço em três estações seguida de uma partida prestando serviço em todas as estações

Os procedimentos são análogos ao do subitem anterior, tratando agora de deixar de prestar serviço em três estações. O objetivo foi verificar a diferença de resultados quando o número de estações não atendidas aumenta.

Foram criadas duas sub-linhas, com as seguintes características:

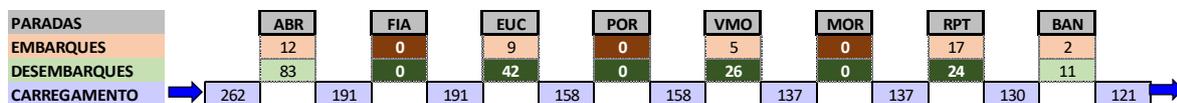
- L25 que deixa de atender as estações FIA, POR e MOR - os desembarques nestas estações foram transferidos para as estações seguintes, respectivamente EUC, VMO e RPT e, no cálculo de benefícios, serão computados como benefícios negativos, visto que os passageiros que desembarcariam perderam tempos de transferência e com percursos negativos. Os embarques não atendidos foram apontados na segunda linha (com atendimento), com maior tempo de espera.
- L26 que atende a todas as estações e arcam, nas estações sem atendimento na L25, com embarques adicionais que esperaram por esta sub-linha.

Cada uma das duas linhas apresenta 6 partidas por hora, com defasagem de 5 minutos entre as partidas de cada uma.

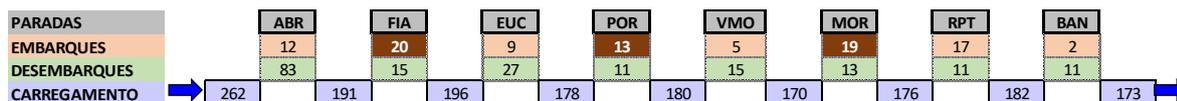
As características de cada sub-linha são mostradas na Figura 18.

Figura 18 - “Skip-Stop” - 1 Partida SEM serviço 3 Estações - 1 Part. COM serviço

LINHA – L25b – NÃO ATENDE TRÊS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 6 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L26b – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 6 PARTIDAS POR HORA



FONTE: Autor com base em dados SPTrans

- c) SS 1-2/2 - Uma partida sem prestar serviço em duas estações seguida de duas partidas prestando serviço em todas as estações

Esta aplicação guarda similitude com a efetuada no subitem 3.3.5.1. b), em que para cada partida com intervenção, as duas seguintes não são objeto de intervenção. Por isto, foram criadas três sub-linhas:

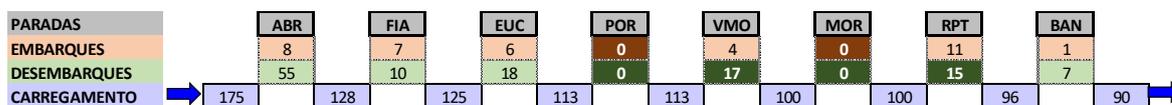
- Linha 27b - Não atende duas paradas - 4 partidas por hora;
- Linha 28b - Atende todas as paradas - 4 partidas por hora - tem embarques alterados em virtude do não atendimento da Linha 27b;
- Linha 29b - Atende a todas as paradas - 4 partidas por hora - embarques e desembarques normais.

As partidas de uma linha são defasadas da linha seguinte em 5 minutos.

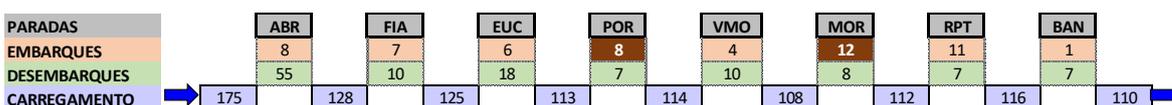
O diagrama dos embarques, desembarques e carregamentos é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - “Skip-Stop” - 1 Partida SEM serviço 2 Estações - 2 Partidas COM serviço

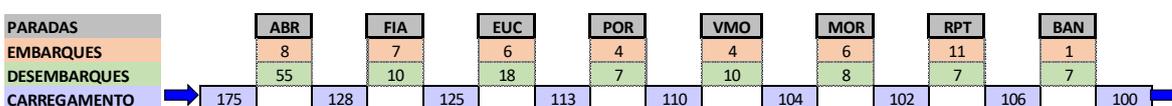
LINHA – L27b – NÃO ATENDE DUAS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L28b – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L29b – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



FONTE: Autor com base em dados SPTrans

d) SS 2-2/1 - Duas partidas seguidas com aplicação da estratégia em duas estações e uma partida seguinte prestando serviço

Aqui também há uma analogia com intensidade de aplicação feita na Meia Viagem no item 3.3.5.1. c) deste documento, em que duas partidas seguidas recebem intervenção e apenas uma partida seguinte presta o serviço normalmente.

Como, para esta aplicação, as duas primeiras partidas têm características semelhantes, foram criadas apenas duas linhas, embora com frequências diferentes:

- Linha 221b - Não atende nenhuma parada - 8 partidas por hora;
- Linha 222b - Atende todas as paradas - 4 partidas por hora;

As partidas são escalonadas da seguinte forma, considerando a primeira partida às 00h00 e um ciclo de partidas a cada 5 minutos:

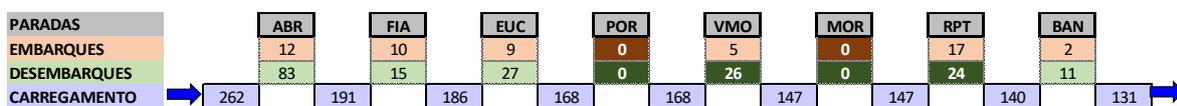
- 1ª partida L221b: 00h00
- 2ª partida L221b: 00h05
- 1ª partida L222b: 00h10

A 3ª partida da linha L221b será feita às 00h15 e assim sucessivamente.

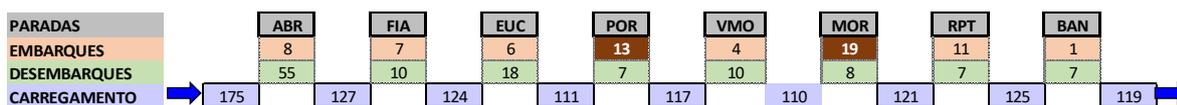
O diagrama dos embarques, desembarques e carregamentos é mostrado na Figura 20.

Figura 20 - “Skip-Stop” - 2 Partidas SEM serviço 2 Estações - 1 Partida COM serviço

LINHA – L221b – NÃO ATENDE DUAS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 8 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L222b –ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO CENTRO-BAIRRO - 4 PARTIDAS POR HORA



FONTE: Autor com base em dados SPTrans

3.3.5.3. Linha Expressa no Sentido Centro-Bairro

Embora com funcionalidade próxima das outras duas intervenções analisadas, a Linha Expressa foi segregada das demais nas simulações, tendo em vista suas peculiaridades.

Trata-se de intervenção considerada pela SPTrans no Projeto de sua nova rede, como opção, nas horas de pico, para os trechos com maiores demandas de longo curso; por exemplo, em linhas como a 6913-10 (objeto destas simulações) que apresenta demandas mais que expressivas nas estações da extremidade periférica; as linhas expressas funcionariam, em analogia com a expressão dos cardiologistas, como “pontes de safena” para as linhas pendulares muito carregadas nas extremidades.

Seu objetivo predominante é a redução dos tempos de viagem dos passageiros que se dirigem ao centro da cidade; o objetivo de aumentar a oferta, em princípio, passa a ser secundário.

É aplicada, ao contrário de todas as anteriores, no sentido Bairro-Centro, visto que sua aplicação e seus possíveis benefícios são oferecidos aos passageiros do sentido de maior demanda.

Para a determinação das quantidades de embarque e realização das simulações foram adotadas premissas simplificadoras que, embora possam corresponder a possíveis diferenças nos resultados práticos, permitiram a simulação da intervenção com os instrumentos disponíveis. Tais premissas foram:

- embarcam na Sub-linha expressa todos os passageiros já embarcados anteriormente que adentram no trecho e aqueles que embarcam até a terceira

estação do trecho (MOR) e cujos destinos estejam localizado à jusante do trecho (sentido bairro-centro);

- os demais passageiros, que desembarcam no trecho fazem uso da Sub-linha normal.

O cálculo dos passageiros, embarques e desembarques de cada Sublinha foi feito a partir da Matriz de Embarques e Desembarques fornecida pela SPTrans que tem 51 linhas por 52 colunas. Sobre esta base de dados foram efetuadas as seguintes operações:

- a) levantamento das quantidades de passageiros embarcados a montante do trecho analisado e com desembarque a jusante deste;
- b) levantamento das quantidades de passageiros embarcados a montante do trecho analisado e com desembarque no trecho;
- c) levantamento das quantidades de passageiros embarcados no trecho e que desembarcam a jusante do trecho;
- d) levantamento das quantidades de passageiros que e desembarcam no trecho;
- e) ajuste dos carregamentos prévios e posteriores à linha, de acordo com a demanda potencial da Linha Expressa;
- f) cálculo das demandas que farão uso da(s) sub-linha(s) prestando serviço normal.

Em termos de intensidade da aplicação, foram consideradas duas alternativas:

- a) LE 1/1 - uma partida em LINHA EXPRESSA seguida de uma partida em serviço normal.

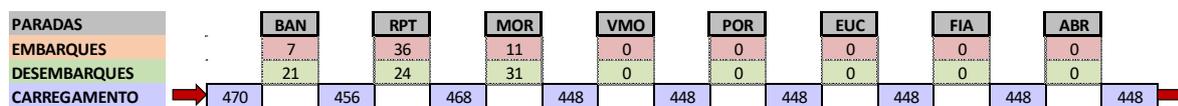
Para esta aplicação, foram criadas duas sub-linhas com mesma frequência:

- Linha 31c - Atende somente as três primeiras estações, passando, a partir daí, a fazer serviço direto - 6 partidas por hora;
- Linha 32c - Atende todas as estações - 6 partidas por hora.

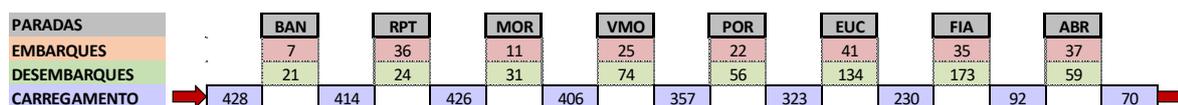
O diagrama com os volumes de embarque e desembarque e carregamentos dos trechos é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Linha Expressa - 1 Partida Expressa - 1 Partida Serviço Normal

LINHA – 31c – ATENDE TRÊS ESTAÇÕES - SENTIDO BAIRRO – CENTRO – 6 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L32c – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO BAIRRO – CENTRO – 6 PARTIDAS POR HORA



FONTE: Autor com base em dados SPTrans

a) LE 1/2 - uma partida em LINHA EXPRESSA seguida de duas partidas em serviço normal - os volumes de embarques e desembarques são mostrados na Figura 22.

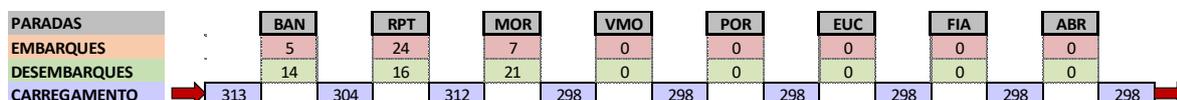
Para esta aplicação, foram criadas três sub-linhas com as seguintes características:

- Linha 33c - Atende somente as três primeiras estações, passando, a partir daí, a fazer serviço direto - 4 partidas por hora;
- Linha 34c - Atende todas as estações - como atende na sequência de uma linha expressa, coleta e distribui os passageiros não atendidos pela predecessora - 4 partidas por hora;
- Linha 35c - Atende todas as estações com volumes de embarque e desembarque normais.

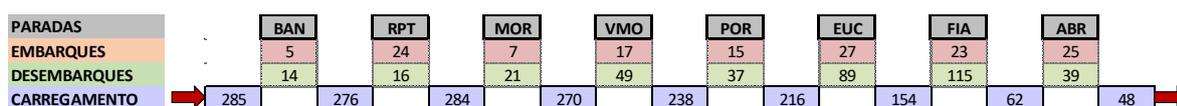
O diagrama com os volumes de embarque e desembarque e carregamentos dos trechos é mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Linha Expressa - 1 Partida Expressa - 2 Partidas Serviço Normal

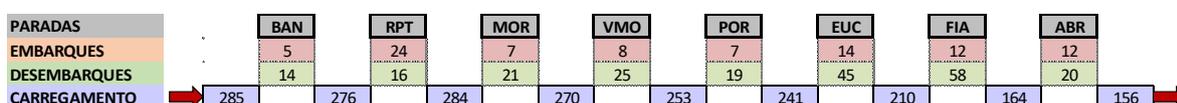
LINHA – 33c – ATENDE TRÊS PRIMEIRAS ESTAÇÕES - SENTIDO BAIRRO – CENTRO – 4 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L34c – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO BAIRRO – CENTRO – 4 PARTIDAS POR HORA



LINHA – L35c – ATENDE TODAS AS ESTAÇÕES - SENTIDO BAIRRO – CENTRO – 4 PARTIDAS POR HORA



FONTE: Autor com base em dados SPTrans

3.3.6. Calibração da Rede

Tendo sido concluídas a entrada de dados e a parametrização do VISSIM, procederam-se às primeiras simulações que serviram para a correção de eventuais erros construtivos da rede. Em seguida, foram ajustados a velocidade desejada em cada linha de ônibus, o tempo de embarque e desembarque por passageiros (de acordo com o tipo de veículo da linha e foram criadas zonas de redução de velocidade para os trechos em curva ou em aclive.

Após novas rodadas de simulação com as alterações que fornecem tempos e distâncias percorridos por trecho, foram obtidas as velocidades médias por trecho.

Estes resultados foram, então, cotejados com as velocidades médias fornecidas pela Scipopulis, sendo adotados dois critérios para a análise: o erro, que deveria ser igual ou inferior a 10%; e o desvio quadrático, em que R^2 deveria ser o mais próximo possível de 1,0. Depois de novos ajustes finos, chegou-se a apenas um trecho com erro ligeiramente superior a 10% e $R^2 = 0,7488$ (desconsiderando-se o trecho com problema, o valor de R^2 chega a 0,9227.

3.3.7. Execução das simulações

O passo seguinte consistia no processamento das simulações segundo as condições estabelecidas no Plano de Simulação, trabalhando com as opções de intervenção adotadas. Por tratar-se de uma rede relativamente simples, cujo objetivo principal não era trabalhar com flusos e níveis de serviço das vias, optou-se pela realização de 5 rodadas consecutivas para cada simulação, com os resultados apresentados sendo obtidos pelas médias de cada simulação.

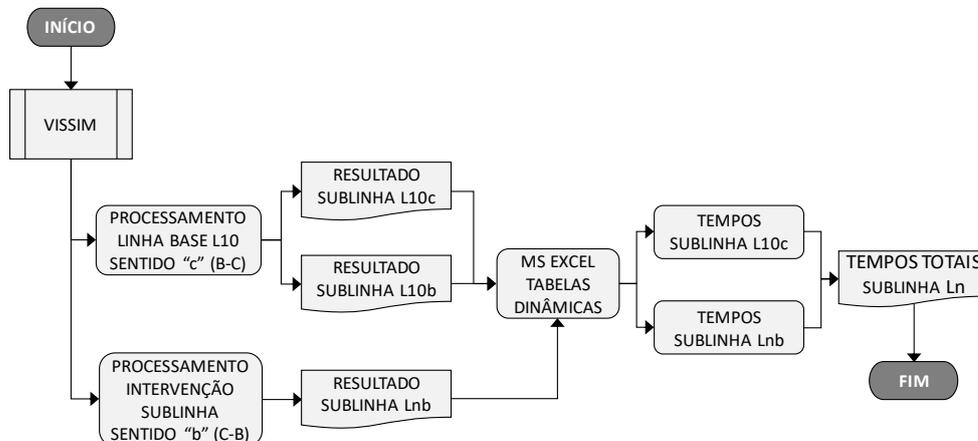
Para efeito da compreensão dos mecanismos adotados, entende-se ser mais recomendável a separação entre as intervenções Meia Viagem e Skip-Stop da intervenção Linha Expressa, visto que elas tem naturezas relativamente diferentes e aplicam-se em sentidos opostos na linha considerada.

3.3.7.1. Simulações das Intervenções Meia Viagem e “Skip-Stop”

Entende-se mais compreensível a divisão da metodologia aplicada nestas intervenções entre a etapa executada pelo VISSIM e a etapa de processamento posterior com o emprego de Planilhas Eletrônicas, no caso o MS Excel.

O primeiro passo, o processamento no VISSIM é mostrado no Fluxograma da Figura 23, onde a Sub-linha Lnb deve ser entendida como a Sublinha nº “n” no sentido “b”.

Figura 23 - Simulação - Meias Viagens e “Skip-Stop” - Fluxograma processamento



FONTE: Autor

O fluxograma procura demonstrar que os resultados, expressos em tempo de viagem, resultam da soma dos tempos de viagem da Sub-linha de referência L10c com os mesmos tempos da Sub-linha simulada Lnb, lembrando que Lnb representa a Sub-linha número “n” no sentido “b”.

Os resultados deste processamento gerados no VISSIM e expressos num arquivo de texto, são referenciados a cada meio segundo da hora de processamento, para todas as linhas circulando no corredor. Trata-se de uma planilha de cerca de 580 mil linhas.

A extensão desse tipo de arquivo é mostrada, a título de exemplificação na Figura

Figura 24 - Simulação no VISSIM - Reprodução Parcial de Relatório do Sistema

```

SVISION
* File: C:\Users\wangr\Desktop\Documents\POLI\C-Marte\IT_arnaldo\skipstopdani\Arquivo_cortado\ITarnaldo6km_AR_L20_Pedro.inpx
* Comment:
* Date: 24/10/2018 18:14:53
* PTV Vissim: 10,00 [10]
*
* Table: Vehicles In Network
*
* SIMSEC: SimSec, Simulation second (Simulation time [s]) [s]
* NO: No, Number (Unique vehicle number)
* LANE\LINK\NO: Lane\Link\No, Lane\Link\Number (Unique link/connector number)
* LANE\INDEX: Lane\Index, Lane\Index (Unique number of the lane)
* POS: Pos, Position (Distance on the link from the beginning of the link or connector) [m]
* SPEED: Speed, Speed (Speed at the end of the time step) [km/h]
* INQUEUE: InQueue, In queue (Returns if the vehicle is in queue, Queue is defined by speed and headway thresholds, (see queue definition))
* PTALIGHTPASS: PTAlightPass, Public transport - alighting passengers (Number of alighting passengers at the current PT stop)
* PTBOARDPASS: PTBoardPass, Public transport - boarding passengers (Number of boarding passengers at the current PT stop)
* PTSTOP: PTStop, Public transport stop (Number of current stop)
* PTLINE: PTLine, Public transport line (Number of PT line)
*
* SimSec  No      Lane\Link Lane\Inde Pos      Speed  InQueue  PTAlightP  PTBoardP  PTStop  PTLine
*
SVEHICLE: NO      LANE\LINK\LANE\IND POS      SPEED  INQUEUE  PTALIGHTPTBOARDIPTSTOP  PTLINE  x
1200,5  4      75      1      85,18    0      1      80      0      35      1
1200,5  6      50      1      129,4    3,6    1
1200,5  10     72      1      414,33   39,93  0
1200,5  11     69      1      18,74    0      1
1200,5  12     69      1      39,69    0      1
1200,5  13     47      2      119,38   7,62   0
1200,5  15     93      1      299,83   40,53  0
1200,5  17     47      2      92,29    15,22  0
1200,5  18     21      1      0,07     2,67   1
1200,5  22     22     ...
  
```

24, que reproduz um relatório de saída do sistema VISSIM.

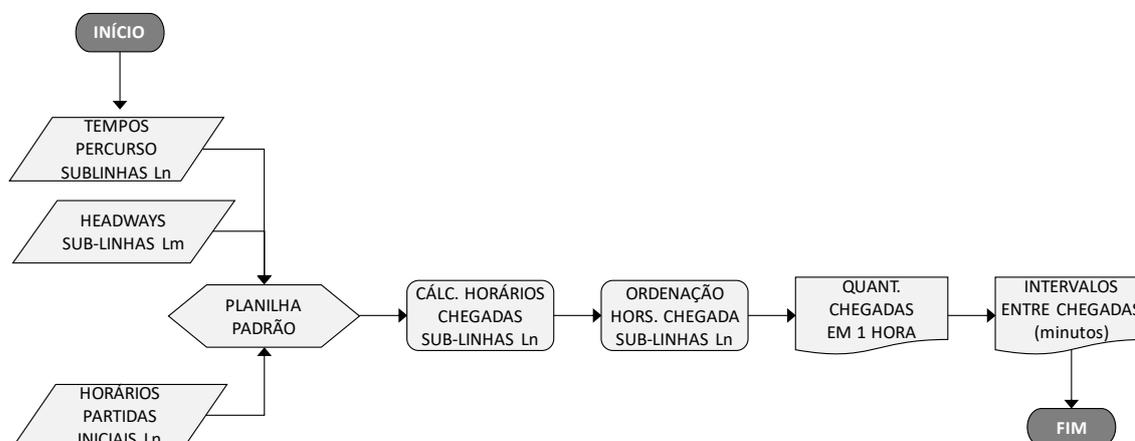
FONTE: Fac-Símile de Relatório do VISSIM extraído como arquivo de texto

Para permitir o manejo desses relatórios, foram criadas, em cada caso, Tabelas Dinâmicas que permitem a filtragem de dados para extração das informações desejadas.

O prosseguimento da apuração foi feito por meio de Planilhas Eletrônicas extraídas a partir das Tabelas Dinâmicas, dando origem a planilhas específicas que demonstram os valores dos tempos de percurso sob as condições de cada intervenção. Chegou-se, então, aos tempos totais de percurso em cada partida.

Em seguida os tempos totais de percurso de cada sub-linha são submetidos a uma Planilha Padrão desenvolvida para calcular, para o conjunto da linha, a quantidade de ônibus que chegam ao destino (extremidade do sentido “b” - Estação Banespa) e respectivos horários de chegada no período de uma hora. Em tese, essa quantidade de veículos determinaria a frota disponível. A seq uência desse procedimento é

Figura 25 - Meias Viagens e “Skip-Stop” - Fluxograma Cálculo Oferta de Frota



mostrada no fluxograma da Figura 25.

FONTE: Autor

A Figura 26 mostra a reprodução parcial de uma Tabela Padrão para Cálculo dos Horários de Chegada para uma das Linhas com Aplicação de Intervenção Meia Viagem.

Figura 26 - Planilha Padrão para Cálculo dos Horários de Chegada dos veículos

MEIA VIAGEM L11b SUB-LINHA SEM SERVIÇO			L12b SUB-LINHA COM SERVIÇO			HORÁRIOS CHEGADA ORDEM CRESCENTE		CÁLCULO HEADWAY CHEGADA		MÉDIA 3,28
Tempo de Viagem: 30,436			Tempo de Viagem: 36,522					DESVIO PADRÃO 2,943		
Headway	H Saída	H Chegada	Headway	H Saída	H Chegada					
1	10,00	30,44	10,000000	5,00	41,52	30,44	1			
2	10,00	40,44		15,00	51,52	40,44	2	10,00		
3	20,00	50,44		25,00	61,52	41,52	3	1,09		
4	30,00	60,44		35,00	71,52	50,44	4	8,91		
5	40,00	70,44		45,00	81,52	51,52	5	1,09		
6	50,00	80,44		55,00	91,52	60,44	6	8,91		
1	30,44	60,87		41,52	78,04	60,87	7	0,44		
2	40,44	70,87		51,52	88,04	61,52	8	0,65		
3	50,44	80,87		61,52	98,04	70,44	9	8,91		
4	60,44	90,87		71,52	108,04	70,87	10	0,44		
5	70,44	100,87		81,52	118,04	71,52	11	0,65		
6	80,44	110,87		91,52	128,04	78,04	12	6,52		

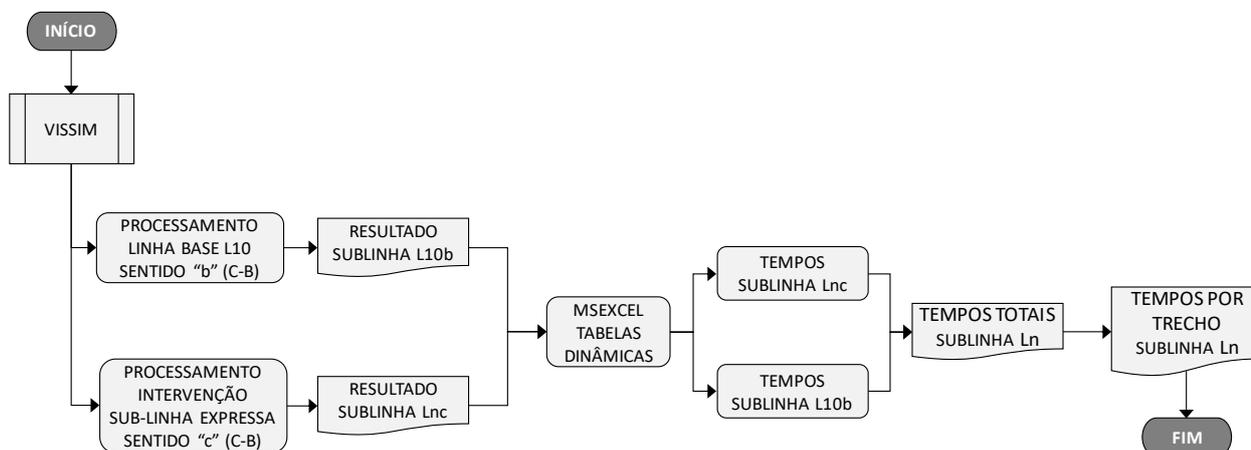
FONTE: Autor

3.3.7.2. Simulações da Intervenção Linha Expressa

As simulações efetuadas para este tipo de intervenção diferem das anteriores apenas em dois aspectos: são efetuadas no sentido “c” (Bairro-Centro); busca-se obter qual os ganhos de tempo para o conjunto dos passageiros proporcionados pela implantação da intervenção.

O processamento no sistema VISSIM é mostrado no fluxograma da Figura 27.

Figura 27 - Simulação no VISSIM - Linha Expressa - Fluxograma do Processamento

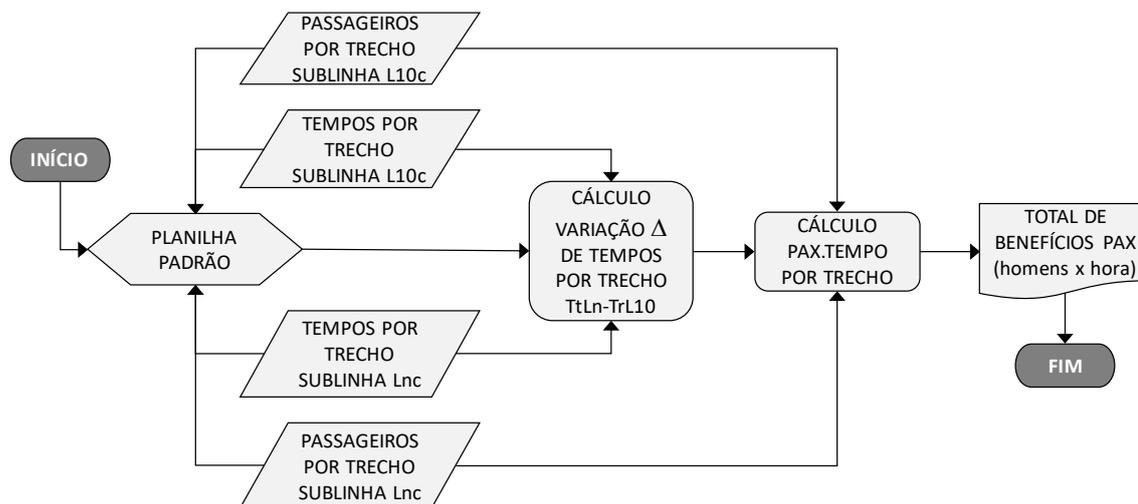


FONTE: Autor

Encontrados os tempos nos dois sentidos da Linha, passa-se ao cálculo dos tempos ganhos pelos passageiros.

Com este propósito foi desenvolvida Planilha Padrão para cálculo dos benefícios em cada uma das opções de intensidade da intervenção consideradas. O benefício foi calculado por trecho, de maneira a prover maior exatidão dos resultados. Este

Figura 28 - Simulação VISSIM - Linha Expressa - Fluxograma Cálculo Benefícios



procedimento é descrito esquematicamente no fluxograma da Figura 28.

FONTE: Autor

Na seção seguinte são apresentados os resultados obtidos nas simulações.

3.3.8. Considerações finais

Entende-se que as escolhas dos diversos componentes foram positivas: um corredor importante para a Cidade de São Paulo e uma linha com demandas altas e pendulares. O trecho selecionado, do ponto de vista dos testes, talvez tivesse sido mais proveitoso se localizado próximo à extremidade periférica da linha, onde as intervenções, por suas naturezas e aplicações, produziriam efeitos mais sensíveis. No entanto, a partir do Terminal Santo Amaro, há interrupções da segregação das vias, o que dificultaria o processo de simulação.

Os dados coletados foram copiosos e permitiram a construção da rede e sua calibração sem maiores dificuldades.

O sistema VISSIM, por sua vez, foi um bom instrumento para a execução das simulações, embora algumas adaptações extra sistema tivessem que ser introduzidas para a obtenção das informações desejadas.

Na Seção 4 a seguir, serão mostrados os resultados obtidos com esta metodologia, dos quais serão extraídas as Conclusões constantes da Seção 5.

4. RESULTADOS

Foram efetuados 23 diferentes grupos de simulações cada um com cinco rodadas, procurando atender às diversas modalidades de intervenção em diferentes configurações de suas intensidades.

Os resultados das simulações são apresentados por tipo de intervenção, de maneira a avaliar a variação de tempos em função do aumento ou diminuição de intensidade.

4.1. MEIAS VIAGENS

4.1.1. Redução de Tempos de Percurso

Na Tabela 34 as Colunas de Velocidade, Tempos em Movimento, em Parada e em Semáforos são os resultados dos diversos Relatórios extraídos do VISSIM apenas com os tempos transformados em minutos. São as seguintes as características de cada coluna:

- a) Velocidade - representa a velocidade de percurso para todo o trecho;
- b) Movimento - os tempos totais de movimentação de todos os veículos atuando na Sub-linha;
- c) Parada - compreende o tempo total de abertura e fechamento de portas e os tempos de embarque e desembarque de passageiros nas estações, relativos ao conjunto dos ônibus em operação na Sub-linha;
- d) Semáforos - compreende a soma dos tempos parados em semáforos de todos os veículos operando na Sub-linha.

As colunas seguintes tratam de operações de soma destinadas a compor informações comparativas. Merecem destaque os valores da Coluna “Tempo Viagem Total”. Eles decorrem da seguinte fórmula:

$$TVT_n = T_{nb} + T_{L10c}$$

onde:

TVT_n = Tempo de viagem toral da Sub-Linha “n”

T_{nb} = Tempo de Viagem da Sub=linha “n” no sentido “b”

T_{L10c} = Tempo de Viagem da Sub-linha L10 no sentido “c”

Deve ser lembrado que os tempos de viagem das Sub-linhas relativas a uma determinada intensidade de aplicação de intervenção devem ser somados para compor o Tempo Total de viagem no sentido “b” uma vez que a soma do número de partidas dessas Sub-linhas deve ser igual ao da Sub-linha L10b.

Os valores da Coluna “Tempo por Partida” representam os tempos totais da viagem simulada divididos pelos respectivos número de partidas da Sub-linha na aplicação. Eles serão empregados no cálculo do Aumento da Oferta mostrado no item seguinte.

Cumpra também esclarecer que os percentuais da Coluna Redução de Tempos representam a variação a menor do Tempo Total de Viagem da Sub-linha “n” em relação ao Tempo Total de Viagem da Linha L10 que, como já foi visto, é o cenário “básico”.

Tabela 34 - Resultados da Simulação VISSIM - Meias Viagens - Tempos específicos e Tempos Totais em cada Sub-linha

MEIA VIAGEM INTENSIDADE DA INTERVENÇÃO	SUB- LINHA	VELOCIDADE (km/h)	TEMPOS (minutos)					TEMPO VIAGEM TOTAL	REDUÇÃO TEMPOS	
			MOVIMENTO	PARADA	SEMÁFOROS	TOTAL	TEMPO POR PARTIDA			TOTAIS SENTIDO b
Operação Normal	L10c	15,66	123,93	36,88	52,68	213,50	17,79	231,18	444,68	N/A
	L10b	14,95	139,62	25,00	66,57	231,18	19,27			
1 partida SEM Serviço	L11b	21,19	53,68	0,00	22,18	75,87	12,64	188,25	401,75	9,7%
1 partida COM Serviço	L12b	13,86	65,35	14,50	32,53	112,38	18,73			
1 partida SEM Serviço	L13b	20,90	35,32	0,00	13,02	48,33	12,08	193,53	407,03	8,5%
1 partida COM Serviço	L14b	8,52	43,15	9,55	22,87	75,57	18,89			
1 partida COM Serviço	L15b	9,02	43,22	5,27	21,15	69,63	17,41	174,02	387,52	12,9%
2 partidas seguidas SEM Serviço	L16b	20,71	73,58	0,00	30,12	103,70	12,96			
1 partida COM Serviço	L17b	14,85	41,85	13,38	15,08	70,32	17,58			

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

Observa-se que todas as aplicações revelam níveis relativamente elevados de redução, variando entre 8,5% e 12,9%. Também ocorre uma gradação dos tempos de redução em função do grau de intensidade da aplicação:

- na aplicação com menor intensidade, a de 1 partida SEM Serviço com 2 partidas seguidas COM Serviço, em uma hora são 4 partidas SEM Serviço e a redução foi de 8,5%;
- na aplicação intermediária, com 1 partida SEM Serviço e 1 partida seguinte COM Serviço, em uma hora são 6 partidas SEM Serviço e redução de 9,7%
- na aplicação mais intensa, com 2 partidas SEM Serviço, seguidas de 1 partida COM Serviço, em uma hora são 8 partidas SEM Serviço e a maior redução é alcançada, situada em 12,9%.

Para as linhas L16b e L17b da aplicação com maior intensidade, foi verificado que a Sub-linha COM Serviço absorve bem a demanda triplicada por embarques, não tendo sido verificada lotação completa dos ônibus em nenhum trecho.

Se cotejados estes resultados com aqueles mostrados nos artigos da Resenha Bibliográfica, verifica-se que estão ligeiramente superiores tanto aos de (FURTH, 1985) que mostra variações entre 6,9% a 10,3% e aos de (EBERLEIN, 1995) que varia entre 8,38% a 8,58%. Considerando as diferentes características e modelos empregados nos dois trabalhos, os valores aqui obtidos podem ser considerados dentro do mesmo espectro de variações.

4.1.2. Aumento de Oferta

Como já foi mostrado na Metodologia da Simulação, foi preparada uma Planilha Padrão para o cálculo do número de chegadas das viagens e seus respectivos horários, com o cálculo do Intervalo entre cada chegada e a viagem anterior. Com isto, em tese ter-se-ia o aumento do número de veículos para servir à próxima viagem.

Os resultados são mostrados na Tabela 33, cujos principais parâmetros são:

- a) Coluna 2 - Os tempos de viagem por partida são resultado da seguinte fórmula:

$$\mathbf{TVP}_n = \mathbf{TP}_{nb} + \mathbf{TP}_{L10c}$$

onde:

\mathbf{TVP}_n = Tempo de viagem por partida da Sub-Linha “n”

\mathbf{TP}_{nb} = Tempo de Viagem por partida da Sub-linha “n” no sentido “b”

$\mathbf{TL10c}$ = Tempo de Viagem por partida da Sub-linha L10 no sentido “c”

O TVP de cada sub-linha, juntamente com o “*headway*” entre as partidas, alimentam a Planilha Padrão, que apresenta duas tabelas horárias: uma para a Sub-linha que recebeu a intervenção e outra para a(s) Sub-linha(s) sem intervenção.

A planilha calcula o horário de chegada de todas as partidas e em seguida integra os horários de chegada, classificando-os do menor para o maior. Por último, calcula os intervalos entre chegadas, sua Média e o Desvio Padrão

- b) Coluna 4 - “*Headway*” na Chegada - Média - O cálculo da média foi feita com base no “*headway*” de cada chegada em relação à chegada anterior. O cálculo da média foi feito considerando os “*headways*” a partir da sétima

chegada, visto que os 6 primeiros poderiam representar o primeiro ciclo concluído e obter alguma regularidade. O cálculo foi encerrado quando paravam de chegar ônibus de uma das linhas.

- c) Coluna 5 - Desvio Padrão - como os “*headways*” apurados apresentaram grandes variações, optou-se por calcular os desvios padrão das série consideradas nos cálculos das médias.
- d) Coluna 6 - Potencial quantidade de ônibus que chegaram em 60 minutos - Os valores foram obtidos da divisão de 60 minutos pela média em cada grupo.
- e) Coluna 7 - Variação em relação à L10 - A planilha também foi aplicada à Linha 10, uma vez que os tempos de viagem de todas as partidas foram calculados pelo VISSIM. O resultado é que na chegada ao final da linha, no período de 60 minutos foram verificadas 17 chegadas. Assim a variação resulta da subtração destas 17 chegadas de cada número obtido na coluna 6, representando, em tese, a quantidade de partidas que poderiam ser

Tabela 35 - Simulação VISSIM - Meias Viagens - Potencial Aumento da Oferta

MEIAS VIAGENS INTENSIDADE APLICAÇÃO	1 SUB- LINHA	2 TEMPO VIAGEM P/ PARTIDA (min)	3 Quantidade horária de Partidas	HEADWAY NA CHEGADA		6 Quant. ônibus Chegada em 60 minutos	7 Variação em relação à L10
				4	5		
				Média (min)	Desvio Padrão(min)		
Operação Normal	L10c	17,79	12	3,47	1,20	17	N/A
	L10b	19,27					
1 partida SEM Serviço	L11b	30,44	6	3,05	2,67	19	2
1 partida COM Serviço	L12b	36,52	6				
1 partida SEM Serviço	L13b	30,03	4				
1 partida COM Serviço	L14b	36,48	4	2,82	2,44	21	4
1 partida COM Serviço	L15b	45,89	4				
2 partidas seguidas SEM Serviço	L16b	30,75	8	2,82	2,52	21	4
1 partida COM Serviço	L17b	35,37	4				

acrescidas por hora nas viagens subseqüentes.

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

Os dados apontam para uma tendência à redução dos tempos de viagem e, por consequência, à disponibilização de mais ônibus para o serviço nas próximas partidas sem necessidade do aumento da frota. Observe-se que, pela lógica adotada na simulação, o horário de chegada na estação final do sentido “b” corresponde ao horário que o veículo passaria a estar disponível para uma nova partida no sentido “c”.

Ocorre que os horários de chegada dos veículos na estação Banespa corresponderam a “*headways*” bastante variáveis, como mostram os valores de desvio padrão dos intervalos entre as chegadas em Banespa.

A questão que se colocou ao término desta etapa é: como tornar mais regulares os intervalos entre as chegadas no final da linha, de maneira que as partidas seguintes sejam feitas em intervalos regulares?

Essa irregularidade é introduzida quando são integradas duas (ou três) Sub-linhas cada uma com características operacionais (frequência, “*headway*”, tempos de viagem). Essa diversidade de condições faz com que os resultados se mostrem “irregulares”.

Procurou-se inicialmente aplicar uma retenção de tempo em um dos veículos envolvidos em “*headways*” de pequena monta. Não foi possível chegar a uma regra para aplicação geral. A conclusão foi que seria necessária a construção de algoritmo(s) específico(s) para essa regularização, antevendo-se três possíveis caminhos:

- uma regra geral para o cálculo da retenção de veículos (“*holding*”), antes de liberá-los para as partidas no sentido “c”, de maneira a torná-las mais regulares;
- uma regra geral para aplicar o Controle de Velocidade dos ônibus no sentido “b” (onde foram aplicadas as Meias Viagens), antes da chegada em Banespa, fazendo com que eles cheguem ao final da viagem em intervalos regulares. Com a disponibilidade de ferramental de ITS, as duas opções são operacionalmente possíveis, como demonstrou-se ao longo deste trabalho.
- Uma possível combinação entre as duas modalidades acima que também requereria uma regra geral para sua aplicação.

4.2. LIMITAÇÃO DE PARADAS (“*SKIP-STOP*”)

4.2.1. **Redução nos Tempos de Percorso**

Como nesta modalidade as quantidades de estações sem prestação de serviço são menores do que na Meia Viagem, era de se esperar que as reduções nos tempos de viagem não fossem tão expressivos, Eles são mostrados na Tabela 36.

Tabela 36 - Resultados Simulação no VISSIM – “Skip-Stop” Tempos específicos e Tempos Totais em cada Sub-linha

SKIP-STOP INTENSIDADE DA INTERVENÇÃO	SUB- LINHA	VELOCIDADE (km/h)	TEMPOS (minutos)							
			MOVIMENTO	PARADA	SEMÁFOROS	TOTAL	TEMPO POR PARTIDA	TOTAIS SENTIDO b	TEMPO VIAGEM TOTAL	REDUÇÃO TEMPOS
Operação Normal	L10c	15,66	123,93	36,88	52,68	213,50	17,79	231,18	444,68	N/A
	L10b	14,95	139,62	25,00	66,57	231,18	19,27			
1 partida NÃO ATENDE 2 PARADAS	L21b	14,83	61,72	7,35	34,07	103,13	17,19	211,12	424,62	4,5%
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L22b	14,78	66,70	11,15	30,13	107,98	18,00			
1 part. NÃO ATENDE 3 PARADAS	L25b	15,27	64,07	6,77	34,30	105,13	17,52	210,10	423,60	4,7%
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L26b	15,20	65,82	11,45	27,70	104,97	17,49			
1 part. NÃO ATENDE 2 PARADAS	L27b	15,04	42,08	4,72	22,05	68,85	17,21	214,57	428,07	3,7%
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L28b	14,26	45,08	6,75	22,63	74,47	18,62			
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L29b	14,54	43,62	6,18	21,45	71,25	17,81	218,12	431,62	2,9%
2 parts. seguidas NÃO ATENDEM 2 PARADAS	L221b	14,85	87,45	11,83	43,52	142,80	17,85			
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L222b	13,63	41,98	10,63	22,70	75,32	18,83			

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

Como previsto, os resultados situam-se num patamar inferior aos da Meia Viagem oscilando entre 2,9% e 4,7% de redução nos tempos de percurso. O melhor resultado foi com a aplicação de uma partida sem atender 3 estações, seguida de uma partida prestando serviço normal. No entanto, a variação entre esta aplicação e a aplicação com “salto” de duas estações parece pouco significativa (0,2 pontos percentuais), podendo apontar para uma baixa sensibilidade no aumento de estações não servidas.

A menor redução foi observada na aplicação com duas partidas seguidas “saltando” duas estações, sucedidas por uma partida atendendo todas as estações, que reduziu os tempos em 2,9%. Neste caso, há a prevalência do número de partidas (2/3 do total de partidas) sem a prestação total dos serviços, o que acaba por triplicar as demandas com serviço normal.

Estes resultados, se confrontados com artigos citados na Revisão Bibliográfica, situam-se abaixo da faixa de 7,3% a 8% encontrados por (EBERLEIN, 1995), dos 7,3% obtidos por (FENG et al., 2013) e os cerca de 10% apontados por (GU; AMINI; CASSIDY, 2016). Estão bastante próximos aos 5,6% encontrados em (FU; LIU; CALAMAI, 2003) e dentro da faixa de 1,07% a 7,3% indicados por (CHIRAPHADHANAKUL; BARNHART, 2013). Esta comparação deve ser feita com cuidado. Primeiramente, as condições encontradas e as características e modelos empregados em cada trabalho são bastante diferentes, tanto é que a faixa de redução nesse grupo vai de 1,07% a 10%. Além disto, há que se considerar que no presente experimento, o trecho analisado é relativamente curto e o número de estações sem serviço é diminuto.

Isto posto, entende-se que os resultados alcançados estão condizentes com aqueles observados nos artigos científicos.

4.2.2. **Aumento de Oferta**

Os procedimentos de cálculo são os mesmos daqueles demonstrados na Meia Viagem. Os resultados são mostrados na Tabela 37.

Tabela 37 - Simulação VISSIM – “Skip-Stop” - Resultados - Aumento da Oferta

SKIP-STOP INTENSIDADE APLICAÇÃO	1 SUB- LINHA	2 TEMPO VIAGEM POR PARTIDA (min)	3 QUANTIDADE HORÁRIA DE PARTIDAS	HEADWAY NA CHEGADA		6 QUANTID. ÔNIBUS CHEGANDO 60 MINUTOS	7 VARIÇÃO RELAÇÃO À L10
				4 Média (min)	5 Desvio Padrão(min)		
Operação Normal	L10c	17,79	12	3,47	1,20	17	N/A
	L10b	19,27					
1 partida NÃO ATENDE 2 PARADAS	L11b	17,19	6	3,14	1,84	19	2
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L12b	18,00	6				
1 part. NÃO ATENDE 3 PARADAS	L13b	17,52	6	3,10	2,20	19	2
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L14b	17,49	6				
1 part. NÃO ATENDE 2 PARADAS	L11b	17,21	4	3,05	1,72	20	3
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L12b	18,62	4				
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L13b	17,81	4	3,17	2,17	19	2
2 parts. seguidas NÃO ATENDEM 2 PARADAS	L14b	17,85	8				
1 part. seguinte ATENDE TODAS PARADAS	L17b	18,83	4				

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

As mesmas tendências e os mesmos problemas encontrados na modalidade Meias Viagens são aqui observados, embora em escala relativamente menor, como menor é a intensidade da intervenção. Enquanto na modalidade anterior o acréscimo de frota adicional potencial variou de 2 a 4 partidas adicionais, aqui a potencialidade é reduzida para um máximo de 3 partidas, que pode ser considerado não desprezível. Observa-se que a variação de “headways” (desvios padrão), embora ainda elevada, situa-se em faixa inferior à encontrada na Meia Viagem, situando-se, aqui, entre 1,72 e 2,20 minutos enquanto na modalidade anterior variou entre 2,52 e 2,67 minutos. Se de um lado persiste a necessidade de regularização dos intervalos entre chegadas, também pode ser arguido se essa menor variação está, de algum modo, associada à menor variação dos ganhos dos tempos de percurso.

4.3. LINHA EXPRESSA

Já foram comentados anteriormente os aspectos que diferenciam a Linha Expressa das intervenções anteriormente analisadas: mesma natureza de intervenções com diferentes objetivos e aplicação em sentidos opostos na circulação.

Como os objetivos são diversos, também diversos são os aspectos analisados, embora ainda guardem alguns tipos de semelhança. O principal destes é a redução dos tempos de percurso.

4.3.1. **Redução nos tempos de viagem**

As reduções foram apuradas pelo mesmo método das intervenções anteriores, não obstante serem executadas no sentido inverso daquelas, ou seja, o sentido “c” (Bairro-Centro). Os resultados são mostrados na Tabela 38.

Tabela 38 - Resultados Simulação no VISSIM - Linha Expressa Tempos específicos e Tempos Totais em cada Sub-linha

LINHA EXPRESSA INTENSIDADE DA INTERVENÇÃO	SUB- LINHA	VELOCIDADE (km/h)	TEMPOS (minutos)							
			MOVIMENTO	PARADA	SEMÁFOROS	TOTAL	TEMPO POR PARTIDA	TOTAIS SENTIDO b	TEMPO VIAGEM TOTAL	REDUÇÃO TEMPOS
Operação Normal	L10c	15,66	123,93	36,88	52,68	213,50	17,79	231,18	444,68	N/A
	L10b	14,95	139,62	25,00	66,57	231,18	19,27			
1 partida EXPRESSA - Serve 3 Estações iniciais	L31c	17,38	63,92	6,57	29,52	100,00	16,67	211,47	442,65	0,5%
1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L32c	15,36	64,22	22,52	24,73	111,47	18,58			
1 partida EXPRESSA - Serve 3 Estações iniciais	L33c	18,69	39,63	3,73	18,22	61,58	15,40	216,38	447,57	-0,6%
1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L34c	15,44	41,92	15,48	17,05	74,45	18,61			
1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L35c	14,02	43,73	13,15	23,47	80,35	20,09			

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

Os ganhos em tempos de percurso nesta modalidade de intervenção resultaram mínimos para a aplicação de uma partida Expressa seguida de uma com serviço normal; e negativos para aplicação de uma partida Expressa para duas partidas seguidas com serviço normal; o ganho negativo representa que os tempos da Linha BÁSICA L10 são menores do que os tempos da Linha 3n em que foi aplicada a estratégia).

Nas Sub-linhas L31c e L32c se observado o ganho mínimo total pode estar associado aos tempos em Paradas, que são menores que na Sub-linha L10c em virtude do menor número de embarques, mas é compensado quase totalmente pelos tempos em movimento e em semáforos, que são maiores do que na Sub-linha L10c.

Nas Sub-linhas L33c, L34c e L35c o resultado é oposto: negativo quase na mesma proporção da aplicação anterior, apresentando o mesmo quadro de tempos parciais: os tempos maiores das 3 Sub-linhas sob intervenção em movimento e em semáforos acabam por anular e superar seus tempos de paradas.

Embora os valores finais de cada aplicação apresentem diferenças pouco significativas, há uma coerência entre eles: na Sub-linha L31c e L32c, a metade das partidas horárias é feita no modo Expressa. Nas três Sub-linhas seguintes, são apenas 4 partidas Expressas contra 8 partidas com serviço normal.

Essa coerência, entretanto, não deve esconder a questão principal: por que, nas condições em que foi feita a simulação, os resultados não foram minimamente próximos aos resultados das duas intervenções anteriormente analisadas?

Dois fatores poder ter exercido alguma influência negativa nos resultados, ambos relacionados com a escolha e a delimitação do trecho. O primeiro aspecto foi a extensão do trecho, com cerca de 5 km e 8 paradas, determinada por limitação de capacidade de processamento da versão disponível do software. Essa limitação afastou um dos aspectos importantes nas intervenções, principalmente da Linha Expressa e do “*Skip-stop*”. (CHIRAPHADHANAKUL; BARNHART, 2013) alertaram em seu artigo haver “...*uma forte relação entre o comprimento da viagem e o potencial dos serviços expressos. **Quanto maior o cumprimento da viagem, mais claramente se justifica a implantação de serviços expressos.***” (grifo nosso). (LEIVA et al., 2010), por sua vez, chegam à conclusão de que “...*os benefícios são maiores quanto maiores forem as extensões das viagens, assim como quanto maior for a variabilidade da demanda.*”. Também é expressivo que (EBERLEIN, 1995) empregou em seu trabalho uma linha com 52 estações divididas em dois sentidos, cada um com 26 paradas. As 8 estações por sentido aqui empregadas podem ter reduzido a potencialidade de resultados expressivos com esta intervenção.

O segundo fator foi a localização do trecho, a jusante da metade da linha no sentido Bairro-Centro. Nesta parte da linhas, as quantidades de desembarque já vêm crescendo. A linha expressa, provavelmente, apresentaria melhores resultados se localizada em seu início, próximo ao Terminal Varginha.

Os resultado no trecho escolhido, mais os aspectos acima abordados alertam que é desejável que os serviços expressos sejam implantados em trechos com maiores números de estações não atendidas, assim como em locais mais próximos das extremidades, onde as dimensões das demandas são maiores e mais pendulares.

4.3.2. Aumento de oferta

Embora persista a tendência de aumento de oferta de veículos no final da linha,

Tabela 39 - Simulação no VISSIM - Linha Expressa - Resultados Aumento Oferta

LINHA EXPRESSA INTENSIDADE APLICAÇÃO	1 SUB- LINHA	2 TEMPO VIAGEM POR PARTIDA (min)	3 QUANTIDADE HORÁRIA DE PARTIDAS	HEADWAY NA CHEGADA		6 QUANTID. ÔNIBUS CHEGANDO 60 MINUTOS	7 VARIÇÃO RELAÇÃO À L10
				4 Média (min)	5 Desvio Padrão(min)		
Operação Normal	L10c	17,79	12	3,47	1,20	17	N/A
	L10b	19,27					
1 partida EXPRESSA - Serve 3 Estações iniciais	L31c	16,67	6	3,23	1,95	18	1
1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L32c	18,58	6				
1 partida EXPRESSA - Serve 3 Estações iniciais	L33c	15,40	4	3,18	2,06	18	1
1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L34c	18,61	4				
1 partida seguinte - ATENDE TODAS AS PARADAS	L35c	20,09	4				

neste tipo de intervenção os valores são menores como mostra a Tabela 39.

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

Estes resultados refletem os resultados dos tempos de viagem. Embora tenham sido observados ganhos potenciais de um veículo a mais nas duas aplicações, como os ganhos são muito estreitos e os desvios padrão elevados, esses números devem ser olhados com cautela.

4.3.3. Benefícios - Ganhos de tempos de viagem pelos passageiros

As reduções de tempos de viagem foram calculadas a partir de Relatório do VISSIM contendo os tempos de percurso por trecho (entre estações) e do volume de passageiros embarcados por hora nos mesmos trechos. Foram apurados esses valores para a Sub-linha L10c e para as Sub-linhas L3nc nas duas aplicações feitas. Os tempos de viagem por trecho das Sub-linhas L3nc foram comparados com os mesmos valores da L10C. As diferenças (que podem ser negativas, representando perdas) foram então multiplicadas pelo número de passageiros embarcados nos respectivos trechos obtendo-se o indicador Ganhos de Tempo Totais por Trecho, expresso em passageiros x minutos. Os resultados desses resultados foram somados para obtenção dos valores totais dos Benefícios (ou perdas). Os resultados são mostrados nas Tabelas 40 e 41.

Tabela 40 - Linha Expressa - Benefícios - Sub-Linhas L31c e L32c

TRECHOS		1	2	3	5	6	7	8
Estações	Número	TEMPOS TOTAIS L10c (min)	TEMPOS TOTAIS (min)			Δ TEMPOS (3)-(5)	PASSAGEIROS (unids)	PASSAGS. x TEMPOS (pax x min) (6)x(7)
			L31c	L32c	TOTAIS			
BAN-RPT	Trecho 1	35,2	18,6	15,2	33,7	1,5	898	1.317,1
RPT-MOR	Trecho 2	20,6	10,8	10,1	20,9	-0,4	921	-322,4
MOR-VMO	Trecho 3	52,2	22,0	28,1	50,2	2,0	881	1.791,4
VMO-POR	Trecho 4	18,8	7,6	9,3	16,8	2,0	832	1.636,3
POR-EUC	Trecho 5	30,6	14,4	18,7	33,1	-2,5	798	-2.021,6
EUC-FIA	Trecho 6	33,6	15,4	17,7	33,1	0,5	705	340,8
FIA-ABR	Trecho 7	22,7	11,4	12,3	23,7	-1,0	567	-585,9
TOTAIS		213,5	100,0	111,5	211,5	2,0	N/A	2.155,6

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

Tabela 41 - Linha Expressa - Benefícios - Sub-Linhas L33c, L34c e L35c

TRECHOS		1	2	3	4	5	6	7	8
Estações	Número	TEMPOS TOTAIS L10c (min)	TEMPOS TOTAIS (min)				Δ TEMPOS (3)-(5)	PASSAGEIROS (unids)	PASSAGS. x TEMPOS (pax x min) (6)x(7)
			L33c	L34c	L35c	TOTAIS			
BAN-RPT	Trecho 1	35,2	10,1	10,8	11,2	32,1	3,1	898	2.768,8
RPT-MOR	Trecho 2	20,6	5,9	5,2	9,3	20,4	0,1	921	138,1
MOR-VMO	Trecho 3	52,2	13,9	20,2	21,2	55,2	-3,0	881	-2.643,0
VMO-POR	Trecho 4	18,8	3,6	6,2	4,8	14,5	4,3	832	3.536,0
POR-EUC	Trecho 5	30,6	11,3	12,4	11,5	35,2	-4,6	798	-3.657,5
EUC-FIA	Trecho 6	33,6	9,0	11,7	13,5	34,1	-0,6	705	-399,5
FIA-ABR	Trecho 7	22,7	7,9	8,1	8,8	24,9	-2,2	567	-1.256,9
TOTAIS		213,5	61,6	74,5	80,4	216,4	-2,9	N/A	-1.513,9

FONTE: Autor, a partir de resultados apresentados pelo sistema VISSIM

Os resultados aqui também refletem os resultados iniciais dos tempos de viagem. Observe-se que embora as diferenças entre os resultados dos tempos de viagem fossem pequenas, os números finais nestas duas tabelas parecem mais vigorosos. Há que se notar que esse indicador poderia ser indicado em passageiros x hora, que corresponderia quantas horas os passageiros ganharam ou perderam com a intervenção. A conversão dos dois valores finais das tabelas para esta unidade resultaria, respectivamente em 35,93 e -25,32 passageiros x hora que são valores bastante reduzidos se considerado o volume de passageiros embarcados.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entende-se que, no geral, as simulações podem ser consideradas bem-sucedidas. Do ponto de vista do processo, as escolhas da cidade, do sistema de ônibus, do Corredor e da Linha analisada mostraram-se adequadas, pois atenderam aos requisitos inicialmente estabelecidos que, por sua vez, também mostraram-se

conforme as necessidades. O único reparo, que pode ser encarados como “forçados pelas circunstâncias”, foram a extensão do trecho simulado e sua localização relativa no conjunto da linha, que já foram mostrados anteriormente.

A escolha do sistema VISSIM igualmente foi positiva. As simplificações e os artifícios que foram requeridos ao longo do processo, não parecem incomuns nesse tipo de modelagem.

A coleta de dados foi bastante profícua, permitindo reduzir uma parte razoável das simplificações que são comuns neste tipo de iniciativa.

Conseguiu-se montar uma metodologia para a estruturação das simulações, com embarques e desembarques e carregamentos por trecho bem definidos, tendo sido necessária a montagem de um conjunto de Sub-linhas e também o método para as integrar de volta, de maneira que, ao final da apuração, funcionassem como se fosse uma só linha.

Os resultados das simulações podem ser vistos sob dois pontos de vista. Internamente, isto é as proporções dos resultados entre si e sua razoabilidade em relação ao tipo e intensidade de intervenção efetuadas mostraram-se bem alinhadas e balanceadas. Em relação aos experimentos e desenvolvimentos analisados na Revisão Bibliográfica, os resultados mostraram-se conformes, na medida que se encaixaram nas faixas alcançadas pelos estudos.

O ponto negativo foi a experiência da Linha Expressa, sobre a qual havia uma expectativa elevada, mas que foi frustrada pelos prováveis motivos já discutidos, associados às limitações da extensão da rede e da localização relativa do trecho analisado, diga-se, forçados pelas circunstâncias. De qualquer modo, essa face não positiva serviu para demonstrar não o que deve ser evitado em estudos como este.

5. CONCLUSÕES

A Revisão Bibliográfica demonstrou o robusto crescimento de estudos acadêmicos voltados à melhoria do desempenho dos sistemas de ônibus urbanos, principalmente a partir do advento do ferramental de ITS.

Observou-se também um certo distanciamento entre os objetivos mais comuns do material pesquisado com o objetivo da presente Dissertação. Esta ocupa-se de buscar características funcionais das intervenções, requisitos tecnológicos e os resultados mais comuns observados em cada uma. Em contrapartida, os artigos disponíveis, em sua maioria, têm como objetivos o desenvolvimento e teste de algoritmos e modelos dedicados a aperfeiçoar os instrumentos que permitem a aplicação mais precisa das estratégias.

Os artigos consultados, entretanto, permitiram uma visão abrangente e suficientemente detalhada das diversas modalidades de intervenção e as condições em que se produzem os melhores resultados. O levantamento bibliográfico também conduziu ao domínio das faixas de resultados que podem ser esperadas de cada intervenção, bem como de suas limitações.

Em princípio, foi demonstrado que esse conjunto de estratégias operacionais tende a instalar-se de maneira firme e duradoura entre os processos e procedimentos operacionais nos sistemas de ônibus, como já estão instalados há muitas décadas nos sistemas metroferroviários. A tendência está associada ao progressivo incremento do uso de ferramental de ITS nas diversas atividades para o planejamento, a programação, a operação e a pós-operação dos sistemas de ônibus urbanos.

Esta conclusão por sua vez, leva a um questionamento. As Programações dos Serviços de ônibus são, ao mesmo tempo, instrumentos operacionais, na medida em que especificam os serviços; e também instrumentos contratuais, por estarem associadas à forma de remuneração dos operadores. Esta última função faz com que aqueles documentos sejam dotados de certa rigidez: a alteração frequente das Tabelas Horárias pode infringir dispositivos contratuais.

Por outro lado, esta Dissertação mostra que as intervenções operacionais, tanto as programadas com antecedência, mas, em particular, as de caráter dinâmico, calculadas e aplicadas durante a operação dos serviços, podem levar ao conceito de “programação flexível”. Esta possível modalidade parte de uma referência inicial podendo ou devendo adotar novas programações ao longo da produção dos

serviços, como já é uso nos sistemas metroferroviários. A questão levantada é: como serão as Programações de Serviços no futuro e como sua possível flexibilidade seria harmonizada com os dispositivos contratuais?

Em outra vertente, esta dissertação escapou do sentido estrito do conceito de “intervenção operacional” ao abordar facilidades de infraestrutura cuja aplicação antecede a operação dos serviços. Entende-se, no entanto, que esta iniciativa foi interessante para reforçar a ideia de que os cuidados com a melhoria operacional das redes não está restrita meramente à estratégias aplicadas durante a operação, mas devem compor os projetos de infraestrutura dos sistemas. Mostrou também que os resultados oferecidos por essas facilidades são maiores e mais robustos do que os obtidos nas intervenções operacionais. Esta reflexão não deve, em absoluto, levar a conclusão que as intervenções não são importantes. Sua importância, como se viu ao longo dos estudos analisados, está intimamente associada ao restabelecimento da eficiência e da regularidade dos serviços frente às contingências enfrentadas pelos ônibus em sua convivência com os demais atores nas vias urbanas.

Com relação ao teste realizado com as três modalidades de intervenção, entende-se que a realização foi bem sucedida, visto ter chegado a resultados consistentes. Os resultados obtidos situaram-se muito próximos das faixas encontradas nos diversos trabalhos consultados o que pode ser um indicador de sua consistência.

Possivelmente, os resultados teriam sido mais positivos não fosse a localização do trecho a jusante da metade da linha no sentido Bairro-Centro que é o sentido com maior demanda na Hora de Pico da Manhã. Neste sentido, a linha estudada já apresenta um perfil de demandas com mais desembarque do que embarques. A pendularidade, condição desejável para a aplicação de qualquer uma das três modalidades, é mais pronunciada no trecho inicial da linha, seu ponto mais periférico. Essa questão já foi citada ao discutir-se a escolha do trecho, mostrando que na região periférica o Corredor Santo Amaro apresenta interrupções em sua configuração física, o que dificultaria o melhor desempenho da simulação.

De outra parte, foi demonstrado que a processo de simulação logrou desenvolver um método próprio para chegar às respostas desejadas, embasado em dados copiosos e conseguindo montar procedimentos para chegar às soluções.

Reduzindo o foco para uma visão individualizada das modalidades de intervenção, os resultados permitem a conclusão de que as Meias Viagens e as Paradas

Limitadas (“Skip-stop”) apresentaram resultados mais regulares, consistentes e condizíveis com a abrangência das intervenções.

Do ponto de vista da relação com os usuários, a Meia Viagem e a Linha Expressa distinguem-se das Paradas Limitadas por, em princípio, não provocarem sensação de incômodo nos usuários. A Meia Viagem, ao chegar ao Terminal Final, simplesmente declara a não prestação do serviço. A Linha Expressa constitui-se, na prática numa segunda linha diferente da linha normal, que pode ser informada antecipadamente para os potenciais usuários. Nenhuma delas desperta no usuário, a sensação de que “o ônibus não parou”, como acontece nas Paradas Limitadas. Nesta modalidade, para evitar o incômodo, seria necessária a divulgação intensiva de informações nas Estações e nos veículos, o que ainda poderia não ser suficiente para aplacar a insatisfação dos usuários não atendidos. Assentindo com esta preocupação, em seu artigo, (GU; AMINI; CASSIDY, 2016) dotaram uma das alternativas estudadas da possibilidade de passageiros embarcados num serviço de Paradas Limitadas poderem desembarcar em estações que não seriam servidas; nestes casos, o embarque também seria permitido. Pelo exposto, Meias Viagens e Linha Expressa aparentam maior potencial de aplicação nas cidades brasileiras.

Igualmente positivo foi demonstrar que essas iniciativas podem ser implantadas em Corredores nas grandes cidades brasileiras. Para isto é, no mínimo, desejável que os sistemas de ônibus estejam devidamente supridos com ferramental tecnológico (leia-se ITS) e capacitação técnica para a gestão da operação que inclui, entre outras habilidades, o domínio e uso intensivo do citado ferramental e uma sólida retaguarda operacional para o desenvolvimento constante de métodos para enfrentar as contingências operacionais.

Por último, cabe registrar que o Objetivo Principal de resenhar as intervenções operacionais e testar o desempenho de três modalidades foi atingido. O mesmo pode ser afirmado dos objetivos específicos: foi obtida uma visão dos sistemas de ônibus nas grandes cidades brasileiras e em outros países em desenvolvimento; foi procedida uma varredura abrangente e detalhada das experiências acadêmicas sobre as intervenções e foram realizados os testes com três intervenções diferentes que o presente estudo propunha.

5.1. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

O desenvolvimento da presente Dissertação permitiu, complementarmente às conclusões, a percepção de possibilidades de estudos futuros assim como de opções metodológicas que poderiam enriquecer novos trabalhos evitando eventuais falhas ou imperfeições aqui presentes.

Olhando para a metodologia, em trabalhos dedicados ao estudo das intervenções operacionais, particularmente com aplicação de simulações, é desejável que seu objeto, isto é o corredor ou sistema de ônibus selecionado tenha extensão maior do que o trecho selecionado para este estudo. Neste caso houve alguma limitação da licença disponível do Sistema VISSIM, mas, de qualquer maneira, será interessante trabalhar com trechos mais longos de corredor ou de sistemas de ônibus.

Prosseguindo no campo metodológico, sugere-se que a localização do trecho a ser estudado futuramente, se faça proximamente à extremidade periférica da linha, onde os fenômenos de pendularidade são mais percebidos no horário de Pico da Manhã.

Poderia ser interessante a adoção do estudo das mesmas intervenções sob uma outra vertente: a análise qualitativa de cada intervenção de modo a verificar, de maneira sistemática, sua aplicabilidade na realidade das cidades brasileiras e de seus sistemas de ônibus. Tal realidade não se restringe aos aspectos técnicos da operação (capacitação), mas também à cultura organizacional de gestores e operadores e, em escala ainda maior, de aspectos socioculturais de nossas populações urbanas. Esta análise poderia ser pensada por meio da confrontação dos requisitos relacionados a cada intervenção, dos atributos dos sistemas de ônibus das cidades e dos obstáculos socioculturais, particularmente aqueles associados à percepção que os usuários têm dos serviços de ônibus. Desse confronto parece ser possível extrair o grau de possibilidade técnica e o grau de aceitação e percepção dos usuários com cada tipo de intervenção.

REFERÊNCIAS

- ABKOWITZ, M.; EIGER, A.; ENGELSTEIN, I. Optimal control of headway variation on transit routes. *Journal of Advanced Transportation*, v. 20, n. 1, p. 73-88, 1986.
- AGUIAR, J. G. de; CORREIA, P. R. M. Como fazer bons mapas conceituais? Estabelecendo parâmetros de referências e propondo atividades de treinamento. *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, v. 13, p. 141-157, 2013.
- ALOUCHE, P. L.; NAKAGAWA, T. ITS no Setor Metroferroviário. In: *Sistemas Inteligentes de Transporte - Cadernos Técnicos ANTP nº 8*. São Paulo: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2012. p. 61-75.
- ANTP. A integração do transporte público urbano, um procedimento eficiente de organização operacional esta sob suspeita. *Revista dos Transportes Públicos - ANTP*, Ano 21, p. 77-86, 1999.
- ARBEX, R. O.; CUNHA, C. B. da. Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 81, p. 355-376, 2015..
- ARGOTE, J.; XUAN, Y.; GAYAH, V. V. Comparative analysis of various bus control strategies. *Ocf.Berkeley.Edu*, p. 20, 2012.
- AUGUSTO, E. Panorama do sistema de transporte público em Curitiba-pr. 2015. Trabalho Conclusão Pós Graduação. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2015.
- BARTHOLDI, J. J.; EISENSTEIN, D. D. A self-coordinating bus route to resist bus bunching. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 46, n. 4, p. 481-491, 2012.
- BORGES, C. M. D. M.; BOSSI, P.; OLIVEIRA, L. L. De. Viajantes da noite : quem são os usuários de ônibus na madrugada de São Paulo. In: *20º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito, . Anais... Santos-SP: Associação Nacional de Transporte Público - ANTP*, 2015.
- BREITHAUPT, M. (GIZ- Worldwide Panorama on BRT systems. In: *7ª Conferência Internacional de Ônibus, Istambul. Anais... Istambul: União Internacional de Transportes Públicos - UITP*, 2012.
- CAO, Z.; YUAN, Z.; LI, D. Estimation method for a skip-stop operation strategy for urban rail transit in China. *Journal of Modern Transportation*, v. 22, n. 3, p. 174-182, 2014.
- CASTRO, C. F. C. de; STRAMBI, O. Avaliação de fatores intervenientes nas emissões veiculares em corredores de ônibus: Estudo antes e depois utilizando modelo IVE. In: *XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte - ANPET*, May, Belo Horizonte, MG. Anais... Belo Horizonte, MG: ResearchGate, 2008.
- CATS, O.; JENELIUS, E. Planning for the unexpected: The value of reserve capacity for public transport network robustness. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 81, p. 47-61, 2015.
- CEDER, A.; WILSON, N. H. M. Bus network design. *Transportation Research Part B*, v. 20, n. 4, p. 331-344, 1986.
- CHEN, S.; ZHOU, R.; ZHOU, Y.; MAO, B. Computation on bus delay at stops in Beijing through statistical analysis. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2013, 2013.
- CHIRAPHADHANAKUL, V.; BARNHART, C. Incremental bus service design: Combining limited-stop and local bus services. *Public Transport*, v. 5, n. 1-2, p. 53-78, 2013.
- CORTÉS, C. E.; SÁEZ, D.; MILLA, F.; NÚÑES, A.; RIQUELME, M. Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 18, n. 5, p. 757-769, 2010.

CURY, P. Projeto SEMCO - Sistema de Controle de Tráfego em área de São Paulo. Boletim Técnico CET-SP, v. 7, p. 1-64, 1977. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/consultas/publicacoes/boletins-tecnicos.aspx>>.

DAGANZO, C. F. A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 43, n. 10, p. 913-921, 2009.

DARIDO, G. B.; PENA, I. G. B. Planejamento em Sistemas de Transportes Inteligentes (ITS) - Perspectivas das experiências internacionais. In: *Sistemas Inteligentes de Transporte - Cadernos Técnicos ANTP nº 8*. São Paulo: Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP, 2012. p. 10-48.

DELGADO, F.; MUÑOZ, J. C.; GIESEN, R.; CIPRIANO, A. Real-Time Control of Buses in a Transit Corridor Based on Vehicle Holding and Boarding Limits. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2090, p. 59-67, 2009.

DERRIBLE, S.; KENNEDY, C. Characterizing metro networks: State, form, and structure. *Transportation*, v. 37, n. 2, p. 275-297, 2010.

DESHPANDE, V. Evaluation the impacts of transit signal priority strategies on traffic flow characteristics. 2003. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.

DUTRA, C. B.; BECKER, A. M. A experiência das faixas exclusivas para ônibus na cidade de Londrina - Paraná. Santos-SP 2015. Disponível em: <http://www1.londrina.pr.gov.br/dados/images/stories/Storage/ippul/transito/faixa_exclusiva_londrina_antp_31_03_2015.pdf>.

EBERLEIN, X. J. Real-time control strategies in transit operations: models and analysis. 1995. Thesis for PhD. Massachusetts Institute of Technology.

MITEKEILA, W.; SAYED, T.; EL ESAWEY, M. Development of Dynamic Transit Signal Priority Strategy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2111, n. June 2009, p. 1-9, 2009.

FARO, C. de; SILVA, S. L. Q. da. A década de 50 e o Programa de Metas. In: CPDOC, C. DE P. E H. C. DO B. (Ed.). *O Brasil de JK*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1991. p. 67-105.

FENG, S.; WEN-TAO, Z.; YING, Y.; DIAN-HAI, W. Optimal skip-stop schedule under mixed traffic conditions for minimizing travel time of passengers. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2013, 2013.

FENG, Y.; HEAD, K. L.; KHOSHMAHAM, S.; ZAMANIPOUR, M. A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 55, p. 460-473, 2015.

FERIANCIC, G.; O'KEEFE, D. Smart Steps - Big Data para as Cidades Inteligentes. In: 20º Congresso Brasileiro de Trânsito e Transportes, May, Santos-SP. Anais... Santos-SP: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2015.

FERREIRA, M. L.; GOUVEIA, J. A. M. de; FACCHINI, E.; POKORNY, M. S.; DIAS, E. M. Real time monitoring of public transit passenger flows through Radio Frequency Identification - RFID technology embedded in fare smart cards. *Latest Trends on Systems*, v. II, p. 599-605, 2012.

FERREIRA, M. L.; MARTE, C. L.; MEDEIROS, J. E. L. de; SAKURAI, C. A.; FONTANA, C. F. RFID for Real Time Passenger Monitoring. *Recent Advances in Electrical Engineering* 23, p. 170-175, 2013.

FU, L.; LIU, Q.; CALAMAI, P. Real-Time Optimization Model for Dynamic Scheduling of Transit Operations. *Transportation Research Record*, n. 1857, p. 48-55, 2003.

- FURTH, P. G. Alternating Deadheading in Bus Route Operations. *Transportation Science*, v. 19, n. 1, p. 13-28, 1985.
- FURTH, P. G. Zone Route Design for Transit Corridors. *Transportation Science*, v. 20, n. 1, p. 1-12, 1986.
- GARDNER, K.; SOUZA, C. D.; HOUNSELL, N.; SHRESTHA, B.; BRETHERTON, D. UITP WORKING GROUP: Interaction of buses and signals at road crossings Deliverable 1 Review of Bus Priority at Traffic Signals around the World *Transportation Research*. [s.l.: s.n.].
- GE, Q.; POSCHINGER, A.; MÜCK, J. A New Split Optimization Algorithm Based on a Decision Matrix. *TEC - Traffic, Engineering and Control*, v. 55, n. 3, p. 105-107, 2014.
- GU, W.; AMINI, Z.; CASSIDY, M. J. Exploring alternative service schemes for busy transit corridors. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 93, p. 126-145, 2016.
- HEDDEBAUT, O.; FINN, B.; RABUEL, S.; RAMBAUD, F. The European bus with a high level of service (BHLS): Concept and practice. *Built Environment*, v. 36, n. 3, p. 307-316, 2010.
- HICKMAN, M. D. An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem. *Transportation Science Publication*, v. 35, n. 3, p. 215-237, 2001..
- HIDALGO, D.; GUTIÉRREZ, L. BRT and BHLS around the world: Explosive growth, large positive impacts and many issues outstanding. *Research in Transportation Economics*, v. 39, n. 1, p. 8-13, 2013.
- HOUNSELL, N. B.; SHRESTHA, B. P.; HEAD, J. R.; PALMER, S.; BOWEN, T. The way ahead for London's bus priority at traffic signals. *IET Intelligent Transport Systems*, v. 2, n. 3, p. 193, 2008a..
- HOUNSELL, N. B.; SHRESTHA, B. P.; MCLEOD, F. N.; GARDNER, K.; PALMER, S.; BOWEN, T. Selective Vehicle Detection (SVD) - Bus Priority and GPS Technology. *Association for European Transport and contributors*, v. 5, p. 1-17, 2005.
- HOUNSELL, N. B.; SHRESTHA, B. P.; PALMER, S.; BOWEN, T.; SOUZA, C. New Strategy Options for Bus Priority at Traffic Signals in London. In: *ETC - European Transport Conference 2008*. L. Anais... Noordwijkerhout, NL: Association for European Transport - AET, 2008b.
- HUNT, P. B.; ROBERTSON, D. I.; BRETHERTON, R. D.; ROYLE, M. C. The SCOOT on-line Traffic Signal Optimisation Technique. *ITraffic Engineering & Control*, v. 23, n. 4, p. 190-192, 1982.
- IBARRA-ROJAS, O. J.; DELGADO, F.; GIESEN, R.; MUÑOZ, J. C. Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 77, p. 38-75, 2015.
- IDEC, I. B. de D. do C. Análise das infraestruturas de priorização do transporte coletivo sobre pneus nas 12 capitais mais populosas do Brasil. São Paulo-SP. 12 p . 12 p.
- ITDP, I. for T. & D. P. Manual de BRT: Bus Rapid Transit. Brasília-DF: Ministério das Cidades. Brasília-DF. 884 p. 2008.
- ITDP, I. for T. & D. P. Padrão De Qualidade BRT - Versão em Português. Rio de Janeiro-RJ. 56 p. 2014
- KIM, S.; PARK, M.; CHON, K. S. Bus signal priority strategies for Multi-directional bus routes. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 16, n. 5, p. 855-861, 2012.
- KOEHLER, L. A.; KRAUS JR, W.; CAMPONOVARA, E. Controle de Retenção para Sistemas de Transporte Público. (ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ed.) In: *XXI Congresso ANPET*, Março, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: 2015.

LARA, F. F. De; MARX, R. Análise Comparativa do Padrão de Qualidade dos Corredores e Ônibus da Cidade de São Paulo com o Padrão de Qualidade do Bus Rapid Transit. FACEF Pesquisa: Desenvolvimento e Gestão, v. 17, n. 1, p. 21-36, 2014.

LARRAIN, H.; GIESEN, R.; MUÑOZ, J. C. Choosing the Right Express Services for Bus Corridor with Capacity Restrictions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2197, p. 63-70, 2011.

LARRAIN, H.; MUÑOZ, J. C. When and Where are Express Bus Services Justified? Transportmetrica A: Transport Science, v. 9935, n. March, p. 811-831, 2016.

LARWIN, T.; GRAY, G.; KELLEY, N. Bus Rapid Transit: A Handbook for Partners. Mineta Transportation Institute - College of Business - San José State University. San Jose-CA. 84p. 2007.

LEIVA, C.; MUÑOZ, J. C.; GIESEN, R.; LARRAIN, H. Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints. Transportation Research Part B: Methodological, v. 44, n. 10, p. 1186-1201, 2010.

LEVINSON, H. S. Analyzing transit travel time performance. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 915, p. 1-6, 1983.

LI, F.; DUAN, Z.; YANG, D. Dwell time estimation models for bus rapid transit stations. Journal of Modern Transportation, v. 20, n. 3, p. 168-177, 2012.

LI, Y.; KOONCE, P.; LI, M.; ZHOU, K.; LI, Y.; BEAIRD, S.; ZHANG, W.-B.; HEGEN, L.; KANG, H.; SCABARDONIS, A.; SUN, Z. S. Transit Signal Priority Research Tools - U.S. Department of Transportation - USDOT. University of California. Washington, DC. 2008. 126 p..

LIU, Z.; YAN, Y.; QU, X.; ZHANG, Y. Bus stop-skipping scheme with random travel time. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 35, p. 46-56, 2013.

LIZANA, P.; MUÑOZ, J. C.; GIESEN, R.; DELGADO, F. Bus control strategy application: Case study of santiago transit system. Procedia Computer Science, v. 32, p. 397-404, 2014.

MA, W.; XIE, H.; HAN, B. Development and evaluation of an economic-driving assistance program for transit vehicles. Energies, v. 5, n. 2, p. 371-385, 2012.

MAGALHÃES, C. T. de A.; BALASSIANO, R. Análise qualitativa do uso de sistemas de rastreamento por GPS no setor de fiscalização do transporte público: o caso do município de Uberlândia. [s.d.] Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 16 p. [s.d.]

MARTE, C. L.; SILVA, A. L. da; DANTAS, A.; AZEVEDO, D. B.; SEPULCRI N^o, JOSÉ CARLOS MARQUEZ, J. M.; GRILLO, J.; CERENTINI, S. A. P. Estudo Preliminar De Funções ITS Aplicadas na Operação de Sistemas BRT. Sistemas Inteligentes de Transporte - Cadernos Técnicos ANTP n^o 8, v. 8, p. 100-121, 2012.

MARTINELLI, J. C. N.; AROUCHA, M. O. G. Estágio Atual da Bilhetagem Eletrônica. In: Sistemas Inteligentes de Transporte - Cadernos Técnicos ANTP n^o 8. São Paulo: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2012. p. 76-99.

MAURO, V.; DI TARANTO, C. UTOPIA. Utopia In: Control, Computers, Communications in Transportation. [s.l.] Elsevier, 1990. p. 245-252. Paris-FR

MEGGINSON, L. C.; MOSLEY, D. C.; PIETRI, P. H. J.; HOPP, M. I. Administração: conceitos e aplicações. 4^a Edição. Harbra. [s.l: s.n.] .

MIRCHANDANI, P.; HEAD, L. A real-time traffic signal control system: Architecture, algorithms, and analysis. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 9, n. 6, p. 415-432, 2001.

MIRCHANDANI, P.; WANG, F.-Y. RHODES to intelligent transportation systems. IEEE Intelligent

Systems, v. 20, p. 10-15, 2005.

MORENO NETO, F. São Paulo e a racionalização do uso do combustível. Boletim Técnico CET, v. 3, 1977.

MULLEY, C. No Car Lanes or Bus Lanes - which is best? Traffic Engineering & Control, v. 51, n. 11, p. 433-439, 2010.

MULTISYSTEMS INC. Route-Level Demand Models: A Review. [s.l.: s.n.].

MUÑOZ, J. C.; CORTÉS, C. E.; GIESEN, R.; SÁEZ, D.; DELGADO, F.; VALENCIA, F.; CIPRIANO, A. Comparison of dynamic control strategies for transit operations. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 28, p. 101-113, 2013.

NEWELL, G. F.; POTTS, R. B. Maintaining a Bus Schedule. (A. R. R. B. ARRB, Ed.) In: 2nd Conference AARB, Melbourne - Austrália. Anais... Melbourne - Austrália: Elsevier Ltd, 1964.

NOVAK, J. D.; CAÑAS, A. J. A teoria subjacente aos mapas conceituais e como elaborá-los e usá-los. Práxis Educativa, v. 5, n. 1, p. 9-29, 2010..

OSUNA, E. E.; NEWELL, G. F. Control Strategies for an Idealized Public Transportation System. Transportation Scienc, v. 6, n. 1, p. 52-72, 1972.

PEREIRA, A. L. S. ITS nos Transportes Públicos: pode entrar desacompanhado? - Estudo de. In: 20º Congresso Brasileiro de Trânsito e Transportes, Santos-SP. Anais... Santos-SP: Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP, 2015.

PERON, L. Contribuição metodológica para aplicação de prioridade semafórica em corredores de ônibus. 2017. Escola Politécnica - Universidade de São Paulo - USP, 2017. Disponível em: <www.teses.usp.br/>.

PHILLIPS, W.; DEL RIO, A.; MUÑOZ, J. C.; DELGADO, F.; GIESEN, R. Quantifying the effects of driver non-compliance and communication system failure in the performance of real-time bus control strategies. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 78, p. 463-472, 2015.

SÁEZ, D.; CORTÉS, C. E.; MILLA, F.; NÚÑES, A.; TIRACHINI, A.; RIQUELME, M. Hybrid predictive control strategy for a public transport system with uncertain demand. Transportmetrica, v. 8, n. January 2014, p. 37-41, 2012.

SANTOS, M. A urbanização brasileira. 5ª-3ª re ed. São Paulo: EDUSP, Editora da Universidade de São Paulo -, 1993.

SÃO PAULO, P. do M. Matriz de Velocidades Médias de Descolamento dos Ônibus 2009-2017.

Disponível em:

<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/aceso_a_informacao/index.php?p=147816>. Acesso em: 6-out-2018.

SILVERMAN, N. C. Limited Stop Bus Service at New York City Transit. Journal of Transportantion Engineer., v. 124, n. 6, p. 503-509, 1998.

SOUZA, C. D.; GARDNER, K.; HOUNSELL, N. B.; SHRESTHA, B. P. New Developments for Bus Priority at Traffic Signal in London Using Bus - iBUS. In: IET Road Transport Information and Control Conference, London, UK. Anais... London, UK: IET Digital Library, 2010.

SPTRANS, S. P. T. S. A. Sistemas Informatizados para a Gestão do Transporte Coletivo do Município de São Paulo. Disponível em:

<http://www.sptrans.com.br/pdf/biblioteca_tecnica/SISTEMAS_INFORMATIZADOS_PARA_A_GESTA_O_DO_TRANSPORTE.pdf>.

SUN, A.; HICKMAN, M. The Real-Time Stop-Skipping Problem. Journal of Intelligent Transportation

Systems, v. 9, n. 2, p. 91-109, 2005. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15472450590934642>>.

SUN, L.; TIRACHINI, A.; AXHAUSEN, K. W.; ERATH, A.; LEE, D. H. Models of bus boarding and alighting dynamics. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 69, p. 447-460, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2014.09.007>>.

SUNKARI, S. R.; BEASLEY, P. S.; URBANIK II, T.; FAMBRO, D. B. A Model to evaluate the impacts of Bus Priority on Signalized Intersections. 1994.

TANABORIBOON, B. Y.; TOONIM, S. Impact Study of Bus Lanes in Bangkok. *Journal of Transportation Engineering*, v. 109, n. 2, p. 247-256, 1983.

TATTO, J. Mobilidade urbana em são paulo : aplicação de soluções imediatas e eficazes. Dissertação Mestrado. Universidade de São Paulo - USP, 2015.

TENG, J.; JIN, W. Development and evaluation of bus operation control system based on cooperative speed guidance. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2015, 2015.

TFL, T. for L. iBus - End of Project Report. London-UK. 27 p. 2009. Disponível em: <https://www.whatdotheyknow.com/request/ibus_project_document?unfold=1>.

TIRACHINI, A. Bus dwell time: The effect of different fare collection systems, bus floor level and age of passengers. *Transportmetrica A: Transport Science*, v. 9, n. 1, p. 28-49, 2013a.

TIRACHINI, A. Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 30, p. 239-256, 2013b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2011.11.007>>.

TIZNADO, I.; GALILEA, P.; DELGADO, F.; NIEHAUS, M. Incentive schemes for bus drivers : The case of the public transit system in Santiago , Chile. *Research in Transportation Economics*, v. 48, p. 77-83, 2014.

VALENCIA, A.; FERNANDEZ, R. A method to calculate commercial speed on bus corridors. *Traffic Engineering & Control*, v. 56, n. 6, p. 215-221, 2012.

VASCONCELLOS, E. A.; MENDONÇA, A. Política Nacional de Transporte Público no Brasil: organização e implantação de corredores de ônibus. *Revista dos Transportes Públicos - Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP*, v. 3o quadrim, n. 126, 2010.

VUCHIC, V. R. Bus semirapid transit mode development and evaluation. *Journal of Public Transportation*, v. 5, n. 2, p. 71-96, 2002.

WADJAS, Y.; FURTH, P. G. Using Advanced Detection. *Transportation Research Record*, v. 1856, p. 220-229, 2003.

WAKAI, F. S. Y.; HORTELLANI, F. D. Análise da dinâmica e desempenho de diferentes corredores de ônibus na cidade de São Paulo. 2017. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2017.

WU, W.; LIU, R.; JIN, W. Modelling bus bunching and holding control with vehicle overtaking and distributed passenger boarding behaviour. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 104, p. 175-197, 2017.

YANG, M.; WANG, W.; WANG, B.; HAN, J. Performance of the priority control strategies for bus rapid transit: Comparative study from scenario Microsimulation using VISSIM. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, v. 2013, 2013.

YU, B.; WANG, K.; PENG, Z.; WANG, C.; GAO, Z.; YAO, B. Dynamic extra buses scheduling strategy in public transport. *Promet - Traffic - Traffico*, v. 27, n. 3, p. 205-216, 2015.

YU, B.; YANG, Z.; LI, S. Real-time partway deadheading strategy based on transit service reliability assessment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 46, n. 8, p. 1265-1279, 2012.

ZHAO, J.; BUKKAPATNAM, S.; DESSOUKY, M. M. Distributed architecture for real-time coordination of bus holding in transit networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 4, n. 1, p. 43-51, 2003.