

ARNALDO LUÍS SANTOS PEREIRA

**Análise da Aplicabilidade de Estratégias Operacionais com uso de  
ITS em Sistemas de Ônibus de Cidades de Países em  
Desenvolvimento**

v.1

São Paulo

2017

ARNALDO LUÍS SANTOS PEREIRA

**Análise da Aplicabilidade de Estratégias Operacionais com uso de ITS em Sistemas de Ônibus de Cidades de Países em Desenvolvimento**

v.1

Dissertação a ser apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para Exame de Qualificação, como parte da obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de Transportes – Informações Espaciais

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Luiz Marte

São Paulo

2017

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo Principal	2
1.2. Objetivos específicos	2
<b>1.3. Antecedentes – A Evolução do Transporte Público por Ônibus nas Cidades Brasileiras</b>	<b>2</b>
1.3.1. O advento dos Corredores de Ônibus	5
1.3.2. O ferramental de ITS	7
1.3.3. Intensidade de uso do ferramental de ITS	8
1.3.3.1. Projeto das Redes	9
1.3.3.2. Especificação dos Serviços	9
1.3.3.3. Monitoração e Controle da Operação	10
1.3.4. O advento dos BRT – Bus Rapid Transit	10
1.3.5. A Reestruturação das Redes de Ônibus em Algumas Capitais Brasileiras	13
1.4. O Transporte Público em grandes cidades de países em desenvolvimento	15
1.5. Estrutura da Dissertação	16
1.6. Etapas já executadas e por executar	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1. Conceituação e Etapas do Planejamento de uma Rede de Transporte	18
2.1.1. Etapa de Projeto da Rede	21
2.1.2. Etapas de Configuração das Frequências e elaboração das Tabelas Horárias	23
2.1.3. Etapas de Programação da Frota, Programação das Tripulações e Escalas das Equipes	24
2.1.4. Etapa de Monitoração e Controle Operacionais	24
2.2. Intervenções a partir da Monitoração e do Controle Operacionais	26
2.2.1. Regularidade e Agrupamento de Veículos (“Bunching”)	30
2.3. Intervenções nas Estações	33
2.3.1. Paradas forçadas para regulação (“holdings”) -	33
2.3.1.1. Estudos pioneiros e Paradas para Regulação Programadas	34
2.3.1.2. Paradas Forçadas Dinâmicas (dados em tempo real)	35
2.3.2. Serviços com Paradas Limitadas (“skip stops”)	50
2.3.2.1. Conceitos e origens	50
2.3.2.2. Modelos de Limitação Programada de Paradas	52
2.3.2.3. Modelos de Limitação Dinâmica de Paradas	59
2.3.3. Meias Viagens (“deadheading”)	71
2.3.3.1. Conceito	71
2.3.3.2. Trabalhos Selecionados	72
2.4. Intervenções entre Estações	81
2.5. Conclusões e Comentários parciais	83
<b>3. METODOLOGIA</b>	<b>86</b>
3.1. Considerações Iniciais e Estruturação Básica	86
3.2. Análise Qualitativa	87
3.2.1. Caracterização dos Trabalhos Consultados	87
3.2.2. Formulação dos Atributos	89
3.2.2.1. Capacidade Tecnológica	89
3.2.2.2. Capacitação das Equipes	89
3.2.2.3. Condições Operacionais	90
3.2.2.4. Condições Institucionais e Contratuais	90
3.2.2.5. Condições Ambientais	90
3.2.3. Estratégicas frente a Atributos dos Serviços	91
3.3. Análise Quantitativa	96
<b>4. RESULTADOS</b>	<b>98</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>99</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE A - A EVOLUÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS NAS CIDADES BRASILEIRAS</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE B – TRABALHOS RELATIVOS A PARADAS PARA REGULAÇÃO</b>	<b>131</b>
<b>APÊNDICE C – TRABALHOS RELATIVOS A LIMITAÇÃO DE PARADAS</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE D – TRABALHOS RELATIVOS A MEIAS-VIAGENS – MV (“deadheading”)</b>	<b>188</b>

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

## 1. INTRODUÇÃO

Embora redundante no cenário técnico, não há como não reconhecer o quadro de externalidades negativas que a mobilidade nas grandes cidades provoca nas economias desses centros.

Também é generalizada a percepção de que esgotou-se o modelo de divisão modal com privilégios para o automóvel e a conseqüente busca por mais infraestrutura para o transporte individual: além de essa 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 é 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 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 maneira possível, de atendimento das demandas mais altas.

A partir de meados da década de 1990 os Sistemas de Transporte Inteligente (ITS na sigla em inglês) que, até então eram presentes apenas 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 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 dos ônibus urbanos. Essa busca não se restringe à mera aquisição de equipamentos e sistemas, mas também, se não prioritariamente, em várias outras frentes, como 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 desenvolvimento 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 a coleta de dados e informações das experiências acadêmicas voltadas ao desenvolvimento de métodos operacionais visando o aumento da regularidade, de modo a proporcionar subsídios para avaliar a sua aplicabilidade nas condições encontradas nos sistemas de ônibus dos grandes centros urbanos do Brasil e de outros países em desenvolvimento.

### **1.2. Objetivos específicos**

O Objetivo Principal pode ser desdobrado nos seguintes objetivos específicos:

- Traçar um panorama dos sistemas de ônibus nos grandes centros do Brasil e de outros países em desenvolvimento.
- Proceder ao levantamento e classificação de diversas experiências encontradas na literatura técnica.
- Proceder a análise qualitativa e quantitativa de cada método em relação às condições em que a operação dos ônibus é feita nos centros urbanos citados.

### **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).

Faro e Silva apud (PEREIRA; LESSA, 2011) mostram que as metas citadas foram suplantadas: construíram-se 14.970 km de rodovias e fabricaram-se 199.180 unidades de veículos.

Estava consolidado “rodoviarismo” <sup>1</sup>: da nova Capital federal em Goiás (igualmente meta 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

---

<sup>1</sup> 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 identificada, 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.

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.

, 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 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 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.

Cabe aqui uma observação: 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 dependem 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.

O resultado final consiste em menores tempos de viagem e com níveis de serviço mais elevados, embora represente, em geral para os usuários, maiores quantidades de transferências. Não obstante as desvantagens com que as transferências são vistas pelos usuários, elas constituíram-se num dos fatores de sucesso do sistema de Curitiba: desde o início os serviços foram organizados compostos pelas chamadas linhas locais (atendendo às diversas comunidades) e as linhas “expressas”, que proviam o transporte nas principais vias em direção ao centro da cidade.

Com a difusão da estruturação de redes no Brasil, aumentaram significativamente os tipos de linhas encontrados nos projetos de rede. Mais uma vez citando o caso de Curitiba, naquele sistema encontram-se hoje as modalidades de linhas mostradas na Tabela 1 a seguir:

**Tabela 1- Sistema de ônibus de Curitiba  
Tipos de Linhas - 2015**

TIPO DE LINHA	FUNÇÃO	VEÍCULOS	
		TIPO	CAPACIDADE (passags.)
EXPRESSAS	Transporte de massa da cidade. Vias próprias segregadas (Eixos estruturantes). Ligam os terminais de integração às áreas centrais. Paradas realizadas nas estações tubo.	Biarticulados	270
		Articulados	180
ALIMENTADORAS	Ligação entre os terminais de integração e os bairros.	capacidades variadas em função da demanda	N/D
INTERBAIROS	Interligam terminais e bairros de regiões diversas da cidade sem passar pela região central	Capacidades variadas	110 a 160
DIRETAS ("ligeirinho")	Auxiliares às expressas e interbairros - ligações pontuais mais distantes. Paradas médias a cada 3 km.	N/D	N/D
TRONCAIS	Ligação dos terminais de bairro ao centro	Capacidades variadas	96 a 160
INTERCIDADES	Ligação de municípios da região metropolitana aos terminais urbanos	N/D	94
CONVENCIONAIS	Ligação das áreas da cidade não atendidas pelos terminais de integração	Capacidades variadas	40 a 160
CIRCULAR CENTRO	Ligação entre pontos do centro expandido da cidade.	Micro-ônibus	N/D
INTER-HOSPITAIS	Atendimento de deslocamento entre hospitais, clínicas e laboratórios próximos à área central da cidade	Layout específico	22
MADRUGUEIROS	Atendimento noturno em períodos fora do horário de operação do sistema	N/D	N/D
SITES	Atendimento ao Sistema Integrado de Ensino Especial e às escolas para portadores deficiência física ou mental	Veículos adaptados às condições	N/D
AEROPORTO	Ligação do Aeroporto Internacional Afonso Pena à área central da capital	Micro-ônibus	N/D

FONTE: Panorama do Sistema de Transporte Público em Curitiba-PR (AUGUSTO, 2015)

### 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 (intertravamento). 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 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 muitos 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 técnicos envolvidos, resistências geradas por conta da “cultura empresarial”. Capítulo do Caderno Técnico publicado pela 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, como já foi descrito neste documento, 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 na 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) ao cálculo do tempo de percurso a partir das velocidades comerciais médias para o conjunto das linhas ou por trechos; (ii) especificação dos veículos com base em padrões de mercado ou de padrões do órgão, quando existentes; (iii) dimensionamento da frota com base nos dados de origem-destino disponíveis ou projetados; (iv) programação horária dos serviços por número de partidas. Não são numerosos os órgãos gestores que empregam sistemas de programação automática 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. Algumas dessas operadoras empregam sistemas específicos de programação.

#### 1.3.3.3. Monitoração e Controle da Operação

Nesse sentido, o caso da SPTRANS é emblemático. Há mais de dez anos, todos os 15.000 veículos da frota municipal de São Paulo são dotados de equipamentos embarcados capazes de proceder ao sensoriamento remoto, a 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 é 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 avanço mais recente nos desenvolvimentos para sistemas de ônibus: os 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:

- 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.
- 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 (Transmilênio), de Brisbane e de Otawa são os mais famosos. Esta modalidade não havia sido realmente implantada nos Estados Unidos até a data de elaboração do documento citado,.
- 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 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.” (ITDP, 2008). 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 as quantidades de 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 feitas para grupos 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, mais precisamente, da Engenharia de Operações de Sistemas de Transporte.

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

Seria desejável que, assim como nos metrô e ferrovias, o conjunto de projetos também abrangesse o Projeto Operacional que, em linhas gerais compreenderia: projeto de equipamentos e sistemas de ITS voltados às necessidades operacionais, estas, por sua vez, adequadas os objetivos finais do projeto; desenho da Organização da Operação, envolvendo as diversas unidades e instâncias responsáveis pela Operação e suas respectivas atribuições; mecanismos de programação, controle e

análises operacionais de modo a harmonizar a necessária flexibilidade operacional com a estrutura de comando operacional.

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 em 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 partir da década de 1990 surgiram e prosperaram as pressões de ordem legal e jurídica para que os Poderes Concedentes (Estados e Prefeituras) regularizassem as delegações para os Serviços de Ônibus por meio de licitações para Concessões 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 reduzir os custos por meio da reestruturação das redes. São encontrados

vários exemplos em que a licitação para as Concessões seja 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.

Nesta linha, 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 a integração entre os ônibus municipais e o metrô (recém-inaugurado) 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.

A evolução dos sistemas mostrada até aqui encontra-se detalhada no Apêndice A desta Dissertação.

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 estruturação 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**

São poucos os trabalhos que identificam a evolução dos transportes públicos em países em desenvolvimento. Por isto, este item será mais detalhado por ocasião do texto final da Dissertação. No entanto, alguns aspectos podem ser comentados em linhas gerais.

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, em especial aqueles com tendências de crescimento mais firmes, 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, quando haviam. 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, parece ser um caso diferente, na medida em que a desregulamentação foi instituída pelo governo militar, provocando, entretanto, 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 análise dos métodos e estratégias e no Capítulo 4 são apresentadas as duas análises a serem efetuadas. O Capítulo 5 encerra com as Conclusões e Comentários.

### **1.6. Etapas já executadas e por executar**



## **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 arquivos selecionados contendo experimentos relacionados à Programação e ou ao Controle Operacionais, 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 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 2, onde são indicados os dados de entradas e os produtos de cada nível.

**Tabela 2 - Planos de Redes**  
**Divisão do Planejamento da Rede em Etapas**

<b>ENTRADAS</b>	<b>ATIVIDADE</b>	<b>SAÍDAS</b>
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	NÍVEL C Desenvolvimento das Tabelas Horárias	Horários de Partida das viagens Horários de Chegada das viagens
Demanda por horário do dia		
Horários da primeira e última viagens		
Tempos de percurso	NÍVEL D Programação da Frota	Programação da Frota
Tempos ociosos		
Tempos de descanso		
Restrições à Programação		
Estrutura de Custos	NÍVEL E Programação das Equipes	Programação das Equipes
Regras Trabalhistas da tripulação		
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 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:

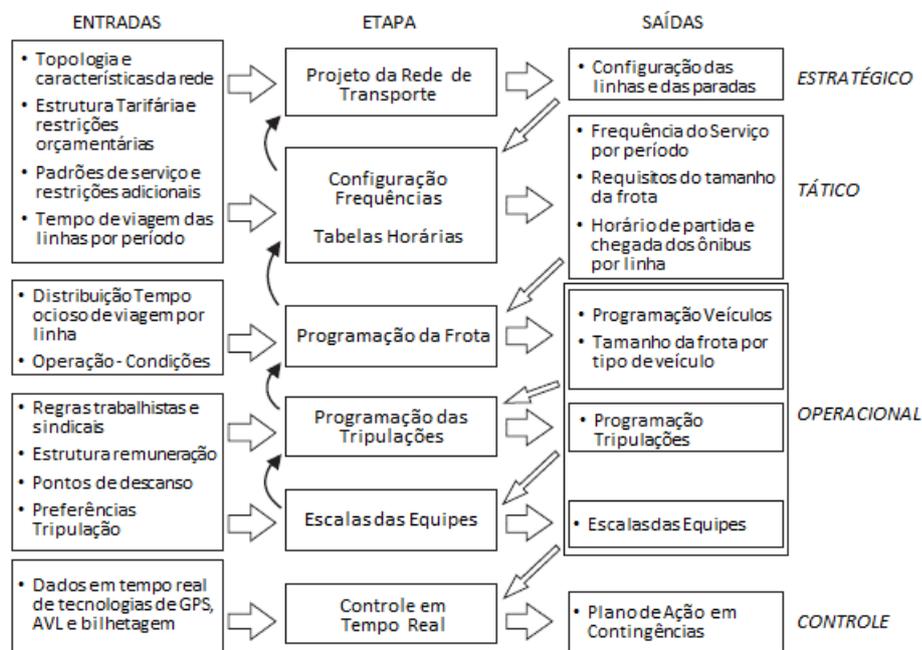
- PROJETO DA REDE – define os desenhos das linhas e suas características operacionais como tipo de linha, tipos de veículos, espaçamento entre paradas, etc., com o objetivo de otimizar funções objetivas e específicas como a minimização da soma ponderada dos custos dos operadores e dos usuários. Trata-se 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 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 TRIPULAÇÃO**<sup>2</sup> - 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, 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 gráfico de mesma natureza daquele apresentado na Figura 2, agora com maior detalhamento de entradas e acrescentando as interligações entre cada elemento. O resultado é mostrado na Figura 2 a seguir.

**Figura 2 - Projeto de Redes**  
**Divisão do Planejamento da Rede em Etapas e suas Inter-relações**



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

<sup>2</sup> 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.

Ibarra 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 linhas em operação. 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 et al (2015) à margem do gráfico mostrado na Figura 3. 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, ainda que de modo ligeiro, 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. Elas 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:

- 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 torna-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.”*

- 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 3 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.

### **2.1.4. Etapa de Monitoração e Controle Operacionais**

Esta fase, que já foi discutida em seus principais aspectos neste documento, 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 mecanismo 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.

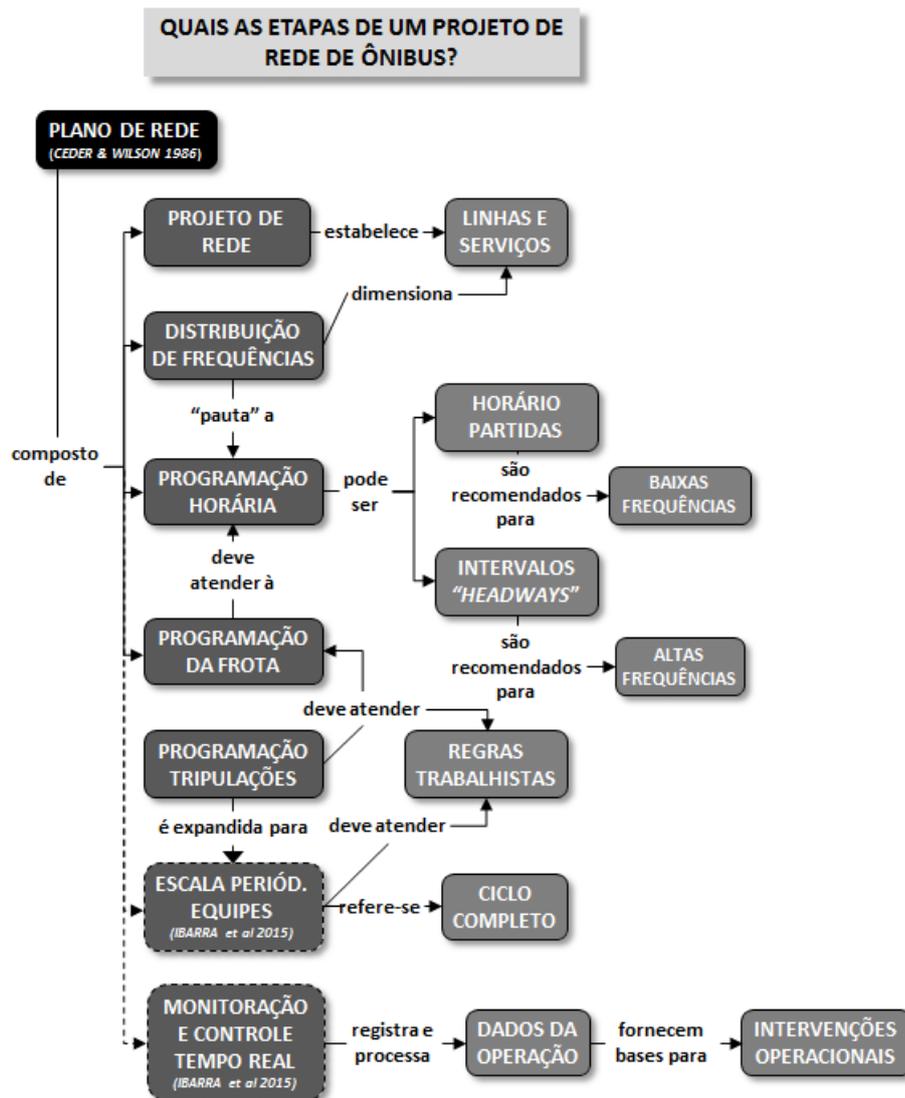
Todas essas possibilidades são reais nos sistemas metroferroviários que, como já foi visto anteriormente neste documento, dispõem há muito tempo dos ferramentais de ITS. Com variações em função de cada organização, é possível afirmar que nos operadores de metrô, a área responsável pela Programação Operacional 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 este trabalho. Essa 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 de alcance dificultoso para os ônibus; ser, em alguma medida, relevante para os usuários.

Com base nas etapas conceituadas até aqui foi elaborado o Mapa Conceitual constante da Figura 3 que procura resumir a estrutura genérica de um Plano de Rede segundo os autores consultados.

**Figura 3 - Plano de Rede**  
**Mapa Conceitual – Estrutura e principais produtos**



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

FONTES -CONCEITOS 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.
- **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 semaforica em que os ônibus exercem preferência quando da aproximação de cruzamentos semaforizados;
  - 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, o que também pode ocorrer quando os dois veículos estão com lotações desbalanceadas;
  - 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.
  - OUTROS – medidas de controle que não se enquadram nas duas categorias acima. Entre elas pode ser lembrada a Bilhetagem Desembarcada. – Embora não se trate de medida comandada durante a operação, e sim um atributo da infraestrutura do serviço; entende-se que a medida deva ser analisada pelos potenciais benefícios em favor da regularidade. 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.

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*”. Assim, no mais das vezes ao nome em português é indicado, entre parênteses, a nomenclatura em inglês, que também pode ser empregada individualmente.

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.

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 aplicadas 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, nos sistemas de ônibus é perverso, na medida em que abala a regularidade do atendimento<sup>3</sup>.

- 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. 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 em questão.
- 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 significa aumento da oferta.<sup>4</sup>

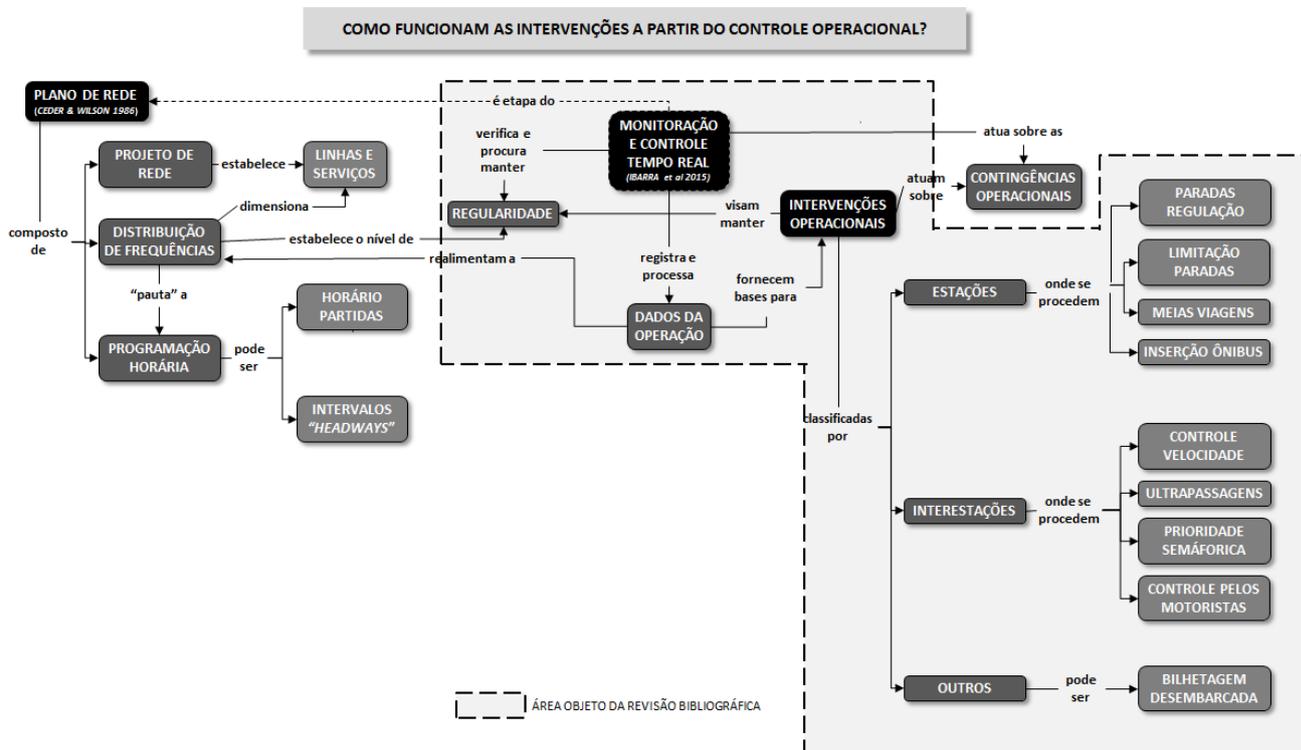
O Mapa Conceitual apresentado na Figura 4 emprega parte da estrutura de um Projeto de Rede para situar as intervenções, resumindo sua tipologia e definindo a área objeto desta Revisão Bibliográfica.

---

<sup>3</sup> Ver descrição do agrupamento de veículos no item 2.2.1. desta Dissertação

<sup>4</sup> 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.

**Figura 4 - Plano de Redes**  
**Mapa Conceitual – Resumo de Etapas e Produtos**



FONTES -CONCEITOS 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 os trabalhos de Ibarra et al (2015), que fazem 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”)

Como já foi visto neste documento, 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 circular em nas vias, concorrem, em maior ou menor escala com os automóveis. 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.

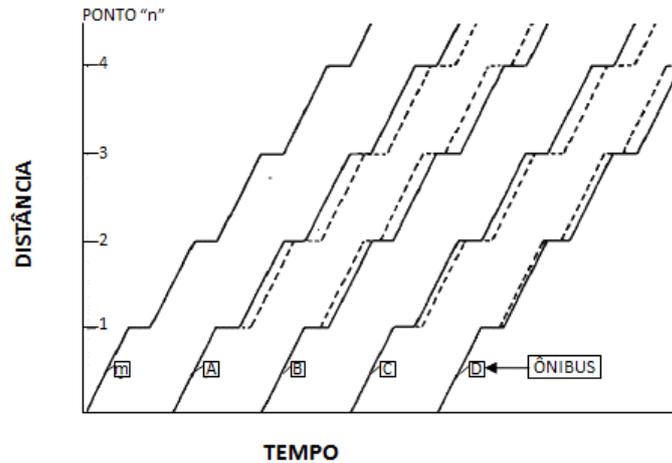
Um dos problemas comumente encontrados nas linhas de ônibus é o agrupamento de ônibus em desacordo ao programado, também conhecido no jargão metroferroviário como “sanfonamento” ou “*bunching*”. Nos idos de 1964, Newell e Potts (1964) estudaram o fenômeno, tendo chegado a um algoritmo simplificado que reproduzia a situação. Pela quantidade de citações, o trabalho 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 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 e passaria a ficar mais próximo do programado do que o “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 0, 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”.

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

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

Esta razão é a base para o desenvolvimento de seu 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 cercado 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 pelos autores já citados 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.

Procurou-se varrer as principais iniciativas neste sentido, mesmo quando a variação entre elas não ocorresse nas características da intervenção, mas, sim, das premissas empregadas nos algoritmos das funcionalidades propostas. 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*”). Enquanto os primeiros são típicos em serviços com baixa frequência, os intervalos são comuns em serviços de altas frequências como já foi visto na Figura 5 neste documento.

#### 2.3.1.1. Estudos pioneiros e Paradas para Regulação Programadas - Íntegra das Resenhas disponíveis no Apêndice B

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 –1983a <sup>5</sup>, 1983b <sup>6</sup>e1984<sup>7</sup>.

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) - Íntegra das Resenhas disponíveis no Apêndice B

Xu Jun Eberlein - 1995

---

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

<sup>6</sup> 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.

<sup>7</sup> 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”<sup>8</sup> 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 “conjunto impactado”,

---

<sup>8</sup> 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”.

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

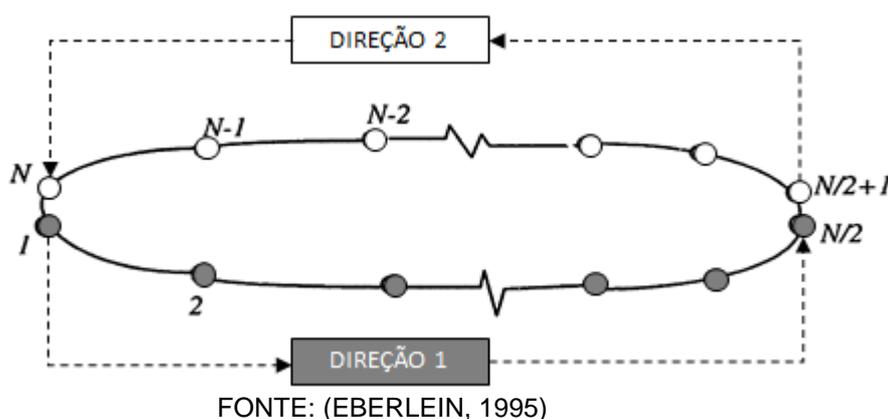
Para a montagem da rede de transporte, foi considerado um sistema unidirecional circular que, segundo a autora, tanto poderia ser uma linha metroferroviária quanto uma linha de ônibus, um serviço de alta frequência com intervalos inferiores a 10 minutos.

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 5 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 5 - Eberlein, 1995**  
**Rede de Transporte empregada na Dissertação – Representação esquemática**



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:

- 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.

- 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 3 e 4, 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 3 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema “F”**  
**Considerada a aplicação da Restrição de Programação**

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
<b>MÉDIA</b>		<b>87.414,38</b>	<b>4.84</b>	<b>2,47</b>	<b>-6.256,27</b>		<b>1,45</b>	<b>1,96</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>346</b>	<b>437.071,90</b>			<b>-31.281,36</b>	<b>-7,16</b>	<b>184,4</b>		<b>127</b>

**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 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema "F"**  
**NÃO Considerada a aplicação da Restrição de Programação**

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
<b>MÉDIA</b>		<b>87.414,38</b>	<b>4.84</b>	<b>2.47</b>	<b>-15.062,40</b>		<b>2,20</b>	<b>0,83</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>346</b>	<b>437.071,90</b>			<b>-75.311,98</b>	<b>-17,23</b>	<b>571,03</b>		<b>260</b>

**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)

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 5 e 6 apresentam os resultados para o Sistema "G".

**Tabela 5 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema "G"**  
**Considerada a aplicação da Restrição de Programação**

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	1 1,52	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
<b>MÉDIA</b>		<b>98.948,78</b>	<b>3,60</b>	<b>-19.425,59</b>		<b>2,29</b>		<b>1,56</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>346</b>	<b>494.743,91</b>		<b>-97.127,95</b>	<b>-19,63</b>		<b>-214,43</b>	<b>266,62</b>	<b>171</b>

**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 6 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema "G"**  
**NÃO Considerada a aplicação da Restrição de Programação**

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
<b>MÉDIA</b>		<b>98.948,78</b>	<b>3,60</b>	<b>-30.629,73</b>		<b>0,93</b>		<b>1,89</b>	
<b>TOTAL</b>		<b>494.743,91</b>		<b>-15.148,64</b>	<b>-30,96</b>		<b>-269,54</b>	<b>536,26</b>	<b>284</b>

**OBSERVAÇÕES**

H=5min

% Mudança no Custo = Mudança no Custo/Custo\*100%

Custo Médio refere-se ao pico da manhã

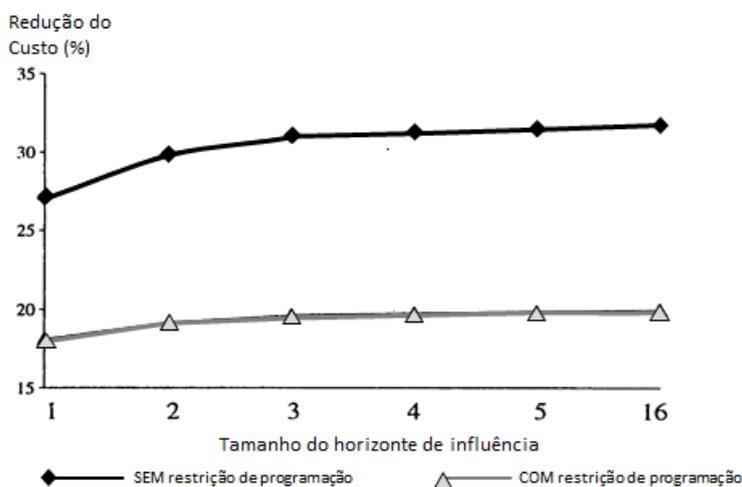
Tempo Médio de Retenção refere-se aos veículos retidos

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 resultados com e sem a consideração da Restrição de Programação.

**Gráfico 2 - Eberlein, 1995**  
**Relação entre a Redução de Custo e o Tamanho do Horizonte de Influência**  
**Sistema “G” – resultados com e sem 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 regulação (“*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 difícil 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.

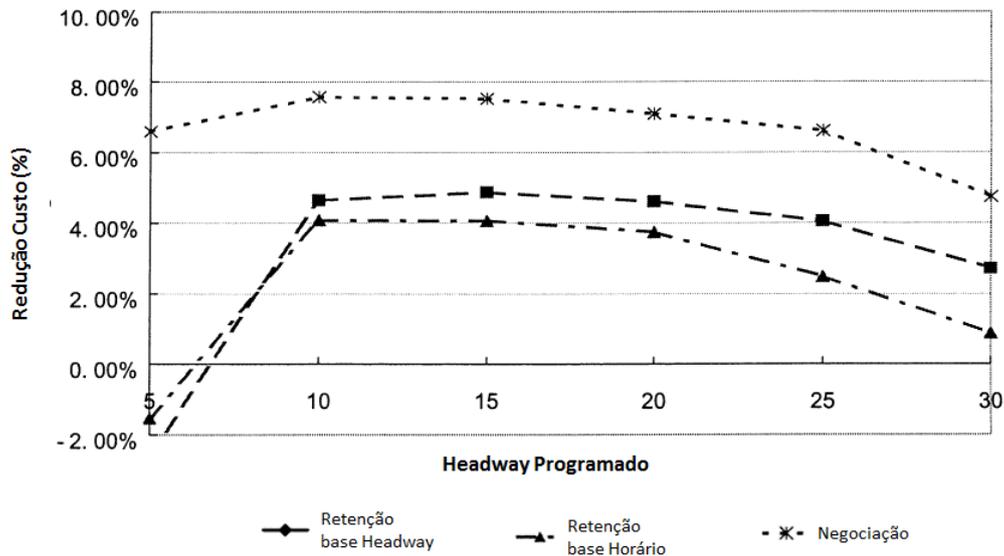
Embora o modelo execute a estratégia na estação terminal, foram comparadas quatro estratégias alternativas nas outras estações:

- Estratégia de não-retenção: os ônibus não são retidos nas estações.
- 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.
- Estratégia baseada na Programação Horária: Um ônibus é retido somente se chegar mais cedo do que o horário programado.
- 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 3, a estratégia de negociação supera as outras, especialmente quando os “*headways*” são inferiores a

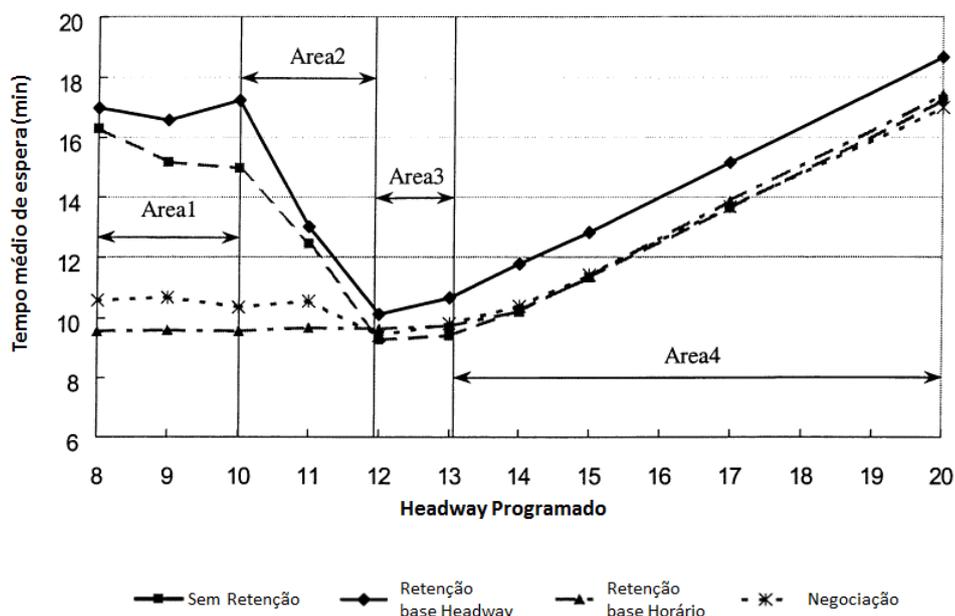
10 min. Como esperado, as diferenças entre as estratégias de negociação e na base dos “headways” reduzem-se à medida que os “headways” crescem.

**Gráfico 3 - Zhao et al (2003)**  
**Reduções de Custo em função dos tempos de “headway”**  
**Diferenças das estratégias em relação à estratégia de “não retenção”**



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 - Zhao et al (2003)**  
**Tempos Médios de Espera por Estratégia em relação à duração do “headway”**  
**Delimitação de Áreas de Desempenho**



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 paragens de ônibus 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 7.

**Tabela 7 - Delgado et al (2009)**  
**Tempos de Viagem - Comparativo de Resultados por estratégia testada**

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 à 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)<sup>9</sup>. 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 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:

---

<sup>9</sup> 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.

- 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.

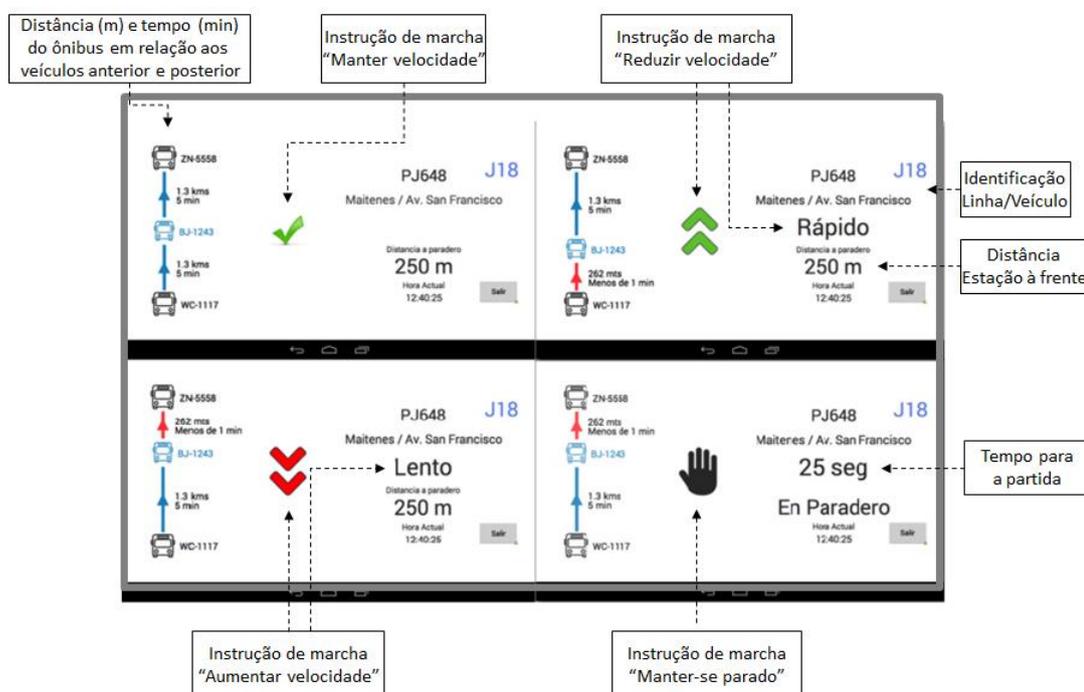
Os resultado nos dois pilotos foi a redução da quantidade de multas por falta de regularidade, que foram 50% a 60% menores que nos dias sem controle. Ocorreu também aumento de demanda da ordem de 20% o que, segundo os autores, deveu-se, provavelmente, à redução de evasão de tarifas: com a situação anterior caracterizada por ônibus lotados, muitos passageiros não embarcavam pela porta regulamentar, a da frente, mas, sim, entrando sem pagar pela porta traseira.

Outra empresa de ônibus (Buses Metropolitana S.A.) decidiu fazer alguns testes pilotos exploratórios em seu serviço J18, linha alimentadora que opera na região oeste da cidade. 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 controle em qualquer ponto de ônibus da linha também enquanto dirige. A Figura 6 mostra as 4 visualizações da aplicação Android, uma para cada situação do veículo

**Figura 6 - Lizana et al (2009)**  
**Aplicativo de Controle Operacional – Tela do “tablet” do motorista**  
**Informações x Estágio da marcha**



FONTE: (LIZANA et al., 2014) – Explicações acrescentadas pelo autor da Dissertação

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 esses, 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 um dos mais interessantes entre tantos outros consultados, por ser o único a relatar uma experiência exercida na prática.

Também é notável o sistema de baixo custo e rápida implantação desenvolvido pela equipe para a Linha J18. Este é um campo, salvo engano, 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.

### **2.3.2. Serviços com Paradas Limitadas (“*skip stops*”) – Íntegra das Resenhas disponível no Apêndice C**

#### 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) <sup>10</sup> entre os primeiros que descreveram e avaliaram de forma abrangente o "*stop-skipping*" num contexto operacional.

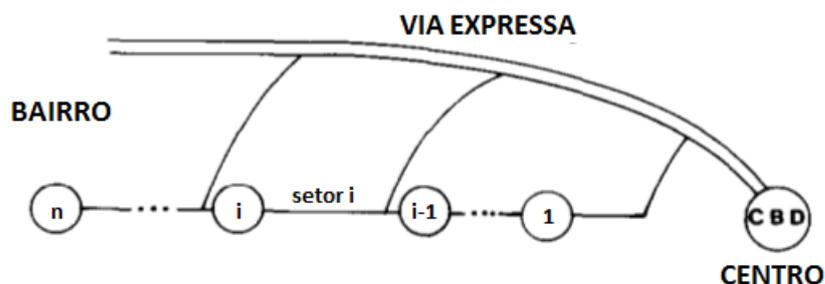
Um artigo de Furth (1986) trata de uma aproximação desse tipo de intervenção, propondo um modelo que poderia ser chamado de “Linhas Zonais”. Estes serviços, após atenderem todos os pontos de uma zona próxima ou contígua à uma via

---

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

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 7.

**Figura 7 - 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, Denver, San Francisco, Miami, Pittsburgh e Chicago. Ressalva, entretanto, ter sido na década de 1980 que esses serviços tornaram-se mais comuns.

Aponta, 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)<sup>11</sup>, Desaulniers e Hickman (2007)<sup>12</sup> e Guihaire and Hao (2008)<sup>13</sup> 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 (2003<sup>14</sup>,2008<sup>15</sup>) 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 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

---

<sup>11</sup> 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.

<sup>12</sup> 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).

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

<sup>14</sup> 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.

<sup>15</sup> 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.

com a modelagem fica expressa nas diversas considerações e sugestões indicadas nas conclusões.

*Viroth 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 (Transmilenio), 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 cidade<sup>16</sup>. 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

---

<sup>16</sup> O artigo não fornece dados tanto do operador quanto da cidade referidos.

### Gráfico 5 - Simulações Chiraphadhanakul and Barnhart (2013) Resultados – Comparação Linhas limitadas x Linhas locais

#### Passageiros embarcando/desembarcando e demandas Origem-Destino



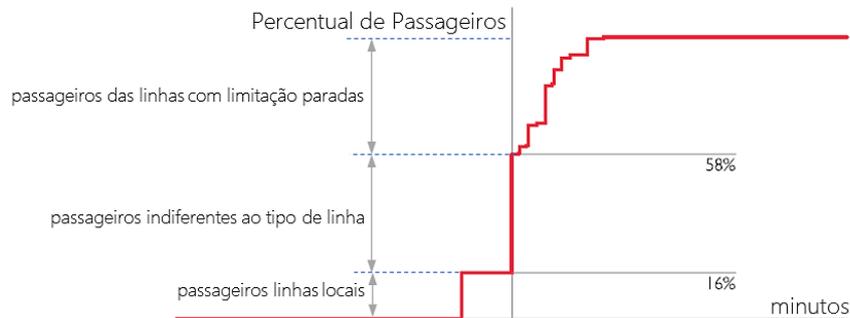
FONTE: (CHIRAPHADHANAKUL; BARNHART, 2013) Tradução e adaptações do autor

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 (espera no ponto + tempo embarcado).

**Gráfico 6 - Simulações Chiraphadhanakul and Barnhart (2013)  
Resultados – Ganhos e perdas nos tempos de viagem  
Percentual acumulado de passageiros**



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 8 a seguir.

**Tabela 8 - Simulações Larrain, Giesen e Muñoz (2010)  
Resultados desagregados da modelagem por Cenário e por Indicador**

	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 (%)
<b>Escala de Demanda</b>												
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
<b>Desequilíbrio</b>												
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
<b>Compr. Médio Viagem</b>												
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

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.

Os resultados do modelo são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Modelagem Feng, Wen-tao e Dian-hai (2010)  
Comparativo tempos – Serviço Local x Serviço Paradas Limitadas**

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

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 10.

**Tabela 10 - Modelagem Eberlain (1095)  
Comparativo tempos – Serviço Local x Serviço Paradas Limitadas  
Sistema “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*”) apresentados na Tabela 5 (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 Tabela11

**Tabela11 - Modelagem Eberlain (1095)  
Comparativo tempos – Serviço Local x Serviço Paradas Limitadas  
Sistema “F”**

DIAS	EXPRESSO (Limitação de Paradas)			MEIAS VIAGENS (“ <i>Deadheading</i> ”)		
	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 limitação. O resultado está na Tabela 12 que indica os melhores trechos nas diversas simulações e a incidência de viagens com limitação em cada trecho.

**Tabela 12 - Modelagem Eberlain (1095)  
Seleção de trechos com limitação e identificação dos inícios  
Sistema “G”**

ATRIBUTO	TRECHOS COM LIMITAÇÃO									Total
	1-3	1-4	1-5	1-7	2-4	6-8	13-18	15-18	16-18	
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%

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, ido diretamente para a comparação com a meia viagem. O produto dessa comparação encontra-se na Tabela 13.

**Tabela 13 - Modelagem Eberlain (1095)  
Seleção de trechos com limitação e identificação dos inícios  
Sistema "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	-11,36	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 e pela comparação sistemática com a estratégia da MV.

Liping Fu, Qing Liu, and Paul Calamai

(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.

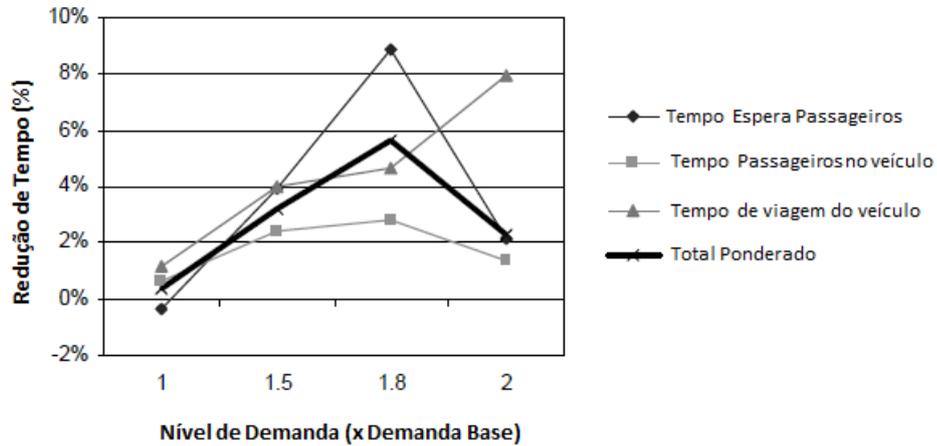
Em particular, este modelo é formulado para minimizar o custo total equivalente de tempo de espera de passageiros e tempo de passageiro no veículo, bem como tempo de viagem do veículo sujeito às equações de estado de sistema previamente formuladas, relações recorrentes, condições iniciais e a variável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

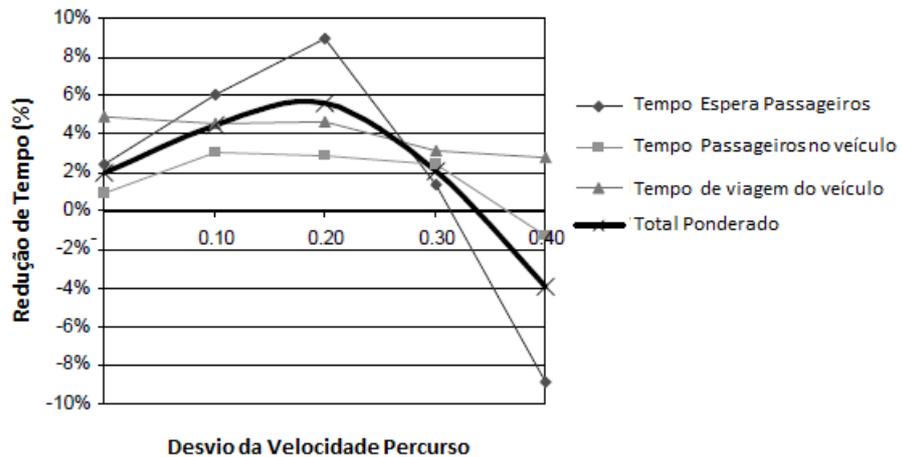
**Gráfico 7 - Modelagem Fu, Liu e Calamai (2003)**  
**Análise de Sensibilidade a Níveis de Demanda - Resultados**



FONTE: (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 - Modelagem Fu, Liu e Calamai (2003)**  
**Análise de Sensibilidade a Variação da Velocidade - Resultados**



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 14 apresenta este comparativo.

**Tabela 14 - Modelagem Fu, Liu e Calamai (2003)  
Aplicação Combinada de Limitação de Parada e “ *Holding* ”  
Resultados das Reduções de Tempos**

ESTRATÉGIA	REDUÇÃO DE TEMPOS MÉDIOS (%)			Redução no Total Ponderado (%)
	Nos Veículos	Espera	Viagem Veículo	
Limitação paradas	2.84%	8.91%	4.66%	5.62%
" <i> Holding </i> "	6.46%	30.72%	-0.67%	16.17%
Limitação paradas + " <i> Holding </i> "	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 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 15.

**Tabela 15 - Modelagem Sun e Hickman (2005)  
Parâmetros empregados na 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
$\alpha$ , $\beta 1$ , $\beta 2$ (seg) <sup>(1)</sup>	25, 3 e 1,5 respectivamente (3)
Número de veículos impactados	4, excluídos o veículo limite e o veículo de controle
$w 1$ , $w 2$ , $w 3$ <sup>(2)</sup>	1, 0,5 e 5 respectivamente

OBSERVAÇÕES:

(1) Símbolos representam os parâmetros ( $\alpha$ ) tempo médio de embarque de passageiros ( $\beta 1$ ) tempo médio de desembarque de passageiros ( $\beta 2$ ) tempo de parada do veículo compreendendo desaceleração, aceleração, abertura e fechamento de portas e partida.

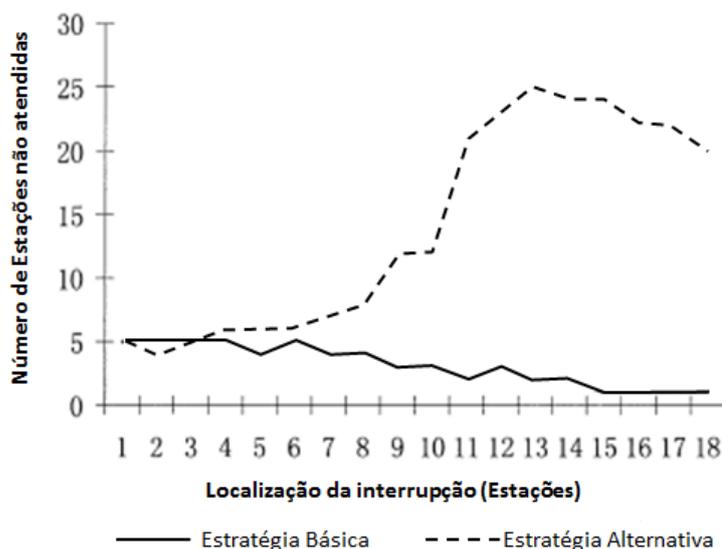
(2)  $w 1$ ,  $w 2$ ,  $w 3$  - Pesos considerados para os diferentes componentes do custo dos passageiros na função objetivo.

FONTE: (SUN; HICKMAN, 2005) – Tradução e observações so 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 interrupção se desloca para jusante.

**Gráfico 9 - Modelagem Sun e Hickman (2005)**  
**Resultados da simulação – Estações atendidas**  
**Comparativo Estratégia Básica x Estratégia Alternativa**



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)<sup>17</sup> and Daganzo (2010)<sup>18</sup>.

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.

---

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

<sup>18</sup> 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.

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”) – Íntegras das resenhas disponíveis no Apêndice D**

#### **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).

Cumpra 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.

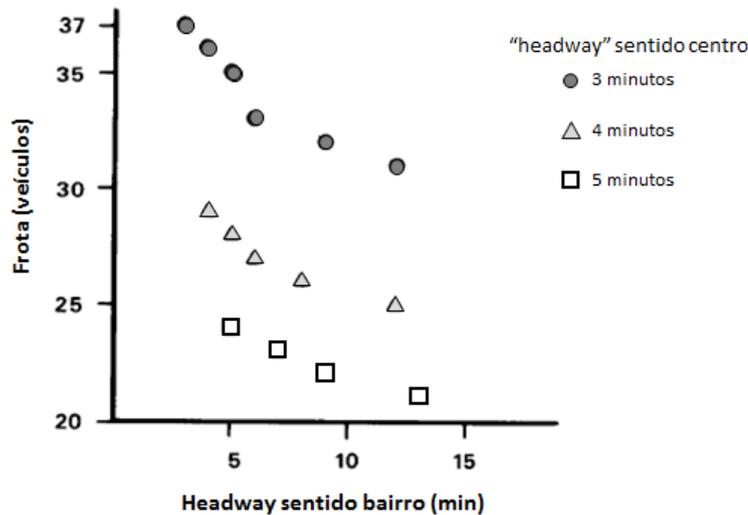
O estudo, em seguida, passa buscar soluções para diversos objetos com condições e alvos diferentes:

- 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” e  $h_A$ .

**Gráfico 10 - Modelagem Furth (1985)**  
**Meias-viagens -Tamanho de Frotas segundo os “headways”**



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 por dois veículos adjacentes (sucessivos).

**Tabela 16 - Modelagem Eberlein (1995)  
Meias-viagens de veículos adjacentes  
Tamanho de Frotas segundo os Horizontes de Influência**

VEÍCULOS "i"	2	3	6	7	9	10	12	Total de Benefícios	Redução de Custos (%)	Tempo Processam. (s)
<b>MEIA-VIAGEM - VEÍCULOS NÃO ADJACENTES</b>										
n*	7	0	4	0	6	0	1	2.891,50r	9.96%	2
<b>MEIA-VIAGEM - VEÍCULOS ADJACENTES</b>										
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
<b>OBSERVAÇÕES</b>										
n* = número ótimo de estações não atendidas										
m = Horizonte de Influência										

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

A Tabela 16 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.

Os resultados desses testes estão listados nas Tabelas 17 e 18.

**Tabela 17 - Modelagem Eberlein (1995)**  
**Aplicação Green Line - Meias-viagens – Sistema “F” – Teste 1**  
**Comparativo Meias-viagens não adjacentes com Viagens Sem Controle**

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

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

**Tabela 18 - Modelagem Eberlein (1995)**  
**Aplicação Green Line - Meias-viagens – Sistema “F” – Teste 2**  
**Meias-viagens adjacentes segundo os Horizontes de Influência**

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)

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 19.

**Tabela 19 - Modelagem Eberlein (1995)  
Meias-viagens – Sistema “G”  
Meias-viagens adjacentes segundo os Horizontes de Influência**

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	-11,36	-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	-11,32	-11,32	-11,48
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

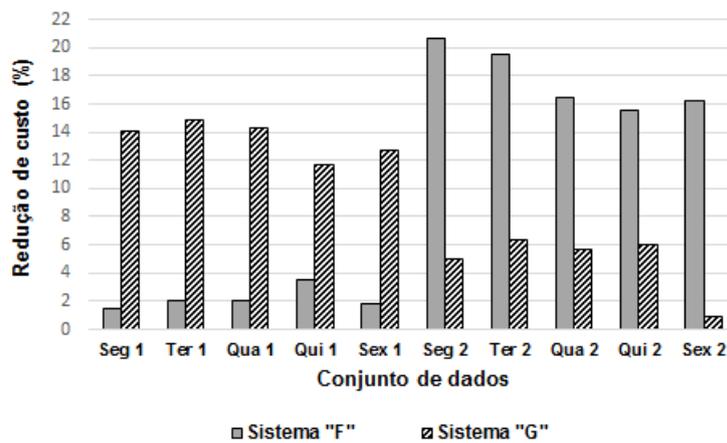
FONTE: (EBERLEIN, 1995)

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.

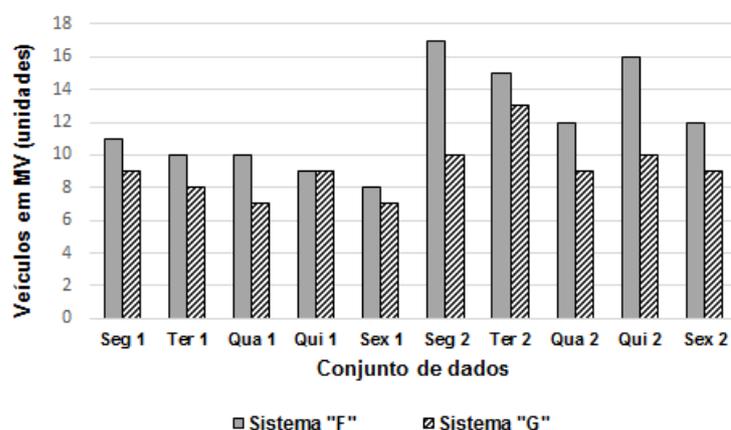
Os Gráficos 11 e 12 apresentam comparativo de resultados entre o Sistema “F” e o Sistema “G”. A comparação foi feita com base nos algoritmos que permitem as MV adjacentes. Os dois gráficos empregaram a mesma base de dados, contendo nas abcissas os conjuntos de dados referidos aos dias da semana e pareados 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 - Modelagem Eberlein (1995)**  
**Meias-viagens – Comparativo Sistema “F” com Sistema “G”**  
**Mudanças de Custo em relação aos conjuntos de dados**



FONTE: (EBERLEIN, 1995)

**Gráfico 12 - Modelagem Eberlein (1995)**  
**Meias-viagens – Comparativo Sistema “F” com Sistema “G”**  
**Veículos em MV em relação aos conjuntos de dados**



FONTE: (EBERLEIN, 1995)

O Gráfico 11 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 12 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 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.

- 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.
- 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 - Modelagem Liu et al (2013)**  
**Meias-viagens – Resultados das simulações**  
**Estação atendidas para cada padrão simulado**

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	A	A	A
Veículo 1 - Método da Enumeração	A	A	A	A	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	A	A
"Deadheading"	A	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.

#### **2.4. Intervenções entre Estações**

Com 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, como foram aquelas analisadas no item 2.2. *Intervenções nas Estações* deste documento.

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.

O material bibliográfico disponível para esses temas é mais restrito do que aquele apresentado até aqui. Dadas tais características, esses temas serão tratados a seguir no decorrer da elaboração desta Dissertação. De qualquer modo, as matérias já selecionadas são relacionadas a seguir, sem prejuízo de novas referências que venham a ser incluídas:

- Controle de Velocidade
  - ESTRADA, Miquel; MENSIÓN, Josep; AYMAMÍ, M.; TORRES, Laura; Bus control strategies in corridors with signalized intersections. Transportation

Research Part C: Emerging Technologies, Volume 71, October 2016, Pages 500-520.

- Ultrapassagens
  - VALENCIA, Alejandra, FERNANDEZ Rodrigo; "A method to calculate commercial speed on bus corridors" Traffic Engineering & Control, Junho-2012, p. 215.
  - SCHMÖCKER, Jan-Dirk; SUN, Wenzhe; FONZONE; Achille, LIU, Ronghui; Bus bunching along a corridor served by two lines, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 93, Part A, November 2016, Pages 300-317,
- Prioridade Semafórica
  - HOUNSELL, N.B. ; SHRESTHA, B.P.; A new strategy for differential bus priority at traffic signals for high frequency services - 16th ITS World Congress, 2009
  - KIN, Suhyeon, PARK, Minchoul, CHON, Kyung Soo - Bus Signal Priority Strategies for Multi-directional Bus Routes - KSCE Journal of Civil Engineering 16(5):855-861 - DOI 10.1007/s12205-012-1507-7 - 2012
- Controles pelos motoristas
  - 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.
  - TENG, Jing; JIN, Weimin, "Development and Evaluation of Bus Operation Control System Based on Cooperative Speed Guidance," Discrete Dynamics in Nature and Society, vol. 2015, Article ID 928350, 8 pages, 2015. doi:10.1155/2015/928350
- Inserção de Frota
  - YU, B.; WANG, K.; PENG, Z.; WANG, C.; GAO, Z.; YAO, B. Dynamic extra buses scheduling strategy in public transport. Promet - Traffic&Transportation , v. 27, n. 3, p. 205–216, 2015.
- Bilhetagem desembarcada
  - TIRACHINI, A. - Estimation of travel time and the benefits of upgrading the fare payment technology in urban bus services - Transportation Research Part C – Vol. 30 pp. 239–256 – 2013.
  - PELLETIERA, Marie-Pier; TRÉPANIÉRA, Martin; MORENCYB, Catherine; Smart card data use in public transit: A literature review - Transportation

Research Part C: Emerging Technologies - Volume 19, Issue 4, August 2011, Pages 557–568.

- TIRACHINI, A. ; HENSHER, D. A. - Bus congestion, optimal infrastructure investment and the choice of a fare collection system in dedicated bus corridors - Transportation Research Part B 45 pp. 828–844 – 2011.
- GUENTHNER, Richard P.; HAMAT, Kasimin; Transit Dwell Time under Complex Fare Structure - Journal of transportation engineering [0733-947X] vol:114 iss:3 pg:367 -379 – 1988.

## 2.5. Conclusões e Comentários parciais

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. Mesmo assim, entende-se que todas as estratégias listadas serão contempladas com referências.

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, as matérias disponíveis, em sua maioria, têm como objetivos o desenvolvimento de algoritmos e sistemas dedicados a aperfeiçoar os instrumentos que permitem a aplicação mais precisa das estratégias. Não são numerosos os trabalhos que se preocupam em detalhar não somente a funcionalidade do método estudado, mas também detalhar os resultados práticos obtidos, relacionando-os com sua operacionalidade. De todo modo, foi possível levantar uma série de informações suficientes para a aplicação da pesquisa que será detalhada mais à frente neste documento. Foi também possível perceber as diversas configurações com as quais uma mesma estratégia pode ser implantada, possibilitando diferentes formatos e apresentando resultados mais ou menos parecidos.

Observa-se que há trabalhos pioneiros, que foram destacados no item que trata das Paradas para Regulação, que deflagram processos de aprofundamento e análise de métodos e processos. Entre estes podem ser citados (NEWELL; POTTS, 1964),

(OSUNA; NEWELL, 1972), (BARNETT, 1974), (CEDER; WILSON, 1986) e (ABKOWITZ; EIGER; ENGELSTEIN, 1986).

Em outra vertente, deve ser mencionada a Tese de Doutorado de Eberlein (1995) que trata, sob uma mesma base, de uma série de intervenções em tempo real ainda no período que se iniciava a disseminação dos equipamentos e sistemas nas redes de ônibus urbanos. Por essa abrangência, o trabalho é revisitado em três estratégias diferentes.

Um aspecto comum nos trabalhos consultados é o emprego constante do custo, expresso em tempos de espera e de viagem como variável principal da análise, em detrimento de outras variáveis como velocidades comerciais, quantidades de passageiros beneficiados, etc.

Em termos de resultados dos métodos, pode-se afirmar que os ganhos em tempo total de viagens oscilam entre 8% e 14% em relação à mesma operação feita sem nenhuma intervenção. Em termos relativos poderiam ser considerados ganhos parcimoniosos, mas, dados os volumes substanciais de passageiros e veículos beneficiados, os valores absolutos mostram-se consistentes. Este aspecto é tão mais valioso quanto maiores os sistemas de ônibus em que as intervenções são feitas.

Entre as estratégias estudadas, as Paradas para Regulação (*“holding”*) fazem parte do maior número de trabalhos e vem sendo empregada em alguns sistemas, ainda que de modo experimental. Uma característica relativamente comum é seu emprego em Corredores de Ônibus e sistemas BRT. Há muito poucos estudos considerando essa intervenção em linhas comuns disputando espaço no sistema viário com os demais veículos. Essa tendência se justifica por Corredores e BRT constituírem-se em sistemas mais controlados, onde a prática das estratégias é menos problemática e também por trafegarem em vias de alguma maneira segregadas. É sob esta ótica que a estratégia será analisada.

Com relação à Limitação de Paradas ocorre uma certa superposição com a Meia-viagem (MV). Ambas têm a mesma natureza, qual seja, o não atendimento das estações em um trecho (no caso da Limitação) ou um sentido (no caso da Meia-viagem) com o objetivo de melhorar a regularidade no sentido de pico. Há uma superposição adicional, identificada até pela denominação em inglês (*“expressing”*), quando um subserviço é criado para atender parte da demanda no sentido de maior volume de passageiros. Com isto, os veículos conseguem atingir velocidades comerciais maiores e, por decorrência, aumentando a oferta.

A inserção de ônibus extra para regularizar intervalos (“*headways*”) pela via do aumento da oferta é medida a ser analisada como uma estratégia nas estações.

O Controle de Marcha do ônibus, também chamado de Controle de Velocidade, busca, por meio do controle (interno ou externo) a manutenção dos intervalos entre os veículos (“*headway*”) manter a regularidade. Este controle pode ser automático a partir do Sistema de Monitoração e Controle ou mesmo a partir da interação entre motoristas dispondo de instrumentos de comunicação para conhecer sua posição em relação aos veículos anterior e posterior.

A prioridade semafórica para os ônibus é um tema relevante, cujos ganhos efetivos precisam ser conhecidos, uma vez que, ao lado dos tempos de parada nas estações, aparenta fazer parte dos maiores obstáculos ao aumento da velocidade comercial dos veículos.

Uma estratégia que deve ser analisada, embora não possa ser considerada intervenção em tempo real nos serviços de ônibus, é a Bilhetagem Desembarcada, que proporciona ganhos em tempo de embarque e desembarque, na medida em que estas ações podem ser feitas por todas as portas, além de dispensar catracas embarcadas (que representam perda adicional de tempo).

O Capítulo seguinte é dedicado à Metodologia a ser empregada no processamento das informações levantadas, suas justificativas, passos do processo e tipo de resultados esperados.

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1. Considerações Iniciais e Estruturação Básica**

Entende-se que a Metodologia a ser empregada é indissociável dos objetivos estabelecidos para a Dissertação, assim como de seu público-alvo, aqui entendido como um possível beneficiário do trabalho.

Os objetivos estão claramente formulados no item 1 – *Introdução* da presente Dissertação: analisar a factibilidade, na realidade dos grandes centros de países em desenvolvimento, com foco principal no Brasil, das estratégias de intervenção na operação de sistemas de ônibus visando a regularidade dos serviços.

As estratégias existentes já foram descritas no item 2 – *Revisão Bibliográfica*. Trata-se agora de confrontá-las com a realidade dos sistemas de ônibus em operação. A questão que se antepõe a essa confrontação é: o que deve ser comparado. Neste momento, abre-se um leque de possibilidades que podem, em resumo ser descritos como:

- a capacidade de atendimento dos sistemas locais aos requisitos técnicos de cada intervenção; tal capacitação, desdobra-se, por sua vez em disponibilidade de equipamentos e sistemas, capacitação de equipes de retaguarda (controle operacional, métodos e processos, etc.) e das equipes operacionais (agentes de campo, motoristas, equipes de apoio, etc.);
- condições operacionais que permitam a correta aplicação das intervenções de modo a assegurar resultados; inscrevem-se neste grupo uma série de aspectos, entre os quais podem ser destacados: as condições da infraestrutura, as condições de trânsito, a capacidade de reação das equipes às contingências encontradas no cotidiano do sistema, etc.;
- condições institucionais e comerciais, voltadas essencialmente aos contratos de delegação dos serviços que, por sua vez, podem dificultar ou mesmo impedir alguma das estratégias estudadas;
- condições exógenas aos sistemas, isto é, as dificuldades impostas pela vida urbana não só aos sistemas de ônibus, mas também a seus usuários; essas condições extrapolam o âmbito técnico e são permeadas também por aspectos subjetivos, principalmente a percepção que a população formou e forma em relação aos serviços que recebe; neste grupo encontram-se restrições de ordem de segurança pública (que afeta usuários e operadores), reação dos usuários a

medidas restritivas, grau de intolerância a transferências de veículos (fruto de experiências mal sucedidas no passado mediato e imediato).

A contraposição de partes intrinsecamente complexas não é tarefa simples. Por isto, optou por duas frentes. A primeira delas é uma Análise Qualitativa, em que as características das intervenções serão verificadas buscando identificar, da maneira mais objetiva possível, a aplicabilidade prática das estratégias existentes. A segunda é uma Análise Quantitativa em que, por meio de simulações, algumas das estratégias serão simuladas sobre dados reais para obter-se os resultados numéricos possíveis. São, portanto, duas vertentes de análise que, ao término do trabalho devem ser juntadas buscando uma visão realista das medidas que podem ser aplicadas na realidade de países em desenvolvimento.

### **3.2. Análise Qualitativa**

Inicialmente entende-se que este tipo de exame deva ser feito com um mínimo de sistematização no sentido de permitir comparações entre uma estratégia e outra frente às características dos serviços de ônibus.

A classificação de aspectos que influenciam a aplicação de intervenções operacionais responde, ainda que de forma primária, à resposta do que deve ser examinado do lado dos sistemas de ônibus.

Busca-se, agora, a sistematização dos aspectos listados, de maneira a chegar à resposta à pergunta: como fazer a confrontação?

Procurou-se, então, basear metodologia na conversão dos diversos e significativos vetores apresentados em atributos que, num primeiro momento sejam claramente conceituados, inteligíveis, classificáveis e também que possam ser sobrepostos às estratégias para identificar: (i) os pontos críticos para sua aplicação e, entre eles, algum aspecto que inviabilize seu emprego; (ii) a adequação dos resultados às necessidades do serviço; e (iii) a potencial capacidade dos sistemas de superar as deficiências e criar condições para a aplicabilidade.

O primeiro passo nesse caminho é a identificação das experiências visitadas, buscando uma visão geral de seu conteúdo e principais aspectos.

#### **3.2.1. Caracterização dos Trabalhos Consultados**

Trata-a aqui de relacionar os trabalhos examinados e suas principais características, de modo a ser obtida uma visão geral da natureza dos trabalhos e dos aspectos

favoráveis e desfavoráveis de seus conteúdos. Para isto, foram estabelecidos os seguintes critérios de apuração:

- Tipo de intervenção – enquadramento na classificação feita no item 2 – *Revisão Bibliográfica* deste documento.
- Autor
- Objetivo do trabalho – quais os objetivos do trabalho / Beneficiários do resultado
- Objeto do estudo – tipo de serviço, rede ou linha imaginada adotado para o estudo
- Método de Controle – qual o tipo de Controle é necessário para aplicar a estratégia.
- Equipamentos e Sistemas Requeridos – quais os equipamentos e sistemas empregados para a realização do experimento
  - Tipo de Experimento bases de dados criadas ou reais, se houve simulação com essas bases, se houve experiência prática (implantação no campo, mesmo experimental).
- Resultados – o indicador apurado e o grau de resultados

A classificação acima deu origem a uma tabela que resume os experimentos consultados, permitindo uma análise geral do que foi analisado, assim como uma visão geral das diferentes abordagens.

A Tabela 20 mostra um modelo do produto, de modo a visualizá-lo quando toda a tabulação estiver concluída.

**Tabela 20 - Metodologia  
Sumário dos Trabalhos consultados**

Tipo de intervenção	Autor	Objetivo do trabalho	Objeto do estudo	Método de Controle	Equipamentos e Sistemas Requeridos	Tipo de Experimento	Resultados
Paradas para Regulação	Osuna e Newell (1972)	Otimização dos Tempos de Retenção	Linha de ônibus idealizada - uma estação	Não houve - somente programação	Nenhum	Modelo simples sem simulação	Limitados
	Barnett (1974)	Regularização de intervalos	Metrô Boston - 2 estações L. Vermelha	Não houve - somente programação	Nenhum	Dados reais - modelo sem simulação	Redução 10% no tempo espera
	Abkowitz; Eiger e Engelstein (1986)	Minimização total da espera, tendo como variáveis de decisão o ponto ótimo de controle e o valor limite para a retenção.	Linha de ônibus idealizada	Não houve - somente programação	Nenhum	Modelo simples sem simulação	Redução de 5% a 15% no tempo de espera
	Eberlein (1995)	Minimização do tempo total de espera dos passageiros em um serviço de trânsito urbano de alta frequência	Trecho da L. Verde Metrô Boston - "loop" com 52 estações em 2 sentidos	Dinâmico, com intervenções durante a operação	Previu, mas não empregou AVL, APC e Sistema Controle	Dados reais e modelo de simulação	Redução de 7% a 17% no tempo total de viagem
Paradas Limitadas ("skip stops")	Furth (1986)	minimizar os custos sociais da limitação num corredor de vias segregadas	Corredor com 19 estações e 23 linhas	Estático - programação	Nenhum - limitação programada	Simulação com dados reais do Corredor da Avenida Pajaritos em Santiago, Chile	Reduções do tempo total de viagem em torno de 10%
	Chiraphadhanakul e Barnhart (2013)	Modelar linhas comuns com serviços de paradas limitadas sem aumento frota	178 linhas - Rede não especificada	Estático - programação	Nenhum - limitação programada	Simulação com dados reais de 178 linhas de uma grande cidade	- 16% dos pax - aumento de tempo - 42% neutros - 42% ganho médio de 2,3 min

### **3.2.2. Formulação dos atributos**

Entende-se que os atributos sejam características dos serviços que, contrapostas aos requisitos, características e resultados das estratégias, possam apontar deficiências ou capacitações que dificultem ou facilitem a aplicação das intervenções.

Procura-se, a seguir, estabelecer a conceituação dos atributos ao mesmo tempo que os classifica segundo sua natureza.

#### **3.2.2.1. Capacidade Tecnológica**

Corresponde ao conjunto de equipamentos, sistemas, métodos e procedimentos que permitam a aplicação de tecnologias com requisitos mais ou menos sofisticados deste tipo de ferramental. Podem incluir, entre outros:

- equipamentos de Localização Automática de Veículos – AVL;
- equipamentos de Contagem Automática de Passageiros – APC;
- sistemas de comunicação entre Centro de Controle-veículos-equipe de campo
- sistema de Monitoramento e Controle;
- sistema de Informações aos Usuários;
- outros equipamentos e sistemas.

#### **3.2.2.2. Capacitação das Equipes**

Abrange todos os níveis de equipes operacionais, entre as quais podem ser destacadas:

- motoristas capacitados a operar equipamentos de comunicação;
- equipes de campo capacitadas a operar equipamentos de comunicação e familiarizadas com procedimentos técnicos com alguma sofisticação;
- equipes do CCO, inclusive coordenação capacitadas para a operacionalização de procedimentos diferenciados;
- coordenação do CCO com competência institucional para coordenar a operação e a operacionalização de procedimentos diferenciados;
- equipes de métodos e processos capacitadas a processar em tempo hábil dados destinados a gerar instruções para operação de procedimentos diferenciados.

### 3.2.2.3. Condições Operacionais

Abrange, entre outras condições:

- grau de segregação das vias que atendem o sistema de ônibus;
- organização da rede de transporte compatível com intervenções operacionais – hierarquização de linhas, quantidades de linhas por corredores;
- integração física e tarifária entre serviços compatível com intervenções operacionais – aumento de custos, aumento de esperas, etc.
- existência de programações de serviços dedicadas a eventos extraordinários previstos e imprevistos;
- estratégias operacionais para situações de contingências nos serviços;
- infraestrutura das estações disponíveis para o serviço;
- grau de controle da operação de trânsito nas vias que atendem os serviços de ônibus, em especial nas condições contingenciais;
- capacidade de atuação operacional de trânsito para regularização nas situações contingenciais;
- capacidade de atuação integrada entre equipes do controle do sistema de ônibus e do controle do trânsito;
- grau de integração da informação com relação a situações contingenciais relacionadas a clima, segurança pública, obras de concessionárias de serviços, etc..

### 3.2.2.4. Condições Institucionais e Contratuais

- condições contratuais que permitam a implantação de procedimentos operacionais não convencionais em contingências previstas e não previstas;
- remuneração de operadores em consonância com os objetivos operacionais do órgão gestor;
- condições contratuais que assegurem o CCO a comandar a operação dos serviços, em particular nos casos de contingências.

### 3.2.2.5. Condições Ambientais

Trata-se aqui de condições externas aos serviços que possam contribuir, dificultar ou impedir a implantação de intervenções destinadas à regularização de intervalos e tempos de viagem. Abrangem não somente aspectos práticos, mas particularidades

socioculturais que determinam o comportamento de usuários e de parcela da população, entre os quais destacam-se:

- a maneira como usuários percebem intervenções que alterem, unilateralmente, seus hábitos de viagem; entre outras intervenções, devem ser realçadas: maior número de transferências, ônibus que não param nos pontos ou que demoram para partir, etc.;
- conteúdo e forma de como as mensagens de alterações nos serviços são transmitidas aos usuários;
- reação da população à falta de informações nos casos de alterações definitivas e interrupção parcial dos serviços;
- percepção dos usuários do dispêndio de maiores tempos de viagem em virtude de intervenções dos gestores e operadores.

### **3.2.3. Estratégias frente a Atributos dos Serviços**

Trata-se aqui de contrapor as necessidades e consequências práticas das estratégias analisadas com os atributos encontrados nos sistemas de ônibus, de modo a identificar graus de facilidade ou dificuldade de tais intervenções.

A esta altura torna-se imprescindível reconhecer as limitações desse tipo de análise. Trabalha-se, nestes casos com pelo menos duas imponderáveis. A primeira delas é a capacidade de evolução das organizações e dos sistemas de transporte no sentido de adquirir capacitação e aderir a inovações. Embora essa variável, ainda que com imprecisões possa ser projetada em função de progressos recentes ou de perspectivas para futuro mediato, o inverso é menos previsível, isto é, qual o grau de resistências culturais e corporativas a inovações que afetem o bem estar de agentes da operação dos sistemas que pode independender do bem-estar de usuários.

A segunda delas, mais complexa, diz respeito aos aspectos socioculturais, que dependem de fatores externos menos passíveis de previsão. Nesse sentido é típica a percepção da segurança pessoal que está vinculada ao ambiente em que os cidadãos convivem, não diretamente associado ao nível de serviço prestado. Também é emblemática a resistência a mudanças nos hábitos de viagem, particularmente aquelas que acarretam a sensação de maiores esperas para acesso ao serviço de transporte público.

De qualquer modo, entende-se ser possível circunscrever as situações limite, quais sejam, aquelas nos limiares do aceitável ou inaceitável, assim como graduar aquelas situadas entre esses limites.

A proposta de análise qualitativa procura encaixar-se nesta perspectiva de caráter indicativo e não determinístico.

Isto posto, propõe-se que a análise quantitativa seja feita pelo cotejo entre os requisitos para a aplicação das intervenções aventadas e as características dos atributos encontradas nos sistemas de ônibus nas grandes cidades. Tal cotejo pode ser realizado por meio de tabelas que, de modo sistemático, analisem a potencial exequibilidade de cada intervenção.

O primeiro passo proposto são cotejos individualizados entre os atributos gerais dos sistemas de transporte com os requisitos de cada tipo de intervenção. Para cada modalidade de estratégia será montada uma tabela com tais características. Nestas tabelas, cada cruzamento receberá um grau de necessidade, isto é, para cada tributo analisado ,será classificada a estratégia segundo grau de exigência da estratégia, adotando-se quatro níveis: Imprescindível, Necessário, Aceitável e Não É afetada pelo atributo. Esse grau de necessidade será aplicado no passo seguinte.

A Tabela 21 apresenta um exemplo do primeiro passo desse tipo de análise para uma estratégia específica, de maneira a visualizar como seria a série de análises individualizadas.

**Tabela 21 – Metodologia – Análise Qualitativa  
Modelo de Comparativo - Intervenção Operacional x Atributos Transporte**

ATRIBUTOS	TIPO DE INTERVENÇÃO	
	PARADAS PROGRAMADAS PARA REGULAÇÃO - ("holding")	GRAU
<b>Análise</b>		
<b>Capacidade Tecnológica</b>		
equipamentos de Localização Automática de Veículos – AVL;	Desejável que o serviço disponha dos equipamentos	B
equipamentos de Contagem Automática de Passageiros – APC;	Maior facilidade nos serviços que dispõem desses equipamentos	C
sistemas de comunicação entre CCO e veículos/equipe de campo	Desejável que o serviço disponha de equipamentos e sistemas - Depende também do grau de integração entre Gestor e órgão de trânsito	B
sistema de Monitoramento e Controle;	Desejável que o serviço disponha de equipamentos e sistemas - Depende também de quem controla a Operação	B
sistema de Informações aos Usuários	Necessária forma de informação escrita e ou de voz. Desejável equipamentos com informações "online"	A
outros equipamentos e sistemas.	Desejável que veículos tenham informação a bordo	B
<b>Capacitação das Equipes Operacionais</b>		
capacitação de motorista	Necessidade de treinamento abrangente e intensivo	A
capacitação de equipes de campo	Necessidade de treinamento abrangente e intensivo especialmente nos casos de implantação a partir do campo	A
capacitação de equipes do CCO, inclusive coordenação	Necessidade de treinamento	A
coordenação do CCO com competência institucional	Nos casos de implantação centralizada, poder de comando é fundamental	B
equipes de métodos e processos	Desejável para o acompanhamento e desenvolvimento continuado das intervenções	B
<b>Condições Operacionais</b>		
grau de segregação de vias	Desejável segregação completa . Aceitável faixas exclusivas	B
organização da rede de transporte	dificuldades associadas à quantidade de linhas; casos de muitas linhas, imprescindível a condição de ultrapassagem	A
integração física e tarifária entre serviços	Não influi na implantação da estratégia	D
programações de serviços - eventos extraordinários	Necessidade de capacitação de equipe para revisão constante da programação	B
estratégias operacionais para situações de contingências	Não influi na implantação da estratégia	D
infraestrutura das estações	Necessária para informação aos usuários sobre as intervenções	B
grau de controle da operação de trânsito	Não influi na implantação da estratégia	D
capacidade de atuação operacional de trânsito	Não influi na implantação da estratégia	D
capacidade de atuação integrada entre equipes	Apenas entre equipes do órgão gestor e dos operadores	C
grau de integração da informação entre entidades com jurisdição sobre as vias	Não influi na implantação da estratégia	D
<b>Condições Institucionais e Contratuais</b>		
permissão para procedimentos operacionais não convencionais	Necessária, mas possível de inclusão em contratos	B
remuneração de operadores para novos procedimentos;	Necessária caso a intervenção represente aumento de frota	B
CCO apto a comandar a operação de serviços especiais	Imprescindível no caso de intervenções centralizadas	A
<b>Condições ambientais</b>		
percepção dos usuários a mudanças nos hábitos de viagem	Não há mudanças severas nos hábitos de viagem	C
conteúdo e forma das comunicações de alterações nos serviços;	Imprescindíveis recursos de comunicação embarcados e nas estações	A
reação da população à falta de informações nos casos de alterações;	Tendência a reações negativas, especialmente se não houver comunicação esclarecedora	B
percepção dos usuários de maiores tempos de viagem por intervenções.	Tendência a reações negativas, especialmente se não houver comunicação esclarecedora	B

A IMPRESCINDÍVEL    
B DESEJÁVEL    
C ACEITÁVEL    
D NÃO AFETA

Cumpra observar que essa análise pode ser feita mais de uma vez para a mesma estratégia operacional, desde que sua configuração seja substancialmente diferente de outras de mesma tipologia arroladas no item 2. *Revisão Bibliográfica* deste documento.

Após a aplicação da análise mostrada na Tabela 21, cada estratégia analisada será confrontada com as condições usualmente existentes nos sistemas de ônibus, verificando, segundo a graduação abaixo, as possibilidades de:

- o atendimento imediato dos requisitos;
- a possibilidade de que esse atendimento venha a ser factível;
- as dificuldades que possam vir a inviabilizar a aplicação;
- a completa inviabilidade de aplicação.

Esta análise permitirá indicações, ainda que qualitativas, da aplicabilidade de cada intervenção em sistemas de ônibus nas cidades brasileiras e, em casos positivos, as condições que devem ser obedecidas e ou alcançadas.

**Tabela 22 – Metodologia – Análise Qualitativa  
Modelo de Comparativo – Requisitos da Intervenção x Tipos de sistemas de ônibus**

ATRIBUTOS	PARADAS PROGRAMADAS PARA REGULAÇÃO - ("holding")		TIPO DE SERVIÇO				
	Análise	GRAU	BRT COM ITS	CORREDORES COM ITS	CORREDORES SEM ITS	COMUM COM ITS	COMUM SEM ITS
<b>Capacidade Tecnológica</b>							
AVL	Desejável que o serviço disponha dos equipamentos	B	1	1	3	2	4
APC	Maior facilidade nos serviços que dispõem desses equipamentos	C	2	2	3	2	4
COMUNICAÇÃO	Desejável que o serviço disponha de equipamentos e sistemas - Depende também do grau de integração entre Gestor e órgão de trânsito	B	1	1	3	2	4
MONITORAMENTO	Desejável que o serviço disponha de equipamentos e sistemas - Depende também de quem controla a Operação	B	1	1	3	2	4
INFORMAÇÕES	Necessária forma de informação escrita e ou de voz. Desejável equipamentos com informações "online"	A	1	1	2	3	4
OUTROS	Desejável que veículos tenham informação a bordo	B					
<b>Capacitação das Equipes Operacionais</b>							
MOTORISTAS	Necessidade de treinamento abrangente e intensivo	A	3	3	3	3	3
EQUIPES CAMPO	Necessidade de treinamento abrangente e intensivo especialmente nos casos de implantação a partir do campo	A	3	3	3	3	3
EQUIPES CCO	Necessidade de treinamento	A	2	2	5	4	5
COORDENAÇÃO CCO	Nos casos de implantação centralizada, poder de comando é fundamental	B	2	2	4	3	5
MÉTODOS E PROCESSOS	Desejável para o acompanhamento e desenvolvimento continuado das intervenções	B	3	3	4	3	4
<b>Condições Operacionais</b>							
SEGREGAÇÃO	Desejável segregação completa . Aceitável faixas exclusivas	B	1	1	2	4	4
ORGANIZ. REDE	dificuldades associadas à quantidade de linhas; casos de muitas linhas, imprescindível a condição de ultrapassagem	A	1	2	3	4	4
INTEGRAÇÃO	Não influi na implantação da estratégia	D	1	1	1	1	1
PROGRAMAÇÕES	Necessidade de capacitação de equipe para revisão constante da programação	B	1				
ESTRATÉGIAS CONTINGÊNCIAS	Não influi na implantação da estratégia	D	2	2	3	4	4
INFRAESTR. ESTAÇÕES	Necessária para informação aos usuários sobre as intervenções	B	1	2	3	4	4
CONTROLE TRÂNSITO	Não influi na implantação da estratégia	D	1	1	1	1	1
OPERAÇÃO TRÂNSITO	Não influi na implantação da estratégia	D	1	1	1	1	1
ATUAÇÃO INTEGRADA	Apenas entre equipes do órgão gestor e dos operadores	C	2	2	3	3	3
INTEGRAÇÃO DA INFORMAÇÃO	Não influi na implantação da estratégia	D	1	1	1	1	1
<b>Condições Institucionais e Contratuais</b>							
PROCEDIMENTOS EXTRAS	Necessária, mas possível de inclusão em contratos	B	2	2	2	2	2
REMUNER. OPERADORES	Necessária caso a intervenção represente aumento de frota	B	2	2	2	2	2
COMPETÊNCIA CCO	Imprescindível no caso de intervenções centralizadas	A	1	2	1	3	3
<b>Condições ambientais</b>							
HÁBITOS VIAGEM	Não há mudanças severas nos hábitos de viagem	C	1	1	1	1	1
COMUNICAÇÕES ALTERAÇÕES	Imprescindíveis recursos de comunicação embarcados e nas estações	A	1	2	3	5	5
REAÇÃO FALTA INFORMAÇÕES	Tendência a reações negativas, especialmente se não houver comunicação esclarecedora	B	2	3	4	5	5
MAIORES TEMPOS VIAGEM	Tendência a reações negativas, especialmente se não houver comunicação esclarecedora	B	2	3	4	5	5
	APLICABILIDADE		POSSÍVEL	POSSÍVEL	POSSÍVEL SOB CONDIÇÕES	DIFÍCIL OU INVIÁVEL	DIFÍCIL OU INVIÁVEL

**LEGENDA**

- 1 Serviço atende completamente
- 2 Serviço atende
- 3 Serviço atende com restrições
- 4 Serviço dificilmente atende
- 5 Serviço não atende

Uma resenha final, em forma de tabela, apresentará o resumo dessas condições para cada intervenção em relação aos cinco tipos de serviços considerados.

### **3.3. Análise Quantitativa**

Esta análise sucederá a Análise Qualitativa, uma vez que esta deve prover uma seleção das estratégias mais facilmente aplicáveis e com melhores resultados operacionais.

A simulação será feita com o emprego do Sistema VISSUM de simulação, desenvolvido pelo Grupo PTV ou por software similar disponível no mercado.

A rede montada deverá compreender um segmento expressivo de um Corredor de Ônibus na Região Metropolitana de São Paulo de média capacidade e alta frequência de serviços. Estudam-se, em princípio, duas opções:

- O Corredor Rebouças, gerido pela SPTrans, em princípio no trecho entre o Centro (Rua da Consolação) e o cruzamento com a Avenida Nações Unidas (Marginal do Rio Pinheiros).
- Corredor ABD, gerido pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos – EMTU-SP e operado com exclusividade pela Concessionária Metra Sistema Metropolitano de Transportes Ltda., provavelmente no trecho entre o Terminal Diadema e o Terminal São Bernardo do Campo.

A escolha do trecho encontra-se em exame visando assegurar, de um lado um sistema que represente as condições comumente encontradas nos sistemas urbanos e, por outro lado, tenha configuração operacional que permita uma análise mais acurada dos possíveis benefícios decorrentes das estratégias a serem analisadas.

O Corredor Rebouças apresenta como vantagens a significância de um corredor de alta capacidade na região central da cidade de São Paulo e a existência de condições adversas decorrentes de uma rede pouco organizada, ambos dados da realidade da mobilidade na cidade. Como desvantagens apresenta alta densidade de ônibus transitando nos horários de pico e níveis elevados de congestionamento do trânsito que podem dificultar o foco na análise das estratégias testadas.

No caso do Corredor ABD as conveniências invertem-se. Enquanto o sistema é exclusivo (não há competição entre linhas no mesmo espaço segregado), o que representa a vantagem de isolar variáveis que não fazem parte do cenário das

estratégias, as próprias condições favoráveis da operação e do trânsito podem representar um relativo distanciamento da realidade urbana.

As bases de dados de demanda poderão ser duas. A primeira delas, a Pesquisa Origem-Destino da Região Metropolitana de São Paulo de 2007 ou sua revisão de 2012, aquela que se mostre mais adequada para a simulação.

A segunda base de dados refere-se à operação dos sistemas cogitados, devendo ser obtidos mediante entendimentos já iniciados junto ao órgão gestor de cada sistema: SPTtrans no caso do Corredor Rebouças e EMTU-SP, no caso do Corredor ABD.

Dados dos volumes de trânsito poderão ser obtidos com a Companhia de Engenharia de Tráfego – CET de São Paulo ou com as Prefeituras de Diadema e de São Bernardo. Estudam-se ainda as estratégias a serem testadas e, de certa maneira, elas estão associadas aos resultados da Análise Qualitativa. De qualquer modo, estima-se que poderiam ser estratégias elegíveis as Linhas Expressas (Paradas Limitadas), Prioridade em Semáforos e Bilhetagem Desembarcada. Esta seleção preliminar é feita tendo em vista que cada estratégia obedece a princípios inteiramente diferentes das demais, cujos impactos não são suficientemente conhecidos numa realidade de países em desenvolvimento e guardam, entre si, diferenças fundamentais.

Se oportuno e se possível, a gama de experiências a serem testadas poderá ser ampliada, de maneira a abranger mais estratégias que, em geral, não são aplicadas em nossos sistemas.

#### **4. RESULTADOS**

Os resultados devem ser apresentados de maneira comparativa, sempre relacionados às condições vivenciadas em centros urbanos de países em desenvolvimento.

Considera-se natural que a tônica deste Capítulo seja ditada pelos números que indiquem fatos novos e relevantes para a operação dos sistemas de ônibus. Neste aspecto a Análise Qualitativa Análise Quantitativa mostra-se relevante, na medida em que seus resultados poderão ser comparados com os resultados obtidos nos estudos acadêmicos.

## 5. CONCLUSÕES

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ABREU, V. C.; FEITOZA F<sup>o</sup>, S.; PEIXOTO, N. M. O. Rede estrutural integrada de transporte da região metropolitana de Porto Alegre : uma visão sistêmica. In: 18<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2011.

AGUIAR, J. G. de; CORREIA, P. R. M. Como fazer bons mapas conceituais? Estabelecendo parâmetros de referências e propondo atividades de treinamento How to make good concept maps? Establishing benchmarks and proposing training activities Introdução. **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.

ARGOTE, J.; XUAN, Y.; GAYAH, V. V. Comparative analysis of various bus control strategies. **Ocf.Berkeley.Edu**, p. 20, 2012. Disponível em: <<http://www.ocf.berkeley.edu/~xuanyg/BusBunchingPaperV3.pdf>>.

AUGUSTO, E. **Panorama do sistema de transporte público em curitiba-pr**. 2015. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2015.

BARNETT, A. On controlling randomness in Transit Operations. **Transportation Science**, v. 8, n. 2, p. 102–116, 1974.

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.

BERREBI, S. J.; WATKINS, K. E.; LAVAL, J. A. A real-time bus dispatching policy to minimize passenger wait on a high frequency route. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 81, p. 377–389, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2015.05.012>>.

BRASIL, M. das C.-S. de M. U.-S. **Caderno de referência para plano de mobilidade urbana**. [s.l: s.n.]

BRASILEIRO, A.; HENRY, E. Afirmação da Viação de Ônibus Urbanos. In: **Viação Ilimitada - Ônibus da Cidades Brasileiras**. 1<sup>a</sup> ed. São Paulo: Cultura Editores Associados, 1999. p. 22.

BREITHAUPT, M. (GIZ-. Worldwide Panorama on BRT systems. In: 7<sup>a</sup> 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.

CEDER, A.; WILSON, N. H. M. Bus network design. **Transportation Research Part B**, v. 20, n. 4, p. 331–344, 1986.

CETURB, C. de T. U. da G. V. **CETURB-GV - História e Dados Operacionais**. Disponível em: <<http://www.ceturb.es.gov.br/default.asp>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

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.

CRUZ, L. C. Tarifa com Desconto para Deslocamentos Municipais em Sistemas Intermunicipais Tronco-alimentados. In: 13º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito - ANTP, Porto Alegre-RS. **Anais...** Porto Alegre-RS: Associação Nacional de Transporte Público – ANTP, 2001.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2009.04.002>>.

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.

EBERLEIN, X. J. **Real-time control strategies in transit operations: models and analysis**. 1995. Massachusetts Institute of Technology - MIT, 1995.

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.

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.

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. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-2142767401&partnerID=tZOtx3y1>>.

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. **TrSci Vol 20 Is 1.pdf**, v. 20, n. 1, p. 1–12, 1986.

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.

Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00614586>>.

HICKMAN, M. D. An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem. **Transportation Science Publication**, v. 35, n. 3, p. 215–237, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1287/trsc.35.3.215.10150>>.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.05.018>>.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. de S. **Dicionário houaiss da língua portuguesa**. 1ª Edição ed. Rio de Janeiro: Instituto Antonio Houaiss de Lexicografia, 2001.

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**, 2015. .

ITDP, I. for T. & D. P. **Manual de brt : bus rapid transit**. Brasília-DF: BRASIL - Ministério das Cidades, 2008.

ITDP, I. for T. & D. P. **Padrão De Qualidade BRT - Versão em Português**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/ITDP-Brasil\\_Padrão-de-Qualidade-BRT-2014\\_em-PT\\_versão-WEB.pdf](https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/ITDP-Brasil_Padrão-de-Qualidade-BRT-2014_em-PT_versão-WEB.pdf)>.

KOEHLER, L. A.; KRAUS JR, W.; CAMPONOGARA, E. CONTROLE DE RETENÇÃO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO Luiz Alberto Koehler. (ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ed.) In: XXI Congresso ANPET, Março, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2015.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/23249935.2016.1177135>>.

LARWIN, T.; GRAY, G.; KELLEY, N. **Bus Rapid Transit : A Handbook for Partners**. [s.l.: s.n.].

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2010.01.003>>.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.440>>.

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,[s.d.]

MARTE, C. L.; SILVA, A. L. da; DANTAS, A.; AZEVEDO, D. B.; SEPULCRI N°, 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 nº 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**. São Paulo: ANTP,

Associação Nacional de Transportes Públicos, 2012. p. 76–99.

MEGGINSON, L. C.; MOSLEY, D. C.; PIETRI, P. H. J.; HOPP, M. I. (Trad. . **Administração: conceitos e aplicações**. 4ª Edição ed. [s.l: s.n.]

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. Disponível em: <<http://www.revistas2.uepg.br/index.php/praxiseducativa/article/view/1298/944>>.

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.

PEREIRA, L. A. G.; LESSA, S. N. O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. **Caminhos de Geografia - Instituto de Geografia**, v. 12, n. 40, p. 26–45, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/rcg.v12i40.16414.g9175>>.

PERNAMBUCO, G. R. C. de T. **Histórico - Sistema Estrutural Integrado - Recife**. Disponível em: <<http://www.granderrecife.pe.gov.br/web/grande-recife/historico>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.005>>.

PRICINOTE, M. Â.; SEABRA, L. O.; TACO, P. W. G. Sistema Integrado de Transporte de Passageiros em Goiânia – da Crise à Oportunidade. In: 17º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito, Curitiba-PR. **Anais...** Curitiba-PR: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2009.

RABELO, R. F. Plano de Metas e consolidação do capitalismo industrial no Brasil. **E & G Economia e Gestão**, v. 2 e 3, n. 4 e 5, p. 44–55, 2003.

RMTC, R. M. de T. C. **Informações Institucionais - Goiânia**. Disponível em: <<http://www.rmtcgoiania.com.br/sobrea-a-rmtc/informacoes-institucionais>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

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. **São paulo interligado – o plano de transporte público implantado na gestão 2001-2004**. [s.l: s.n.]

SILVERMAN, N. C. Limited Stop Bus Service at New York City Transit. **Journal of Transportation Engineer.**, v. 124, n. 6, p. 503–509, 1998.

SPTRANS, – São Paulo Transportes. **SPTrans - Indicadores**. Disponível em:

<<http://www.sptrans.com.br/indicadores/>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

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\\_GESTAO\\_DO\\_TRANSPORTE.pdf](http://www.sptrans.com.br/pdf/biblioteca_tecnica/SISTEMAS_INFORMATIZADOS_PARA_A_GESTAO_DO_TRANSPORTE.pdf)>.

STIEL, W. C. **Onibus: uma história do transporte coletivo e do desenvolvimento urbano no {brasil}**. São Paulo: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2001.

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>>.

TANIGUSHI, C. **Transporte Público: Novos conceitos para o transporte de passageiros** Brasília-DF Brasil - Senado Federal – Comissão de Serviços de Infraestrutura – CI, 2009. Disponível em: <[http://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP20090914\\_transporte.pdf](http://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP20090914_transporte.pdf) ->.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.034>>.

URBS, U. de C. S. A. **URBS em números**. Disponível em: <<https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br>>.

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.

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. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1200899>>.

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.

ABREU, V. C.; FEITOZA Fº, S.; PEIXOTO, N. M. O. Rede estrutural integrada de transporte da região metropolitana de Porto Alegre: uma visão sistêmica. In: 18º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2011.

AGUIAR, J. G. de; CORREIA, P. R. M. Como fazer bons mapas conceituais? Estabelecendo parâmetros de referências e propondo atividades de treinamento How to make good concept maps? Establishing benchmarks and proposing training activities Introdução. **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.

ARGOTE, J.; XUAN, Y.; GAYAH, V. V. Comparative analysis of various bus control strategies. **Ocf.Berkeley.Edu**, p. 20, 2012. Disponível em:

<<http://www.ocf.berkeley.edu/~xuanyg/BusBunchingPaperV3.pdf>>.

AUGUSTO, E. **Panorama do sistema de transporte público em Curitiba-pr.** 2015. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2015.

BARNETT, A. On controlling randomness in Transit Operations. **Transportation Science**, v. 8, n. 2, p. 102–116, 1974.

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.

BERREBI, S. J.; WATKINS, K. E.; LAVAL, J. A. A real-time bus dispatching policy to minimize passenger wait on a high frequency route. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 81, p. 377–389, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2015.05.012>>.

BRASIL, M. das C.-S. de M. U.-S. **Caderno de referência para plano de mobilidade urbana.** [s.l: s.n.]

BRASILEIRO, A.; HENRY, E. Afirmação da Viação de Ônibus Urbanos. In: **Viação Ilimitada - Ônibus da Cidades Brasileiras.** 1ª ed. São Paulo: Cultura Editores Associados, 1999. p. 22.

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.

CEDER, A.; WILSON, N. H. M. Bus network design. **Transportation Research Part B**, v. 20, n. 4, p. 331–344, 1986.

CETURB, C. de T. U. da G. V. **CETURB-GV - História e Dados Operacionais.** Disponível em: <[p://www.ceturb.es.gov.br/default.asp](http://www.ceturb.es.gov.br/default.asp)>. Acesso em: 10 jan. 2017.

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.

CRUZ, L. C. Tarifa com Desconto para Deslocamentos Municipais em Sistemas Intermunicipais Tronco-alimentados. In: 13º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito - ANTP, Porto Alegre-RS. **Anais...** Porto Alegre-RS: Associação Nacional de Transporte Público – ANTP, 2001.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2009.04.002>>.

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.

EBERLEIN, X. J. **Real-time control strategies in transit operations: models and analysis**. 1995. Massachusetts Institute of Technology - MIT, 1995.

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.

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.

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. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-2142767401&partnerID=tZOtx3y1>>.

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. **TrSci Vol 20 Is 1.pdf**, v. 20, n. 1, p. 1–12, 1986.

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. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00614586>>.

HICKMAN, M. D. An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem. **Transportation Science Publication**, v. 35, n. 3, p. 215–237, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1287/trsc.35.3.215.10150>>.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2012.05.018>>.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. de S. **Dicionário houaiss da língua portuguesa**. 1ª Edição ed. Rio de Janeiro: Instituto Antonio Houaiss de Lexicografia, 2001.

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*, 2015. .

ITDP, I. for T. & D. P. **Manual de brt: bus rapid transit**. Brasília-DF: BRASIL - Ministério das Cidades, 2008.

ITDP, I. for T. & D. P. **Padrão De Qualidade BRT - Versão em Português**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/ITDP-Brasil\\_Padrão-de-Qualidade-BRT-2014\\_em-PT\\_versão-WEB.pdf](https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2014/07/ITDP-Brasil_Padrão-de-Qualidade-BRT-2014_em-PT_versão-WEB.pdf)>.

KOEHLER, L. A.; KRAUS JR, W.; CAMPONOGARA, E. CONTROLE DE RETENÇÃO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO Luiz Alberto Koehler. (ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ed.) In: XXI Congresso ANPET, Março, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2015.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/23249935.2016.1177135>>.

LARWIN, T.; GRAY, G.; KELLEY, N. **Bus Rapid Transit : A Handbook for Partners**. [s.l: s.n.].

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2010.01.003>>.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.440>>.

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,[s.d.]

MARTE, C. L.; SILVA, A. L. da; DANTAS, A.; AZEVEDO, D. B.; SEPULCRI Nº, 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 nº 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**. São Paulo: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2012. p. 76–99.

MEGGINSON, L. C.; MOSLEY, D. C.; PIETRI, P. H. J.; HOPP, M. I. (Trad. . **Administração: conceitos e aplicações**. 4ª Edição ed. [s.l: s.n.]

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. Disponível em: <<http://www.revistas2.uepg.br/index.php/praxiseducativa/article/view/1298/944>>.
- 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.
- PEREIRA, L. A. G.; LESSA, S. N. O processo de planejamento e desenvolvimento do transporte rodoviário no Brasil. **Caminhos de Geografia - Instituto de Geografia**, v. 12, n. 40, p. 26–45, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14393/rcg.v12i40.16414.g9175>>.
- PERNAMBUCO, G. R. C. de T. **Histórico - Sistema Estrutural Integrado - Recife**. Disponível em: <<http://www.granderecife.pe.gov.br/web/grande-recife/historico>>. Acesso em: 10 jan. 2017.
- 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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.005>>.
- PRICINOTE, M. Â.; SEABRA, L. O.; TACO, P. W. G. Sistema Integrado de Transporte de Passageiros em Goiânia – da Crise à Oportunidade. In: 17º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito, Curitiba-PR. **Anais...** Curitiba-PR: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2009.
- RABELO, R. F. Plano de Metas e consolidação do capitalismo industrial no Brasil. **E & G Economia e Gestão**, v. 2 e 3, n. 4 e 5, p. 44–55, 2003.
- RMTC, R. M. de T. C. **Informações Institucionais - Goiânia**. Disponível em: <<http://www.rmtcgoiania.com.br/sobrea-a-rmtc/informacoes-institucionais>>. Acesso em: 10 jan. 2017.
- 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. **São paulo interligado – o plano de transporte público implantado na gestão 2001-2004**. [s.l: s.n.]
- SILVERMAN, N. C. Limited Stop Bus Service at New York City Transit. **Journal of Transportantion Engineeer.**, v. 124, n. 6, p. 503–509, 1998.
- SPTRANS, – São Paulo Transportes. **SPTrans - Indicadores**. Disponível em:

<<http://www.sptrans.com.br/indicadores/>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

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\\_GESTAO\\_DO\\_TRANSPORTE.pdf](http://www.sptrans.com.br/pdf/biblioteca_tecnica/SISTEMAS_INFORMATIZADOS_PARA_A_GESTAO_DO_TRANSPORTE.pdf)>.

STIEL, W. C. **Onibus: uma história do transporte coletivo e do desenvolvimento urbano no {brasil}**. São Paulo: ANTP, Associação Nacional de Transportes Públicos, 2001.

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>>.

TANIGUSHI, C. **Transporte Público: Novos conceitos para o transporte de passageiros** Brasília-DFBrasil - Senado Federal – Comissão de Serviços de Infraestrutura – CI, , 2009. Disponível em: <[http://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP20090914\\_transporte.pdf](http://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP20090914_transporte.pdf) ->.

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. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.034>>.

URBS, U. de C. S. A. **URBS em números**. Disponível em: <<https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br>>.

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.

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. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1200899>>.

## APÊNDICE A - A Evolução do Transporte Público por Ônibus nas Cidades Brasileiras

### 1. DAS ORIGENS ATÉ A DÉCADA DE 1960

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. Em 1930, o Intendente Municipal de Porto Alegre afirma em uma exposição sobre o ônibus (STIEL, 2001).

*“Os auto-ônibus devem continuar a trafegar na cidade não como “jitney”<sup>19</sup>, não como concorrente e competidor direto do bonde elétrico...Ao contrário, para bem atender e servir ao público, os nossos auto-ônibus devem constituir um serviço regulamentado, de perfeita cooperação, de coordenação e complementar aos bondes, facilitando condução pelas ruas onde não haja trilhos e estabelecendo da ponta desses trilhos o transporte de penetração para os subúrbios, enquanto a densidade da população não justificar o prolongamento das dispendiosas linhas de elétricos.”*

Segundo Vasconcellos e Mendonça (VASCONCELLOS; 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.

O processo de urbanização entre 1940 e 1980 é comentado por Milton Santos (1993):

*“Entre 1940 e 1980, dá-se verdadeira inversão quanto ao lugar de residência da população brasileira. Há meio século atrás (1940), a taxa de urbanização era de 26,35%, em 1980 alcança 68,86%.”*

---

<sup>19</sup> Segundo Stiel, “Jitney teve origem na Costa do Pacífico nos Estados Unidos. Era um autobus independente, sem horários fixos, circulando apenas quando havia possibilidade de boa lotação, em concorrência e paralelamente aos bondes.”

*Nesses 40 anos, triplica a população total do Brasil ao passo que a população urbana se multiplica por sete vezes e meia. Hoje <sup>20</sup>, a população urbana brasileira passa dos 77%, ficando quase igual à população total de 1980.”*

Os números gerais da evolução mostrados pelo autor são apresentados na Tabela 1

**Tabela 1– Brasil – Variação da População por década  
Comparativo População Total x População Urbana - Período 1940-1980**

PERÍODO	VARIÇÃO POPULAÇÃO TOTAL		VARIÇÃO POPULAÇÃO URBANA	
	EM HABITANTES (mil habitantes)	PERCENTUAL (%)	EM HABITANTES (mil habitantes)	PERCENTUAL (%)
1940-1950	10.618	25,69%	7.892	72,46%
1950-1960	18.247	35,12%	13.173	70,13%
1960-1970	22.948	32,69%	20.949	65,55%
1970-1980	25.960	27,87%	29.108	55,01%
<b>1940-1980</b>	<b>77.873</b>	<b>188,43%</b>	<b>71.122</b>	<b>653,03%</b>

FONTES: (SANTOS, 1993)

**Embora a motorização e a rodoviarização** 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) , um plano de governo ambicioso e de cunho desenvolvimentista. O plano contemplava ações e metas nos setores por ele arrolados como estratégicos: energia, transporte, alimentação, indústria de base, educação e construção de Brasília.

<sup>20</sup> O autor, quando se refere a ‘hoje’, trata de 1993, data da primeira edição do livro.

No setor de transportes, o plano alinhava metas que convergiam para o estabelecimento de uma extensa rede rodoviária, destacando-se, entre outras:

- pavimentação de 3.000 km , posteriormente elevada para 5.000 km;
- construção de 10.000 km de novas rodovias, depois ampliada para 12.000 km .

Para a indústria automobilística estava reservada a meta que previa a produção de 170.000 veículos em 1960 (FARO; SILVA, 1991).

Os investimentos por setor naquele período são mostrados na Tabela 2 a seguir.

**Tabela 2 – Plano de Metas**  
**Estimativa do investimento total – 1957-61 – Valores em US\$ milhões**

METAS	PRODUÇÃO INTERNA	IMPORTAÇÃO	TOTAL	%
Energia	1.374,52	862,2	2.236,72	42,4%
Transporte	941,41	582,6	1.524,01	28,9%
Alimentação	59,84	130,9	190,74	3,6%
Ind. básica	433,67	742	1.175,66	22,3%
Educação	149,99	0	149,99	2,8%
<b>TOTAL</b>			<b>5.277,12</b>	<b>100,0%</b>

FONTE: LESSA, Carlos – 15 anos de Política Econômica apud (RABELO, 2003)

Faro e Silva apud (PEREIRA; LESSA, 2011) mostram que as metas citadas foram suplantadas: pavimentaram-se 6.202 km, construíram-se 14.970 km de rodovias e fabricaram-se 199.180 unidades de veículos.

A construção da capital federal em Goiás (igualmente meta do plano) contribuiu para o movimento de rodoviarização<sup>21</sup>. A partir de Brasília foram irradiados os grandes eixos rodoviários que impulsionariam a chamada Integração Nacional.

Não foi encontrada, na bibliografia consultada, nenhuma referência a uma conjunção de fatores que pode ter sido 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

<sup>21</sup> O termo rodoviarização não é encontrado no Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa (HOUAISS; VILLAR, 2001). É, todavia, empregado, com alguma frequência, na literatura técnica dedicada aos transportes. “Rodoviarização” pode ser identificada, basicamente, como uma linha de ideias iniciativas de grupos que defendiam e defendem os meios de transporte sobre rodas, isto é, transitando pelos sistemas viários urbanos e rodoviários.

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 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 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.

Waldemar Stiel (2001) indica como primeiro ônibus nacional um modelo de chassis da Fábrica Nacional de Motores – FNM com carroceria Grassi em 1960. Durante aquela década desenvolveu-se na indústria automobilística nacional a fabricação de ônibus que em boa parte empregavam chassis de caminhões e recebiam carrocerias fabricadas pelas chamadas empresas “encarroçadoras”.

Ainda na década de 1960 teve início e prosseguiu, com relativa velocidade o processo de desativação dos bondes nas principais cidades brasileiras. O último serviço de bondes na cidade de São Paulo foi desativado em 1968.

Deve-se ainda observar que os ônibus concorreram ativamente para o processo de “espraiamento” urbanístico das cidades de maior porte. As populações de baixa renda procuravam terrenos de baixo custo para solução de seu problema habitacional que 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. Como afirmam os autores de “Viação Ilimitada” (BRASILEIRO; HENRY, 1999) :

*“Desde então e até hoje, o ônibus parece ser uma arma de uso mais flexível e adequado do que o trem ou metrô na guerra cotidiana de apanhar as massas em casa e entrega-las em seu destino...*

*[...]*

*Daí que, quando o ritmo da urbanização se tornou desenfreado, o ônibus venceu o bonde, levando a seu desmonte. ”*

## **2. DE 1970 A 1995**

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 (STIEL, 2001).

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. Segundo aquele autor:

*“Foram criados os eixos Norte e Sul, ligados ao Centro da Cidade. Entraram em operação as linhas expressas e os alimentadores. A integração acontecia em terminais e o transporte era feito em ônibus especialmente projetados para 100 passageiros, com comunicação visual especial e cores diferenciadas para as linhas expressas e alimentadoras. Este sistema transportava 54 mil passageiros/dia, cerca de 8% da demanda total.”*

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.

## **2.1. O advento dos Corredores de Ônibus**

Entre 1977 e 1982, foram várias as iniciativas dedicadas à melhoria dos sistemas de ônibus, contando, num período relativamente curto, com o apoio do Governo Federal que, à época, criou a Empresa Brasileira de Transportes Urbanos - EBTU e o Sistema Nacional de Transportes Urbanos - SNTU. Entre outras ações, podem ser citadas: implantação de três Corredores de Ônibus em Porto Alegre; implantação de Faixas Exclusivas de Ônibus nas avenidas de maior movimento, 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. Três exemplos desse tipo de intervenção ocorreram em Los Angeles em 1973 e 1979 e em Houston em 1979. Em virtude da crise do petróleo, muitos dos busways foram convertidos em faixas para veículos com alta ocupação – HOV na sigla em inglês para High Occupancy Vehicle Lanes (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. Dada a disparidade dos modos de pagamento entre os sistemas e as limitações técnicas dos sistemas de arrecadação, durante muito tempo as transferências somente eram feitas em áreas fechadas (Terminais), também chamadas, no jargão técnico, de “Áreas Pagas”, fato que limitava a capacidade para integrações.

Os corredores foram implantados predominantemente em eixos de grande afluência de veículos. As características desejáveis tanto do ponto de vista físico quanto operacional podem ser resumidas em:

- segregação física da via;
- estações de embarque e desembarque dotadas de condições de abrigo e segurança;
- número limitado de linhas estruturais;
- frota composta de veículos com maior capacidade;

- operação com controle central;
- quando possível, pagamento externo ao veículo.
- projeto operacional contemplando a organização da operação e da fiscalização, incluindo os meios de controle; ações integradas entre os órgãos com jurisdição sobre a via, com ênfase no órgão gestor de trânsito; estratégias operacionais para enfrentamento de contingências, tais como enchentes, acidentes de trânsito, remoção de veículos.

Especialmente no caso dos Corredores de Ônibus, raramente essas características foram contempladas integralmente. Em muitos casos as deficiências fizeram e ainda fazem com que os resultados operacionais sejam menores do que os esperados. Entre os fatores 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.

## **2.2. Estruturação de redes com hierarquização de linhas**

Um aspecto relevante trazido pelos sistemas de alta e média capacidade foi a necessidade de organização dos sistemas de ônibus.

Cabe aqui uma observação: 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 dependem dos serviços estruturais, mas sem eles tornam-se ineficientes e apresentam baixos níveis de serviço. Daí a oportunidade e necessidade de organização dos serviços.

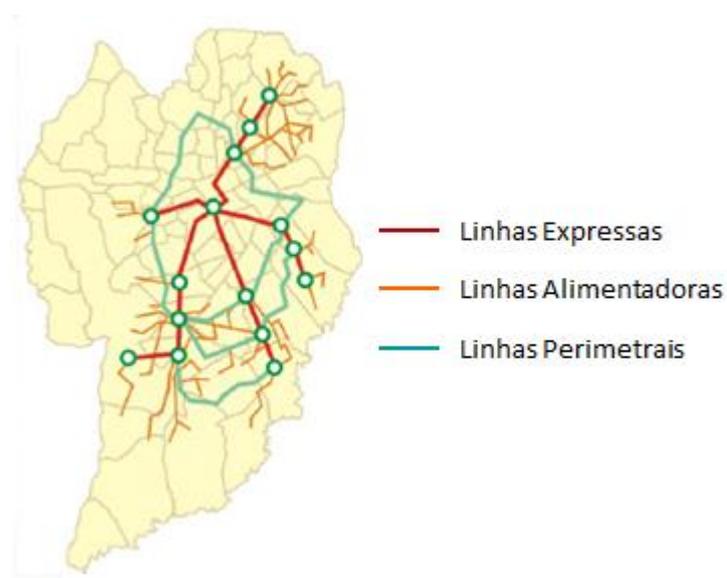
Assim teve origem o que se pode chamar de “hierarquização de linhas”. Trata-se de dividir os serviços em tipos distintos de linhas que atendem a objetivos diferentes, embora sejam complementares entre eles. As redes resultantes são chamadas por diversos nomes: Redes Estruturadas, Redes Tronco-Alimentadas,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

O resultado final consiste em menores tempos de viagem e com níveis de serviço mais elevados, embora, normalmente, represente, para os usuários, maiores quantidades de transferências. Não obstante as desvantagens com que as transferências são vistas pelos usuários, elas constituíram-se num dos fatores de sucesso do sistema de Curitiba: desde o início os serviços foram organizados compostos pelas chamadas linhas locais (atendendo às diversas comunidades) e as linhas “expressas”, que proviam o transporte nas principais vias em direção ao centro da cidade. O resultado final eram menores tempos totais de viagens.

A Figura 1 mostra a configuração da Rede de ônibus em Curitiba em 1980. A terminologia empregada anteriormente, restrita às “expressas” e “alimentadoras”, neste período já havia sido acrescida das linhas “perimetrais”.

**Figura 1 – Rede Integrada de Transporte de Curitiba  
Hierarquização de Linhas - 1980**



FONTE: Transporte Público - Novos conceitos para o transporte de passageiros (TANIGUSHI, 2009) - Adaptado do original

Com a difusão da estruturação de redes no Brasil, aumentaram significativamente os tipos de linhas encontrados nos projetos de rede. Mais uma vez citando o caso de

Curitiba, naquele sistema encontram-se hoje as modalidades de linhas mostradas na Tabela 3.

**Tabela 3- Sistema de ônibus de Curitiba  
Tipos de Linhas - 2015**

TIPO DE LINHA	FUNÇÃO	VEÍCULOS	
		TIPO	CAPACIDADE (passags.)
EXPRESSAS	Transporte de massa da cidade. Vias próprias segregadas (Eixos estruturantes). Ligam os terminais de integração às áreas centrais. Paradas realizadas nas estações tubo.	Biarticulados	270
		Articulados	180
ALIMENTADORAS	Ligação entre os terminais de integração e os bairros.	capacidades variadas em função da demanda	N/D
INTERBAIRROS	Interligam terminais e bairros de regiões diversas da cidade sem passar pela região central	Capacidades variadas	110 a 160
DIRETAS ("ligeirinho")	Auxiliares às expressas e interbairros - ligações pontuais mais distantes. Paradas médias a cada 3 km.	N/D	N/D
TRONCAIS	Ligação dos terminais de bairro ao centro	Capacidades variadas	96 a 160
INTERCIDADES	Ligação de municípios da região metropolitana aos terminais urbanos	N/D	94
CONVENCIONAIS	Ligação das áreas da cidade não atendidas pelos terminais de integração	Capacidades variadas	40 a 160
CIRCULAR CENTRO	Ligação entre pontos do centro expandido da cidade.	Micro-ônibus	N/D
INTER-HOSPITAIS	Atendimento de deslocamento entre hospitais, clínicas e laboratórios próximos à área central da cidade	Layout específico	22
MADRUGUEIROS	Atendimento noturno em períodos fora do horário de operação do sistema	N/D	N/D
SITES	Atendimento ao Sistema Integrado de Ensino Especial e às escolas para portadores de deficiência física ou mental	Veículos adaptados às condições	N/D
AEROPORTO	Ligação do Aeroporto Internacional Afonso Pena à área central da capital	Micro-ônibus	N/D

FONTE: Panorama do Sistema de Transporte Público em Curitiba-PR (AUGUSTO, 2015)

### 2.3. Chega o ferramental de ITS para os ônibus

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 sistema 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. Eram compostos de alavancas que operavam elementos de sinalização, com intertravamento entre esses elementos, isto é, determinado elemento somente poderia ser acionado se o elemento adjacente já estivesse liberado.

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, entre os quais podem ser destacados (ALOUCHE; NAKAGAWA, 2012):

- Sistema de Proteção Automática (ATP – Automatic Train Protection), que se utilizava da tecnologia de blocos fixos com componentes baseados em relés vitais, de **falhas-seguros (fail-safe)**;
- Sistema de Operação automática dos trens ATO– Automatic Train Operation;
- Sistema de Supervisão Automática da Operação (ATS – Automatic Train Supervision);
- Centro de Controle Operacional – CCO integralmente informatizado, com a centralização operacional para a supervisão e controle global de todos os subsistemas;
- Sistema eletrônico de bilhetagem empregando bilhete com banda magnética do tipo “Edmonson”, com Sistema Centralizado de Arrecadação e Controle de Acesso.

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, 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 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.

#### **2.4. Intensidade de uso do ferramental de ITS**

Hoje são muitos 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 técnicos envolvidos, resistências geradas por conta da “cultura empresarial”. Capítulo do Caderno Técnico publicado pela ANTP (DARIDO; PENA, 2012) reforça tal preocupação:

*“As estruturas organizacionais e os ordenamentos jurídicos terão uma grande influência na facilidade de implantação do ITS, sobretudo quando se tratar do gerenciamento de mudanças. Uma das fronteiras mais difíceis de superar na implantação de sistemas ITS é a transição dos sistemas, estruturas e processos de trabalho antigos para um sistema mais holístico, transparente, accountable e disponível. O gerenciamento de mudanças é uma pedra angular da implantação do ITS.”*

## **2.5. As etapas da Reestruturação dos Serviços**

Verificando-se as etapas de envolvidas na reestruturação e na operação dos serviços nos órgãos gestores dos sistemas de ônibus, em síntese e com possíveis gradações, encontra-se o quadro geral descrito a seguir:

### **2.5.1. Projeto das Redes**

Na maior parte dos casos, como já foi descrito neste documento, as redes de ônibus foram formadas por adição de novas linhas ao longo do tempo, apresentando baixos níveis de serviço, além de técnica e economicamente ineficientes: linhas numerosas, longas e pouco densas, baixos índices de renovação e baixos valores de Índice de Passageiros por Quilômetro - IPK, frotas relativamente excessivas em virtude das baixas velocidades comerciais, etc.

Recentemente desenvolveram-se numerosos projetos de reestruturação de redes, elaborados, em geral, 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 não se localiza no desenho das redes, mas sim no impacto que suas implantações provocam nos hábitos dos usuários, principalmente pelo aumento de transferências. O resultado é a postergação na implantação desses projetos, que será vista mais à frente neste documento.

### **2.5.2. 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) ao cálculo do tempo de percurso a partir das velocidades comerciais médias para o conjunto das linhas ou por trechos; (ii) especificação dos veículos com base em padrões de mercado ou de padrões do órgão, quando existentes; (iii) dimensionamento da frota com base nos dados de origem-destino disponíveis ou projetados; (iv) programação horária dos serviços por número de partidas. Não são numerosos os órgãos gestores que empregam sistemas de programação disponíveis no mercado. Também não se observam revisões periódicas da programação com base nos resultados dos sistemas de bilhetagem ou mesmo 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. Algumas dessas operadoras empregam sistemas específicos de programação.

### **2.5.3. Monitoração e Controle da Operação**

Nesse sentido, o caso da SPTRANS é emblemático. Há mais de dez anos, todos os quase 15 mil veículos da frota municipal de São Paulo são dotados de equipamentos embarcados capazes de proceder ao sensoriamento remoto, a 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 é 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, para não dizer nenhum deles, 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 avanço mais recente nos desenvolvimentos para sistemas de ônibus: os BRT (na sigla em inglês para Bus Rapid Transit).

### **2.6. 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:

- 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.
- 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 foi, até a data do documento citado, realmente implantada nos Estados Unidos.
- 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 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.*" (ITDP, 2008).

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 defensoras desta modalidade, para efeito de divulgação, tratam Corredores convencionais e BRT como um mesmo modo de transporte, computando as quantidades de 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 feitas para grupos 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, mais precisamente, da Engenharia de Operações de Sistemas de Transporte.

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

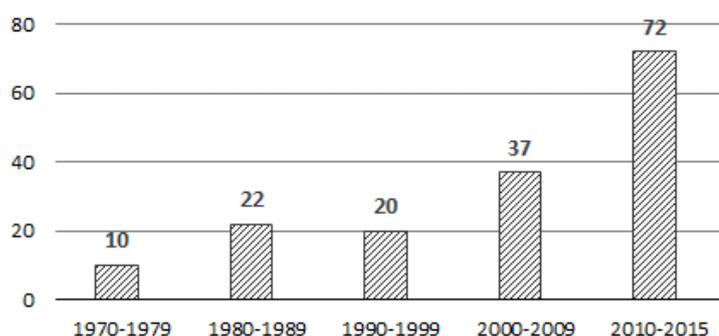
Seria desejável que, assim como nos metrô e ferrovias, o conjunto de projetos também abrangesse o Projeto Operacional que, em linhas gerais compreenderia: projeto de equipamentos e sistemas de ITS voltados às necessidades operacionais, estas, por sua vez, adequadas os objetivos finais do projeto; desenho da Organização da Operação, envolvendo as diversas unidades e instâncias responsáveis pela

Operação e suas respectivas atribuições; mecanismos de programação, controle e análises operacionais de modo a harmonizar a necessária flexibilidade operacional com a estrutura de comando operacional.

Além de constituir uma das bases para o desenvolvimento dos BRT, 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.

Trabalho de Ibarra et al (2015) que é uma das referências deste documento para o registro de estudos relativos ao desenvolvimento de projetos, programação e controle de redes de ônibus, faz uma varredura dos trabalhos publicados a respeito desde a década de 1970. Mesmo considerando que um estudo como este tenha mais interesse nos artigos científicos mais atuais, não deixa de ser notável a evolução do número de estudos selecionados em cada período mostrada no Gráfico 1 a seguir:

**Gráfico 1 – Artigos científicos - projetos, programação e controle de ônibus urbanos**  
**Evolução de artigos citados por período de publicação**



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

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 em Plano de Mobilidade para a cidade de São Luís-MA (FERIANCIC; O'KEEFE, 2015).

## **2.7. A Reestruturação das Redes de Ônibus em Algumas Capitais Brasileiras**

No âmbito Institucional, a partir da década de 1990 surgiram e prosperaram as pressões de ordem legal e jurídica para que os Poderes Concedentes (Estados e Prefeituras) regularizassem as delegações para os Serviços de Ônibus por meio de licitações para Concessões 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 solução para a sustentabilidade econômica aponta para a reorganização funcional dos sistemas, de modo a reduzir os custos por meio da reestruturação das redes. São encontrados vários exemplos em que a licitação para as Concessões seja 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 no seus deslocamentos.

No âmbito da ANTP, a Comissão de Estudos de Sistemas Integrados de Transporte Público Urbano (ANTP, 1999) defende e condiciona a ideia:

*“Integrar operacionalmente os diferentes modos de transporte em uma mesma cidade é organizá-los de forma complementar, respeitando as características operacionais de cada sistema de transporte, aumentando a acessibilidade de seus usuários. É adotar 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 a integração entre os ônibus municipais e o metrô (recém-inaugurado) 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, e os usuários seguem 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. Por isto, entendeu-se ser oportuno realizar um breve rastreamento das experiências antigas e recentes em algumas capitais e centros de Regiões Metropolitanas no Brasil.

### **2.7.1. Curitiba**

Já foi mostrada neste documento a evolução desse inovador sistema de transporte urbano por ônibus inaugurado inicialmente em 1974.

Atualmente abrange uma rede extensa, apresentando, segundo o site da URBS (URBS, 2017), empresa gestora, os seguintes indicadores:

- Passageiros transportados (dia útil): 1.,62 milhões
- Quantidade de Linhas: 250
- Frota Operacional: 1.320 veículos
- Média de Idade da Frota: 7,0 anos
- Quilometragem percorrida por dia útil: 320.090 km

A última licitação para a Concessão do sistema foi concluída em 2010. O sistema vem atravessando uma crise relativamente duradoura. Como a remuneração das empresas operadoras é feita por custo e a Prefeitura e o Estado subsidiam a operação, o valor da subvenção vem crescendo e com o advento da crise financeira, a Prefeitura postergou o reajuste da tarifa de referência. No início de 2015 o Estado rompeu o convênio que mantinha com a Prefeitura para a Operação das linhas metropolitanas. Com isto, o alcance da rede, que era metropolitano, retrocedeu, restringindo-se apenas à rede municipal.

### **2.7.2. Região Metropolitana do Recife**

Com início de suas atividades em 1980, a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de Recife – EMTU/Recife foi o primeiro órgão gestor a ser criado com jurisdição metropolitana.

Em 1994 teve início a implantação do Sistema Estrutural Integrado – SEI que reorganizou o sistema de ônibus com hierarquização de linhas.

Atualmente compreende 185 linhas, das quais 123 são alimentadoras, 3 Perimetrais, 24 troncais, 18 Interterminais, 6 transversais e 11 circulares, atendendo dez dos quatorze municípios da Região Metropolitana.

Em 2008 foi criado o Grande Recife Consórcio de Transporte, que substituiu a EMTU/Recife na gestão do transporte por ônibus na Região Metropolitana.

Em 2013 foi realizada pelo Consórcio a Licitação para a Concessão dos Serviços divididos em sete lotes. No final daquele ano foram assinados os contratos relativos aos dois lotes em que seriam construídos os BRT. Não foram assinados os contratos

dos demais cinco lotes. Fonte: Site Grande Recife – Consórcio de Transporte (PERNAMBUCO, 2017).

### **2.7.3. Região Metropolitana da Grande Vitória**

Segundo Cruz (2001) e Ceturb-GV (2017), em 1984, com apoio da Empresa Brasileira de Transportes Urbanos – EBTU, subordinada ao Governo Federal, foi criada a Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória - CETURB/GV empresa pública com a atribuição de gerir o transporte urbano de passageiros na Região Metropolitana.

Em 1986 começou a ser implantado o Sistema TRANSCOL, rede estruturada abrangendo toda a Região Metropolitana.

Atualmente encontra-se no final da implantação do denominado Transcol III, com realização de investimentos em infraestrutura viária e terminais.

A Ceturb-GV (2017) informa que o sistema é operado por 2 consórcios privados por Contratos de Concessão assinados em 2014, contando com frota operacional de 1.458 veículos com média de idades dos ônibus convencionais de 4,26 anos e dos ônibus articulados de 6,20 anos. Transporta cerca de 15,2 milhões de passageiros por mês.

### **2.7.4. Município de São Paulo**

A rede de ônibus municipal é gerida pela São Paulo Transportes S.A. – SPTrans, que indica (SPTRANS, 2017) frota contratada de 14.760 ônibus com idade média de 5,75 anos operados na rede principal por dois Consórcios de empresas por Contratos de Concessão e na rede local por Cooperativas e empresas de pequenos operadores sob o regime de Permissão. Transporta cerca de 243 milhões de passageiros por mês. Em 2001 a empresa desenvolveu programa ambicioso, o “São Paulo Interligado” (SÃO PAULO, 2004) , que previa uma série de Corredores de Ônibus dos quais foi implantada uma parcela, a implantação realizada do Bilhete único que permite transferências múltiplas com limite temporal e ainda o plano de estruturação da Rede. Em 2003 foram assinados os Contratos de Concessão para as linhas principais e feitas as permissões para os serviços locais. No entanto, a estruturação das linhas não se completou e as linhas ocuparam os corredores de forma aproximada àquela antes observada nas vias sem prioridade. O resultado foi a operação ineficiente daqueles equipamentos.

Em 2016, já encerrados os contratos de Concessão anteriores, a SPTrans elabora novo Plano de Reestruturação da Rede, associado à licitação de concessão publicada. No entanto, a licitação foi suspensa e não retomada até o momento, não havendo previsão para o início de implantação da nova rede.

#### **2.7.5. Município do Rio de Janeiro**

Em 2010, a Prefeitura do Município do Rio de Janeiro assinou Contratos de Concessão de sua Rede de ônibus com quatro Consórcios de empresas operadoras. Os contratos preveem que os Concessionários são responsáveis pela operação dos três sistemas de BRT atualmente implantados e de outros sistemas desse tipo previstos para o futuro, além de uma futura hierarquização de linhas, da qual ainda não há informações quanto a sua implantação sistemática.

#### **2.7.6. Distrito Federal - Brasília**

Anos após o início da licitação para a Contratação de Concessões, em 2013 foram assinados os contratos que previam a reestruturação da rede conforme projeto desenvolvido pelo DFTRANS, o órgão gestor do sistema de ônibus.

Até o momento não há notícias da implantação sistemática da rede, embora tenham sido anunciadas implantações localizadas de linhas.

#### **2.7.7. Município de Porto Alegre**

Abreu et al (ABREU; FEITOZA F<sup>o</sup>; PEIXOTO, 2011) relatam o desenvolvimento do Plano Integrado de Transporte e Mobilidade Urbana (PITMUrb), concluído em 2009 que incluiu o Sistema de Integração (SIT), a Rede Estrutural Multimodal Integrada para a Região Metropolitana.

No entanto, não há notícias da implantação dessa rede. Em 2015 foram assinados os Contratos de Concessão dos Serviços de Ônibus. Não há, no material consultado, nenhuma referência à Reestruturação da Rede.

#### **2.7.8. Região Metropolitana de Goiânia**

(PRICINOTE; SEABRA; TACO, 2009) relatam que, depois de profunda crise no sistema de transportes da Região Metropolitana, a partir de 2003 foram criados órgãos colegiados para a gestão compartilhada da mobilidade: a Câmara Deliberativa de

Transportes Coletivos da Região Metropolitana de Goiânia (CDTC-RMG) – e a Companhia Metropolitana de Transportes Coletivos (CMTC).

Em seguida foi criada a Rede Metropolitana de Transportes Coletivos –RMTC (RMTC, 2017) uma rede estruturada com linhas troncais e alimentadoras, as troncais divididas em ligações radiais, diametrais e perimetrais.

Em 2008 foram assinados novos contratos de concessões e a Rede foi implantada.

## **APÊNDICE B – TRABALHOS RELATIVOS A PARADAS PARA REGULAÇÃO ÍNTEGRA DAS RESENHAS**

### **1. ESTUDOS PIONEIROS PARADAS PARA REGULAÇÃO PROGRAMADAS**

#### **1.1. E. E. Osuna e G. F. Newell - 1972**

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. Em suas conclusões os autores recomendam que a estratégia não deve ser aplicada para prevenir situações de deterioração dos intervalos, devendo-se esperar até que aconteçam. Recomendam ainda que a aplicação do modelo deva ser feita com moderação, apenas o suficiente para evitar que a situação ultrapasse algum limite tolerável. 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.”

#### **1.2. 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, envolvendo as estações Park Street e Washington Street (a estação mais movimentada da linha no sentido de South Boston e Quincy para Harvard Square-Cambridge). O próprio autor fez, em diversos sábados à tarde no verão de 1973, as medições de atrasos em relação à programação para o período, que era de intervalos de 5 minutos entre os trens.

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 rumo a Cambridge e à vizinha Estação Park Street, causando o inconveniente de

espera somente à minoria dos viajantes vindos do sul de Boston que prosseguissem além da Washington Street.

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. Barnett (1974) que, quando a intervenção é aplicada sob o formato elástico aos dados reais, o tempo de espera médio pode ser reduzido a um nível somente alguns centésimos acima do mínimo do modelo de 2.53 minutos, não tendo restado claro como chegaram a tal conclusão. No trabalho foram considerados apenas os tempos totais de viagem, não tendo sido separados entre tempo de espera e tempo no veículo. (EBERLEIN, 1995) refere-se a trabalho de Newell em que aquele autor deu sequência ao trabalho de (OSUNA; NEWELL, 1972) formulando o modelo de uma estação (ponto de controle) e dois veículos circulando, assumindo uma taxa de chegada de passageiros constante durante qualquer intervalo entre chegadas de ônibus. A variável de decisão e a função objetivo foram as mesmas de Osuna & Newell (1972), mas em vez de usar uma distribuição contínua do headway do veículo, ele, pela primeira vez, empregou, separadamente, os tempos de parada e de percurso entre as estações.

### **1.3. Mark Abkowitz; Amir Eiger e Israel Mark Engelstein - 1986**

Abkowitz; Eiger e Engelstein (1986) avançam na resolução na modelagem da variação dos intervalos (“headways”), coroadando três outros artigos por eles citados: Abkowitz, e Engelstein –1983a<sup>22</sup>, 1983b<sup>23</sup> e 1984<sup>24</sup>.

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

---

<sup>22</sup> Abkowitz, M. and Engelstein, I. (1983a). “Factors Affecting Running Time on Transit Routes.” Transportation Research, 17A, 2, 107-113.

<sup>23</sup> 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.

<sup>24</sup> Abkowitz, M. and Engelstein, I. (1984). “Methods for Maintaining Transit Service Regularity.” UMTA, Report No. NY-06-0097.

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.

A estratégia de retenção é do tipo “limiar”, isto é, o resultado da otimização específica um limite de “headway”. Independentemente da diferença de intervalo entre os veículos. Esta abordagem é usada provavelmente porque as funções estimadas de probabilidade de progresso são usadas no lugar de informações de “headway” em tempo real. No entanto, com informações em tempo real disponíveis, o tempo de espera não precisa ser especificado como um único valor ótimo e pode variar de acordo com o andamento real de cada veículo.

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. (EBERLEIN, 1995) aponta para o fato de que, mesmo para os tipos mais simples de estratégia e sistemas de idealizados, os pesquisadores demonstraram que o problema do “headway” seria difícil de analisar e sugeriram que os modelos analíticos podem não ser muito úteis. No entanto, uma vez que, atualmente, as funções de probabilidade podem ser substituídas por informações em tempo real, o problema da retenção pode tornar-se mais fácil de analisar e resolver - talvez até analiticamente.

Ainda segundo (EBERLEIN, 1995) provavelmente devido à falta de dados em tempo real, poucos artigos avaliaram explicitamente o efeito do tempo de parada nos pontos na variação do “headway” ou consideraram-no integralmente. Em vez disso, foram usados o tempo de percurso total do veículo composto, onde o tempo de permanência e o tempo de viagem não foram separados. Cita Koffman (1978) , apontando que foi provavelmente o único que separou o tempo de permanência e o tempo de percurso entre estações em seu modelo de simulação. Embora Engelstein (1983) tenha concluído, em sua análise de regressão, que o tempo de permanência contribui significativamente para o tempo de percurso total do ônibus e sua variação, ele usou apenas o tempo de execução composto (parada mais percurso) em seus modelos de simulação.

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. PARADAS PARA REGULAÇÃO DINÂMICAS**

### **2.1. Xu Jun Eberlein - 1995**

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. Seja pelo tempo decorrido desde que foi elaborado, pelo grau de inovação, pela abrangência ou pelo grau de detalhamento, o estudo é numerosamente citado nos artigos publicados desde então e voltados às medidas associadas à regularização dos serviços de transporte público urbano.

Eberlein (1995) confirma que estava no início o desenvolvimento de modelos baseados em informações em tempo real ao afirmar:

*“Nos últimos quinze anos, sistemas automatizados, sistemas de informação, sistemas de controle de veículos e tecnologias relacionadas avançaram muito. Os anos 90 tornaram-se a “era da informação”. Durante este período, muitas agências de transporte público **começaram a empregar essas tecnologias emergentes** para melhorar seus serviços. Cada vez mais, os sistemas ferroviários e de autocarros começam a utilizar sistemas de Localização Automática de Veículos (AVL), sistemas de Identificação Automática de Veículos (AVI) e Contadores Automáticos de Passageiros (APC). Atualmente, não existem sistemas de controle de operações em tempo real*

*totalmente automatizados em uso na América do Norte (Schweiger et al., 1994)<sup>25</sup>.” (grifos meus)*

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.

Entende-se caber aqui uma digressão: tanto o trabalho de Barnett (1974) quanto o de Eberlein (1995) adotam como base de dados linhas de metrô e não linhas de ônibus. Essa característica provavelmente está ligada à inexistência ou incipiência de redes de ônibus dotadas de instrumentos e sistemas de ITS que permitissem a monitoração e controle em tempo real, embora Eberlein faça referências de que seu trabalho poderia ser aplicado em serviços de ônibus.

Ainda situando a preocupação com a possível, mas então incipiente, existência de dados de controle em tempo real, (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.

Eberlein (1995) afirma que a maioria das pesquisas anteriores sobre o controle em tempo real dos sistemas de ônibus concentrava-se na aplicação das paradas para regulação individualizadas, enquanto no setor metroferroviário versava principalmente sobre controle de velocidades. Mostra sua surpresa com o fato de que, embora as estratégias de limitação de paradas e meia viagem já fossem, à época, empregadas com frequência, eram poucos os trabalhos a elas dedicados.

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

---

<sup>25</sup> Schweiger, Carol L., et al. (1994), Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art, Update '94, Study#DOT-VNTSC-FTA-93-8, for the FTA, DOT.

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. Justifica esta função objetivo, primeiro com o argumento que muitos estudos sobre demandas de transporte atribuem maior peso aos tempos de espera por conta da percepção negativa dos usuários. Segundo, embora o tempo total de viagem (tempo de espera mais tempo de percurso) possa ser usado, o componente de tempo de percurso numa função objetivo com esse teor, é suscetível de apresentar uma contribuição muito menor.

Admite que o tempo de percurso pode afetar os resultados. A estratégia de linhas expressas pode reduzir o tempo de permanência no veículo por reduzir os tempos de percurso, enquanto o “holding” pode aumentar tempo de permanência dos passageiros nos veículos. Assim, a exclusão do tempo de percurso da função objetivo pode subestimar benefícios das linhas expressas e superestimar os benefícios da retenção. Argumenta que este não seria um grande problema quando o número de passageiros a bordo de uma linha expressa ou de uma linha retida seja uma pequena porção do total de passageiros na linha. Além disto, as alterações provocadas pelo “holding” em uma estação de controle são, provavelmente, muito inferiores do que as mudanças de “headway” ao longo de toda a rota depois do ponto de controle. Essa diferença é ainda mais acentuada quando o número de postos de controle é pequeno. No entanto, pode haver situações em que a economia de tempo de percurso é significativa. Este problema pode ser investigado através de testes computacionais. De qualquer modo, a autora propôs-se a fazer esta verificação.

Em seguida, o trabalho aborda a forma de ordenar a implantação da estratégia de “holding”, afirmando que as decisões de controle podem ser feitas nas estações por inspetores de campo ou a partir do centro de controle, sendo as instruções transmitidas aos operadores dos veículos. 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 resposta específica mais precisamente o problema, considerando " $M$ " veículos operando na linha no período " $T$ ". Entre eles, " $m$ " têm previsão de chegada a várias estações nos próximos " $t$ " segundos. Supondo que a instrução de controle deva ser recebida por cada operador de " $m$ " veículos em um intervalo de tempo de  $(0-t)$  segundos antes de que cada um deles entre em sua próxima estação. O processamento da ordem necessita no máximo " $t$ " segundos para executá-la, portanto, pode-se começar a executar o procedimento em  $(t + t')$  segundos antes de que qualquer um dos " $m$ " veículos entre em uma estação. Em um processo de controle simultâneo, todos os " $M$ " veículos são considerados no processamento ao mesmo tempo, de modo que a interação entre o controle dos " $m$ " veículos é levada em consideração para que seja possível gerar a política de controle ideal para todos eles. Já num processo de controle sequencial, apenas um veículo é considerado por vez, por ordem de chegada, numa estação e, no caso de dois ou mais veículos entrando em diferentes estações ao mesmo tempo, em uma ordem FIFO de suas posições na rota. O impacto da decisão é então avaliado com base no estado dos outros veículos naquele momento.

A autora conclui 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. 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. Afirma que, teoricamente, qualquer veículo em qualquer estação no sistema de trânsito pode ser controlado. Enquanto a Meia-viagem (MV) pode começar a partir de dois terminais diferentes, a linha expressa ou com limitação de paradas pode começar a partir de qualquer

estação, e pode haver mais de um segmento expresso para um veículo. Além disso, qualquer veículo pode ser retido em qualquer estação. Na prática, no entanto, 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 citada a pesquisa de Abkowitz et al. (1986)<sup>26</sup> sobre “*holding*” que demonstrou existirem alguns pontos eficazes para o controle numa rede. As estratégias de linhas com paradas limitadas, por sua vez, são improváveis de serem usadas mais de uma vez por viagem de um veículo. É também 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”<sup>27</sup> 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 “conjunto impactado”, corresponde ao tamanho do horizonte de influência.. A política de controle ótimo resultante é então aplicada ao veículo considerado. O processo é rolado para frente e a otimização é repetida para cada viagem de veículo no sistema.

Em seguida, o documento aborda as informações que foram empregadas como entradas para o processamento das decisões de controle:

- (i). Horários de partida do veículo precedente em todas as estações
- (ii). Os horários de partida mais recentes dos veículos em consideração no terminal expedidor (ou na estação passada mais recentemente)
- (iii). Tempo médio de deslocamento entre estações consecutivas e tempo médio de desaceleração e aceleração ao aproximar-se e sair de uma estação
- (iv). Taxas esperadas de chegada de passageiros e do desembarque de passageiros em cada estação
- (v). Parâmetros da função do tempo de parada

---

<sup>26</sup> Abkowitz, M., A. Eiger, & I. Engelstein ( 1986), "Optimal Control of Headway Variation on Transit Routes". Journal of Advanced Transportation , Vol. 20: Issue 1, pp 73-88.

<sup>27</sup> 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”.

(vi). “*Headway*” programado, “*headway*” mínimo de segurança, limites superiores e inferiores do tempo de parada, hora de partida programada para cada veículo na(s) estação(ões).

Os dados de (i) e (ii) podem ser obtidos diretamente de qualquer sistema AVI / AVL. Os dados de (iii), (iv) e (v) podem ser estimados a partir de dados e pesquisas históricos, cuja precisão pode ser muito melhorada por sistemas APC em tempo real caso estejam disponíveis. O conjunto de dados (vi) é do Plano Operacional.

Ao tratar dos cuidados com a modelagem, o documento trata das variáveis que a envolvem. Os “*headways*”, os tempos de parada e os tempos de percurso entre as estações são variáveis randômicas, e esta aleatoriedade contribui para os percursos irregulares. As três variáveis interagem, mas são apontadas causas independentes da aleatoriedade em cada variável. O procedimento de despacho e o comportamento do operador (presença, desempenho, aderência à programação, etc), assim como as regras trabalhistas e operacionais (jornada, horários de entrada e saída, locais e duração dos períodos de refeição e descanso, etc) são as principais causas independentes para as irregularidades nos despachos. A demanda variável de passageiros é a principal causa independente de irregularidade no tempo de parada. As características do veículo, as condições da via e os hábitos de condução do operador podem ser as causas independentes primárias para a irregularidade do tempo de percurso entre estações.

Do ponto de vista da modelagem de estratégias de controle em tempo real, a autora considera que a aleatoriedade nos “*headways*” de despacho dos veículos (na ausência de controle) é a menor preocupação. Embora sejam importantes para os modelos de controle, eles podem ser tratados como determinísticos. Isso ocorre porque quando se considera um controle na estação de despacho, apenas a disponibilidade, e não os horários de partida reais, de um pequeno conjunto de veículos precisa ser conhecida ou prevista e essa informação é a mais fácil de obter. Além disso, uma vez que apenas o primeiro veículo do conjunto deve ser despachado, somente as informações para esse veículo devem ser precisas. Este não é um problema, porque a decisão de controle pode ser feita quando o veículo é conhecido por estar disponível.

O trabalho aponta que, mesmo que os problemas de controle em tempo real sejam de natureza estocástica, não é automática a conclusão de que um modelo estocástico forneça os melhores resultados. Este tipo de sistema é, em geral muito custoso em

termos de modelagem e de esforços no desenvolvimento de algoritmos; menos eficientes, especialmente quando se trabalha com muitos tipos de aleatoriedade envolvidos; e menos tratáveis. Por estas razões, é possível desenvolver modelos determinísticos que capturam a maioria dos elementos importantes do problema e requerem menos suposições simplificadoras irrealistas. Por isto é que o desempenho de um modelo estocástico pode não ser significativamente melhor do que o desempenho de um modelo determinístico.

Os modelos na dissertação foram desenvolvidos utilizando-se uma estrutura determinística, podendo-se pensar a estrutura determinística como o caso limitante de uma estrutura estocástica. Para que não sejam desprezados os aspectos estocásticos, a autora analisou os impactos destes aspectos por meio de testes de sensibilidade.

Problemas em tempo real são, em geral, complexos, envolvendo muitos fatores interdependentes. Ao mesmo tempo constituem-se em problemas teóricos que desafiam técnicas de Pesquisa Operacional, e são problemas práticos nos quais a realidade não deve ser sempre sacrificada por uma questão de tratabilidade. Isso torna o processo de modelagem e solução interessante, mas difícil. A autora defende um certo balanço entre simplificação pragmática e a fidelidade à realidade para não diminuir a utilidade dos modelos na solução dos problemas.

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.

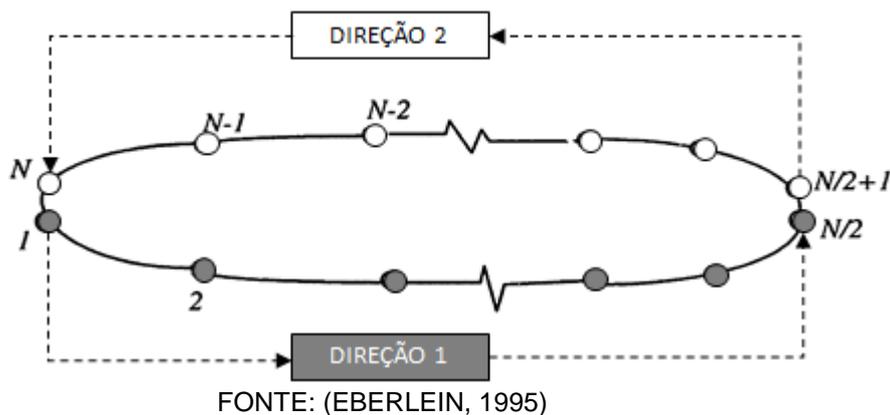
O sistema foi dividido em duas seções – Direções 1 e 2 – porque seu desenho circular, embora a linha seja unidirecional, permite entender os dois segmentos como ida e volta. Essa divisão envolveu o mesmo número de estações em cada Direção. A Direção 1 vai das estações 1 a 26, enquanto a Direção 2 compreende 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 6 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 6 - Eberlein, 1995**

## Rede de Transporte empregada na Dissertação – Representação esquemática



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:

- 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..
- 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”. Por outro lado, ambas podem ser representativas de sistemas reais. Ao estudar os sistemas na ordem acima, a dissertação parte do baixo nível de complexidade para num segundo momento, chegar ao alto nível.

Na dissertação o problema associado à retenção é decidir num momento determinado em uma estação de controle, que um determinado veículo deve ser mantido e por quanto tempo, de modo que o custo total do passageiro seja minimizado. Em contraste com a meia viagem e com a limitação de paradas, a retenção é usualmente aplicada quando o “*headway*” do veículo precedente é menor do que o “*headway*” seguinte. Em outras palavras, enquanto a meia viagem e a limitação de paradas reduzem o “*headway*” de um veículo precedente, a retenção o aumenta. A autora considera positivamente relevante que a estratégia de retenção não resulta em nenhuma estação sendo ignorada e, portanto, sendo provável que seja menos frustrante para os passageiros.

Outro problema levantado no estudo é que, ninguém incorporou explicitamente as restrições do terminal em termos de horários de partida e tempo de parada. Essas restrições são importantes caso um modelo de retenção vá ser empregado na prática. Além disso, a eficácia da exploração não foi avaliada sistematicamente ao longo de um período de tempo.

Ocorre também uma contradição. Uma vez que a estratégia de retenção, para regularizar os intervalos, atrasa alguns horários de partida do veículo, há a possibilidade de aumento do tempo de percurso dos passageiros embarcados. A autora avança a possibilidade de estabelecer uma função objetivo alternativa, como minimizar tanto o tempo de espera dos passageiros quanto o tempo de percurso. Na dissertação aqui tratada, entretanto, essa alternativa foi considerada como não necessária nem preferida.

Para a modelagem dos Sistemas “F” e “G” 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.

Segundo a autora, quando a última viagem na programação de um operador de ônibus está atrasada, ele pode ignorá-la, resultando em uma grande diferença entre duas viagens. Assim, a retenção é menos atrativa do que as estratégias de paradas limitadas, uma vez que estas não atrasam o veículo controlado. Por outro lado, dependendo de quanto a programação é comprimida, a restrição pode diminuir significativamente a eficácia da retenção, porque uma vez que um veículo está atrasado, veículos atrás dele também são mais propensos a se atrasarem.

Os resultados para os Sistemas “F” e “G” refletem essas diferenças. Inicialmente são apresentados os resultados para o Sistema “F” nas Tabelas 5 e 6, 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 5 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema “F”**

### Considerada a aplicação da Restrição de Programação

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
<b>MÉDIA</b>		<b>87.414,38</b>	<b>4.84</b>	<b>2,47</b>	<b>-6.256,27</b>		<b>1,45</b>	<b>1,96</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>346</b>	<b>437.071,90</b>			<b>-31.281,36</b>	<b>-7,16</b>	<b>184,4</b>		<b>127</b>

**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 6 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema "F"**  
**NÃO Considerada a aplicação da Restrição de Programação**

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
<b>MÉDIA</b>		<b>87.414,38</b>	<b>4.84</b>	<b>2,47</b>	<b>-15.062,40</b>		<b>2,20</b>	<b>0,83</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>346</b>	<b>437.071,90</b>			<b>-75.311,98</b>	<b>-17,23</b>	<b>571,03</b>		<b>260</b>

**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)

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 7 e 8 apresentam os resultados para o Sistema "G",

**Tabela 7 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema "G"**  
**Considerada a aplicação da Restrição de Programação**

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	-12.051,72	-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	-9.161,57	-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
<b>MÉDIA</b>		<b>98.948,78</b>	<b>3,60</b>	<b>-19.425,59</b>		<b>2,29</b>		<b>1,56</b>	
<b>TOTAL</b>	<b>346</b>	<b>494.743,91</b>		<b>-97.127,95</b>	<b>-19,63</b>		<b>-214,43</b>	<b>266,62</b>	<b>171</b>

**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 8 - Eberlein, 1995**  
**Resultados da simulação para o Sistema "G"**

## NÃO Considerada a aplicação da Restrição de Programação

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
<b>MÉDIA</b>		<b>98.948,78</b>	<b>3,60</b>	<b>-30.629,73</b>		<b>0,93</b>		<b>1,89</b>	
<b>TOTAL</b>		<b>494.743,91</b>		<b>-15.148,64</b>	<b>-30,96</b>		<b>-269,54</b>	<b>536,26</b>	<b>284</b>

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

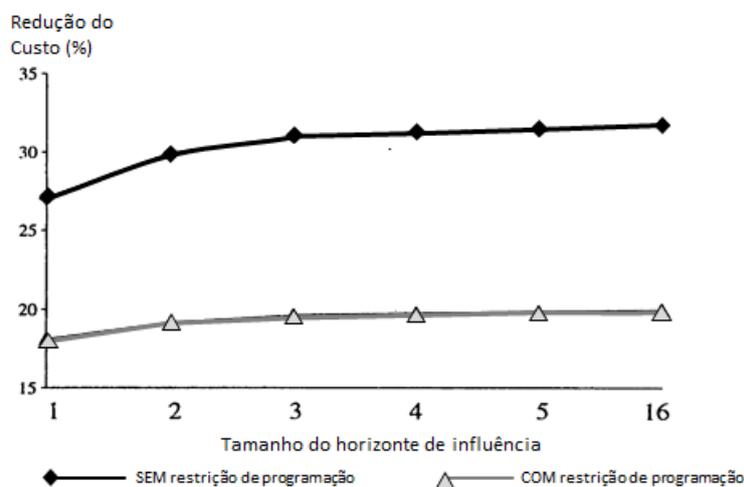
FONTE: (EBERLEIN, 1995)

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 3 onde se representa a redução de custo em relação ao tamanho do Horizonte de Influência para o Sistema "G", incluindo-se os resultados com e sem a consideração da Restrição de Programação.

**Gráfico 3 - Eberlein, 1995**  
**Relação entre a Redução de Custo e o Tamanho do Horizonte de Influência**

## Sistema “G” – resultados com e sem 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 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.

### 2.2. Jiamin Zhao, Satish Bukkapatnam, e Maged M. Dessouky - 2003

O artigo de (ZHAO; BUKKAPATNAM; DESSOUKY, 2003) descreve uma experiência de parada para regulação (“*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 difícil 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. Um Agente de Ônibus interage com um Agente de Estação quando ele se aproxima de uma Estação específica. Em cada estação, um Contador Automático de Passageiros (APC) é usado para contar os passageiros embarcando e desembarcando. É necessária uma Rede de Longa Distância – WAN (na sigla em inglês) para a comunicação entre estações sobre, por exemplo, a hora de partida do ônibus mais recente, o número de passageiros nas estações, etc. As informações destes dispositivos de ITS serão enviadas para computador embarcado, bem como para o computador da central de operações, a fim de conduzir a negociação via comunicação sem fio. Os autores indicam que seriam úteis dispositivos de Identificação Automática do Veículo – AVI e Sistema de Posicionamento Global – GPS embarcados. Esta última informação lança uma dúvida: num sistema com grau relativo de sofisticação, não seriam fundamentais as informações sobre a identificação do veículo e de sua posição? Se sim, tais equipamentos seriam, se não imprescindíveis, pelo menos altamente desejáveis.

Na prática, o que foi chamado de “negociação” é resultado de um algoritmo que trabalha com os dados do ônibus e da estação e, por meio de seu confronto e análise, procura encontrar as melhores soluções/decisões para a situação operacional naquele momento ou período.

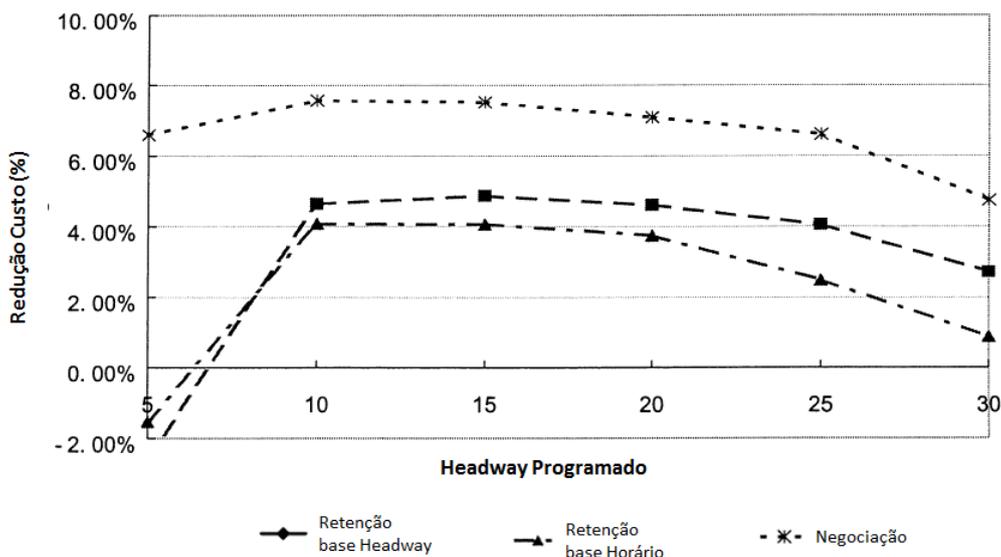
Embora o modelo execute a estratégia na estação terminal, foram comparadas quatro estratégias alternativas nas outras estações:

- Estratégia de não-retenção: os ônibus não são retidos nas estações e partem imediatamente após o desembarque e embarque dos passageiros.
- Estratégia baseada no “*headway*”: Um veículo é mantido em uma estação (depois do desembarque e embarque) para fazer com que o “*headway*” entre ele e o ônibus precedente seja igual ao “*headway*” entre o ele e o ônibus subsequente.

- Estratégia baseada na Programação Horária: Um ônibus é retido somente se chegar mais cedo do que o horário programado. Note-se que na maioria dos sistemas de ônibus, a hora de chegada programada é geralmente mais tarde do que a hora real, uma vez que geralmente há alguma folga na programação.
- Estratégia de negociação com custos marginais: Os ônibus são retidos após o desembarque e embarque dos passageiros 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.

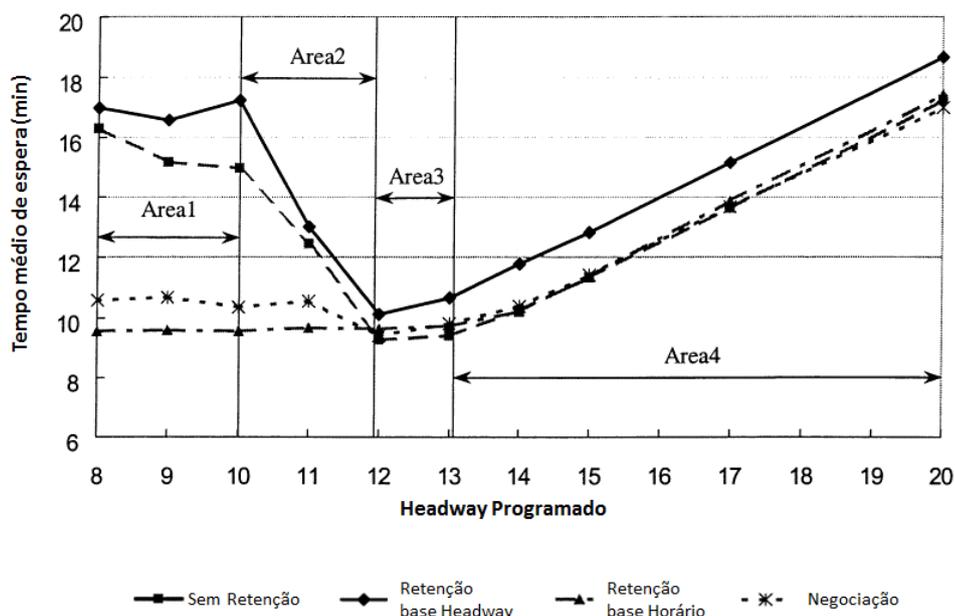
**Gráfico 4 - Zhao et al (2003)**  
**Reduções de Custo em função dos tempos de “headway”**  
**Diferenças das estratégias em relação à estratégia de “não retenção”**



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 5, onde foram determinadas “Áreas” pelo critério de comportamento dos tempos médios de espera.

**Gráfico 5 - Zhao et al (2003)**  
**Tempos Médios de Espera por Estratégia em relação à duração do “headway”**

### Delimitação de Áreas de Desempenho



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. Ou seja, sob estas estratégias, os tempos médios de espera atingem valores próximos do estado estacionário. Isso ocorre porque as estratégias de progresso e negociação são estratégias independentes da programação e possuem capacidade de auto-ajuste relativamente forte. 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.

### 2.3. Felipe Delgado, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesen e Aldo Cipriano -2009

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 outros três trabalhos que têm em comum com este o emprego de modelo de Controlador Híbrido Preditivo.

O trabalho inicial, embora publicado em periódico científico somente em 2012 (SÁEZ et al., 2012), já havia sido apresentado em 2007 em Simpósio na Tailândia <sup>28</sup>, comparando a aplicação do modelo nas estratégias de parada para regulação (“holding”) e de limitação de paradas. (CORTÉS et al., 2010) aprofundam o trabalho inicial, desenvolvendo um modelo para o trabalho com multiobjetivos, isto é, buscando analisar a contradição já citada anteriormente neste trabalho, entre o tempo de espera nos pontos, que é reduzido, e o tempo de percurso no ônibus, que é aumentado pela retenção nas paradas. (MUÑOZ et al., 2013), empregando o mesmo tipo de modelagem, estabelecem comparação entre os trabalhos de (SÁEZ et al., 2012) e de (DELGADO et al., 2009).

O estudo de (DELGADO et al., 2009) foi selecionado para uma descrição mais detalhada pelo ineditismo da intervenção proposta. O trabalho objetivou minimizar o tempo total de viagem dos passageiros (tanto o tempo de percurso no ônibus quanto os tempos de espera na estação) desde o momento em que chegam à estação até alcançarem sua estação de destino. Tratou de determinar a estratégia ótima de controle de veículos para as várias paradas ou estações em um sistema de transporte público, focalizando estratégias para a retenção de veículos que determinam quais ônibus devem ser retidos, onde e por quanto tempo, combinadas com estratégias de limitação de embarque, impedimento de embarque de quantidades de passageiros esperando na estação, 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.

Os autores procuram mostrar as principais diferenças de abordagem em relação a outros trabalhos pelas seguintes características:

---

<sup>28</sup> Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN) VI, Phuket, Tailândia, 2007

- as estratégias de retenção e a de impedimento de embarque nunca são tratadas simultaneamente;
- a restrição de capacidade do veículo é incorporada sem recorrer a variáveis binárias que complicariam o processo de solução;
- a função objetivo inclui (entre outros fatores) o tempo de espera extra imposto aos passageiros que devem aguardar mais de um ônibus por conta da restrição de capacidade.
- A duração de cada retenção pode ter um valor contínuo

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.

As premissas operacionais estabelecidas foram:

- Existe uma rede homogênea de ônibus.
- Os veículos servem todas as paradas e não é permitida a ultrapassagem.
- Taxas de chegada de passageiros para cada estação e tempos de viagem entre estações são determinísticos, conhecidos e fixados para o período de interesse.
- O tempo de embarque é maior que o tempo de desembarque na maioria das estações. Uma estimativa de tempo de embarque aplicado sobre a quantidade prevista de passageiros para esse embarque foi utilizado para a determinação do tempo de parada na estação. Em todos os pontos em que o tempo de desembarque é maior que o de embarque, o tempo de permanência será subestimado.
- Um ônibus simulado com capacidade ilimitada de passageiros segue o ônibus genérico “K” visitar cada estação em horários predefinidos. Após a passagem deste ônibus não chegam mais passageiros nas estações. Ele é necessário para a apuração dos tempos de espera à estação depois da passagem do ônibus “K”.

O modelo proposto é aplicado num corredor de transporte público imaginário com 24 paragens de ônibus 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 para um número de passageiros determinado, visando aumentar a velocidade de operação do veículo.

Os resultados obtidos para os componentes do tempo de viagem gerados pela função objetiva sob as três estratégias formuladas são apresentados na Tabela 9.

**Tabela 9 - Delgado et al (2009)**  
**Tempos de Viagem - Comparativo de Resultados por estratégia testada**

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%.

Os autores consideram este último resultado fundamental porque a estratégia de retenção pressupõe que os ônibus têm capacidade infinita o que, na prática, não ocorre. Na estratégia modelada, isto é, com controle, os limites de capacidade são ativados em muitas estações.

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 à parada cai 10,9%, uma cifra muito similar aos ganhos obtidos com apenas retenção. Além disso, a espera no veículo nessa estratégia é quase quatro vezes menor do que aquela observada em somente retenção. Isso ocorre porque a retenção exclusiva é

aplicada com mais frequência do que no Controle Proposto, decorrendo mais passageiros impedidos de embarque em virtude da ativação das restrições de capacidade. 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, como parte desse conjunto de iniciativas, em 2012 os contratos para a execução dos serviços foram dotados de cláusula de penalidade aplicada quando os ônibus das operadoras não observam o intervalo programado entre dois veículos subsequentes. Foram criados três pontos de controle para cada linha (na maioria dos casos no início, no meio e no final da linha) onde esses intervalos eram apurados. Caso os limites estabelecidos não sejam observados, as empresas operadoras sofrem multas.

Em outra frente, o sistema enfrentava, desde sua implantação, uma tendência de redução nas demandas por diversos fatores que incluíam altos índices de evasão de receita, transferência de passageiros para meios mais confiáveis como o Metrô, etc. Muitas empresas operadoras compreenderam que o incremento da regularidade e, por consequência, da confiabilidade era um método para a reversão daquela tendência perversa.

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)<sup>29</sup>.

---

<sup>29</sup> 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.

A estratégia de controle proposta é um modelo de programação matemática com base no Horizonte de Influência<sup>30</sup> que permite o controle dos veículos de modo a minimizar o tempo total de espera usando decisões variáveis em relação aos tempos de retenção dos ônibus nas estações. A função objetivo do modelo de otimização foi composta de quatro componentes: (i) tempo de espera dos usuários enquanto esperam o primeiro veículo a chegar; (ii) tempo de espera dos passageiros embarcados nos ônibus que estão sendo retidos; (iii) tempo extra de espera dos passageiros que não puderam embarcar no primeiro ônibus em função da restrição de capacidade; (iv) penalidade pelos passageiros não embarcados, embora a capacidade do veículo não estivesse esgotada. Embora esta última funcionalidade estivesse prevista no modelo, ela acabou não sendo considerada por razões práticas, visto que foi atribuída uma penalidade elevada.

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.

O sistema também trabalha com frotas heterogêneas de veículos, sem requerer variáveis binárias, tornando a solução compatível com as necessidades do tempo real. A principal variável empregada na solução da otimização é a retenção dos ônibus nas estações. Uma segunda variável pode ser adicionada e definida como a proporção em que um ônibus deve chegar antecipadamente ao previsto, levando em conta as restrições aos ajustes de velocidade.

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

---

<sup>30</sup> Ver conceito em (EBERLEIN, 1995) acima, neste mesmo item.

- 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.

A interação entre o modelo de otimização e as condições em tempo real do ônibus é a seguinte: em qualquer intervalo de tempo predefinido, 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.

Os dados de campo são transmitidos dos veículos para o servidor da empresa operadora que, por sua vez, os encaminha ao servidor da central de processamento. Esta processa a informação e alimenta o modelo de otimização. O tempo de processamento entre o recebimento das informações e a emissão das instruções para cada veículo leva de 15 a 20 segundos, embora este valor seja função do número de estações e do tamanho da frota operacional. A frequência de emissão de instruções depende da frequência de pulsos do GPS. Como, no caso de Santiago, a frequência de pulso dos GPS é da ordem de 30 segundos, as 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 elevada – 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. Nestes estudos piloto foi utilizada uma versão preliminar do software descrito na seção anterior.

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. Foi designado um profissional para cada estação de controle, sendo as instruções de retenção eram enviadas a cada profissional por meio de mensagens de texto. Em

seguida, eles comandavam a retenção do ônibus na parada de acordo com a instrução de retenção na mensagem de texto considerando um tempo de retenção máximo de um minuto.

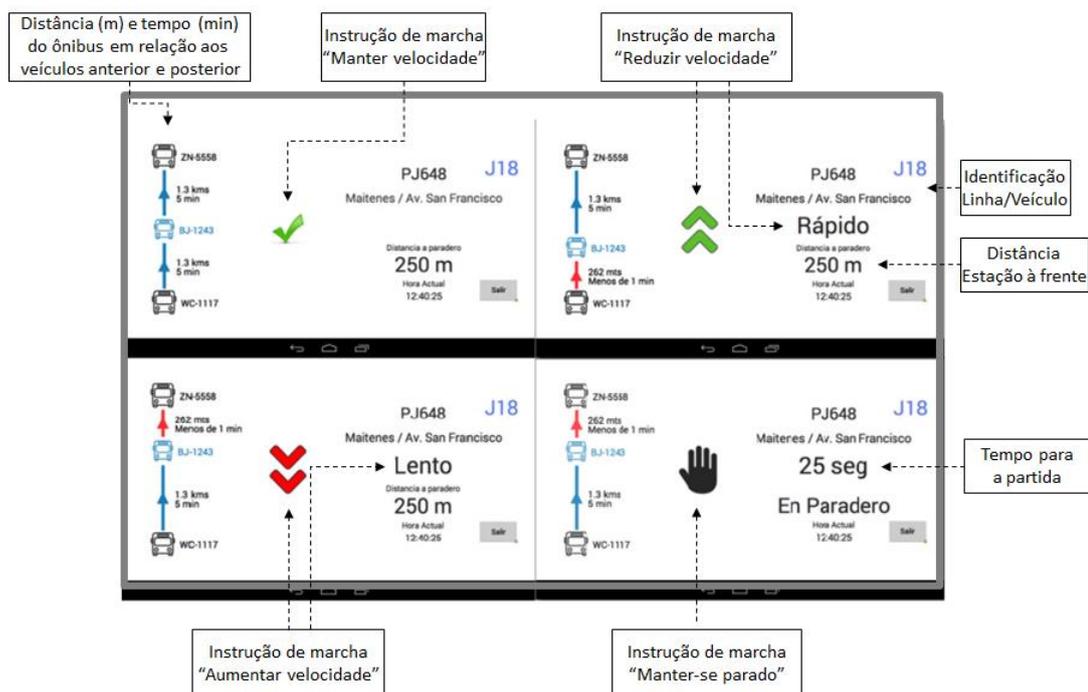
Os resultado nos dois pilotos foi a redução da quantidade de multas por falta de regularidade, que foram 50% a 60% menores que nos dias sem controle. Ocorreu também aumento de demanda da ordem de 20% o que, segundo os autores, deveu-se, provavelmente, à redução de evasão de tarifas: com a situação anterior caracterizada por ônibus lotados, muitos passageiros não embarcavam pela porta regulamentar, a da frente, mas, sim, entrando sem pagar pela porta traseira.

Outra empresa de ônibus (Buses Metropolitana S.A.) decidiu fazer alguns testes pilotos exploratórios em seu serviço J18, linha alimentadora que opera na região oeste da cidade. 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 controle em qualquer ponto de ônibus da linha também enquanto dirige. A Figura 7 mostra as 4 visualizações da aplicação Android, uma para cada situação do veículo: em marcha dentro do programado; em atraso, devendo aumentar velocidade; parado na estação, sendo informado o tempo restante para a partida; e em marcha adiantado, devendo reduzir a velocidade. Além disto, permanentemente é mostrada a posição em relação aos veículos anterior e posterior, indicando as distâncias e o tempo para cada um. As informações no lado esquerdo da aplicação mostram a distância (em minutos) e o andamento (em minutos) que o barramento atual tem com os ônibus direto e traseiro.

**Figura 7 - Lizana et al (2009)**  
**Aplicativo de Controle Operacional – Tela do “tablet” do motorista**

## Informações x Estágio da marcha



FONTE: (LIZANA et al., 2014) – Explicações acrescentadas pelo autor da Dissertação

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 esses, apontam como mais importante a mudança cultural no controle operacional do serviço. É sólida a noção de que programações horárias podem ser efetivas para controlar os ônibus e evitar sanfonamentos. No entanto, num sistema com altas demandas e frequências, essa ideia deve ser substituída pela ideia de que as paradas para regulação baseadas no "headway" são adequadas e prática para cenários desta ordem.

Apesar dos bons resultados apontados anteriormente, os autores apontam restrições com relação à operação da linha 210. Eles mostram que, em virtude dos perfis peculiares da demanda e das velocidades e também de problemas de despacho, o serviço apresenta uma tendência muito pronunciada para o "sanfonamento" 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. Para tanto defendem que sejam concedidos incentivos relacionados ao cumprimento das instruções de retenção. Como o sistema permite o rastreamento de quantas instruções foram executadas por cada motorista,

permite a avaliação personalizada de seu desempenho, possivelmente facilitem a formulação de incentivos. 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 artigo termina considerando a pesquisa como ponto de início para a discussão da criação de incentivos para os motoristas.

O trabalho é um dos mais interessantes entre tantos outros consultados, por ser o único a relatar uma experiência exercida na prática.

Também é notável o sistema de baixo custo e rápida implantação desenvolvido pela equipe para a Linha J18. Este é um campo, salvo engano, 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. O artigo apenas cita o emprego do modelo desenvolvido por Delgado et al (2012)<sup>31</sup>, sem esclarecer qual o tipo de modelo, suas funcionalidades e demais características suficientes para o conhecimento desse pano de fundo do trabalho.

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 detalhados.

---

<sup>31</sup> 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.

## APÊNDICE C – TRABALHOS RELATIVOS A LIMITAÇÃO DE PARADAS ÍNTEGRA DAS RESENHAS

### 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.

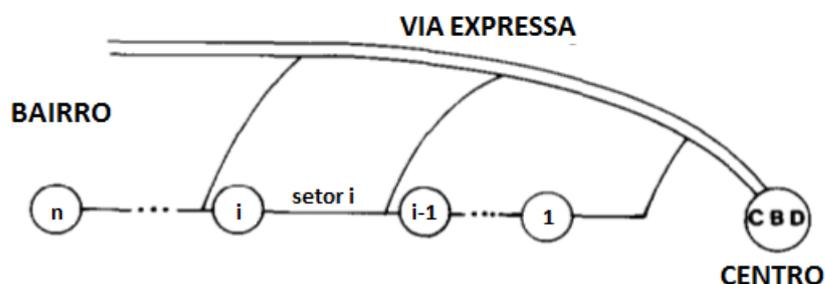
Sun e Hickman (2005) citam Vuchic (1973)<sup>32</sup> entre os primeiros que descreveram e avaliaram de forma abrangente o "*stop-skipping*" num contexto operacional. Aquele estudo concluiu que as principais diferenças operacionais dessa modalidade são: a velocidade programada é aumentada; o tempo de parada é reduzido; os intervalos nos pontos não servidos por todos os veículos são aumentados; não existe uma ligação direta entre pontos servidos por diferentes veículos; e, obviamente o serviço torna-se mais complicado.

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 8 mostrada a seguir.

---

<sup>32</sup> Vuchic, V. (1973). Skip-stop operation as a method for transit speed increase. Traffic Quarterly, Vol. 27, pp. 307–327.

**Figura 8 - 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 (cidade objeto de seu estudo), Los Angeles, Denver, San Francisco, Miami, Pittsburgh e Chicago. Ressalva, entretanto, ter sido na década de 1980 que esses serviços tornaram-se mais comuns.

O mesmo autor considera os serviços com paradas limitadas uma variante das Linhas Zonais, com a diferença de que aqueles têm paradas a distâncias regulares em toda a extensão das linhas, diferentemente das linhas zonais que exercem a função de linha local enquanto estão em sua zona de atendimento.

Distingue duas situações para as quais essas linhas são projetadas. Na primeira, a linha parte de um Terminal que executa a tarefa de reunir passageiros das linhas locais. Na segunda atende regiões com polos geradores de viagens significativos como hospitais, museus, universidades, etc. Em boa parte dos casos, esses serviços são implantados em paralelo com serviços locais, o que confirma sua função de linha expressa.

Por conta de suas características, são linhas mais longas que as locais e suas paradas são feitas a intervalos de 8 a 10 quadras (cerca de 800 m), apresentando quantidades elevadas de embarques e desembarques. Em contraste, o serviço de ônibus local faz paradas a cada duas a três quadras (cerca de 200m).

Silverman (1998) aponta, à época da publicação 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, em que uma parte de uma linha é programada para o serviço “parcial” durante períodos regulares como, por exemplo operação no período de pico da manhã todos os dias úteis. Tratam-se, portanto, de novas linhas ou sublinhas expressas e não uma simples modificação temporária de uma parte, não definida *a priori*, de uma linha. 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”.

Os estudos dedicados às limitações dinâmicas são menos numerosos e mais complexos do que os voltados às limitações programadas. Aqueles envolvem, além da atividade de programação do serviço, os métodos e processos de estabelecimento do segmento da linha a sofrer intervenção e os parâmetros a ela associados.

No entanto, os fundamentos e requisitos básicos considerados para a limitação programada, são também necessários para as limitações dinâmicas, embora, para estas, possam não ser suficientes.

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. Para que o método seja eficaz, os ganhos de tempo devem ser superiores às perdas dos passageiros que esperam nos pontos não atendidos.

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:

- Política 1 (básica) - O trecho de não atendimento é definido por um ponto de início e um ponto de término, e todas as pontos deste intervalo não serão atendidos pelo veículo de controle. Perdem com esta premissa alguns passageiros embarcados: aqueles destinados a pontos no intervalo sem atendimento terão que descer do veículo antes ou depois de chegar a seus destinos. Além disso, os passageiros nos pontos não atendidos terão de esperar por um veículo subsequente.
- Política 2(alternativa) – O trecho de não atendimento é definido conforme a Política 1. O veículo de controle pode desembarcar passageiros nos pontos sem atendimento. Quando isto ocorrer, são também permitidos os embarques de passageiros esperando no ponto.

O modelo desenvolvido por esses autores foi aplicado às duas políticas e os resultados serão relatados mais à frente neste documento.

## **2. Modelos com Limitação Programadas de Paradas**

### **2.1. Carola Leiva, Juan Carlos Muñoz, Ricardo Giesen, Homero Larrain - 2010**

Ceder (2003)<sup>33</sup>, Desaulniers e Hickman (2007)<sup>34</sup> e Guihaire and Hao (2008)<sup>35</sup> são citados por Leiva et al (2010) como trabalhos relativamente recentes sobre o tema,

---

<sup>33</sup> 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.

<sup>34</sup> 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).

<sup>35</sup> Guihaire, V., Hao, J.K., 2008. Transit network design and scheduling: a global review. *Transportation Research Part A* 42 (10), 1251–1273.

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 (2003<sup>36</sup>,2008<sup>37</sup>) 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 minimizar os custos sociais da limitação num corredor de vias segregadas, assumindo como conhecidas as demandas.

O modelo matemático determina o custo mínimo com base em quatro elementos: (i) a configuração dos pontos ao longo do corredor; (ii) as distâncias entre eles; (iii) matriz de demanda para as viagens entre os pontos; (iv) a configuração de itinerários que aparentam ser atrativos, cada um especificando a sequência de pontos em que podem haver embarque e desembarque. Para cada possível itinerário, o modelo prevê as dimensões dos veículos a serem empregados e as frequências de serviço.

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

---

<sup>36</sup> 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.

<sup>37</sup> 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.

com a modelagem fica expressa nas diversas considerações e sugestões indicadas nas conclusões.

## **2.2. 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.

Sua preocupação dirigia-se à contradição, já citada neste documento, da redução dos tempos de permanência no veículo para os passageiros na linha programada em contrapartida ao maior tempo de espera pelos passageiros das linhas locais. Um segundo foco de preocupação era o comportamento dos passageiros em relação ao serviço limitado, em particular aqueles que poderiam ser atendidos pelos dois serviços: alguns poderiam embarcar no primeiro ônibus a chegar, enquanto outros esperariam o serviço limitado. Essa escolha depende de como o usuário percebe a economia de tempo.

Para a construção do modelo foram estabelecidas as seguintes premissas:

- A demanda de origem-destino é dada e fixa, isto é os passageiros continuam a embarcar e desembarcar nos pontos de sua preferência, não caminhando até outros pontos servidos pelos dois serviços.
- A chegada dos passageiros nos pontos é randômica na origem e com taxa constante durante o período considerado.
- A alocação dos passageiros em cada serviço é feita de acordo com a alocação do sistema em lugar de empregar a alocação ótima dos passageiros.
- Não são aceitas transferências entre os serviços locais e o serviço com limitação.

Os autores tiveram acesso a dados reais de um operador de ônibus de uma grande cidade<sup>38</sup>. O conjunto compreendeu informações sobre os percursos das linhas e respectivas expectativas de demandas (Origem-Destino) de 178 linhas com altas

---

<sup>38</sup> O artigo não fornece dados tanto do operador quanto da cidade referidos.

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

**Gráfico 6 - Simulações Chiraphadhanakul and Barnhart (2013)  
Resultados – Comparação Linhas limitadas x Linhas locais**

**Passageiros embarcando/desembarcando e demandas Origem-Destino**



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

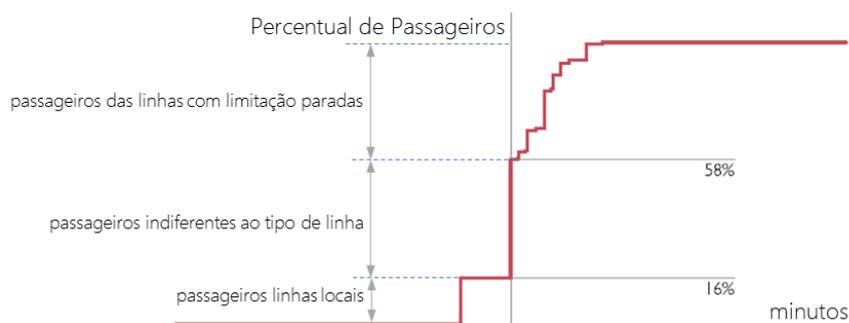
No gráfico está representada uma linha (A) representativa do conjunto. Na parte a) do gráfico está o número de embarques e desembarques em cada estação, enquanto na parte B estão representadas as curvas envoltórias de origem-destino dos passageiros, sendo que a espessura dos traços expressa o volume.

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 7 onde está traçada a curva de percentual acumulado de passageiros com ganhos ou perdas nos tempos totais de viagem (espera no ponto + tempo embarcado).

**Gráfico 7 - Simulações Chiraphadhanakul and Barnhart (2013)**

## Resultados – Ganhos e perdas nos tempos de viagem Percentual acumulado de passageiros



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

Os 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.

### 2.3. Homero Larrain, Ricardo Giesen, and Juan Carlos Muñoz - 2011

Este trabalho (LARRAIN; GIESEN; MUÑOZ, 2011) 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, quais sejam: (i) feito do carregamento; (ii) escala de demanda, (iii) desequilíbrio de demanda entre os sentidos de entrada e de saída; (iv) comprimento médio das viagens.

Foram individualmente especificados 81 cenários de demanda que representam os perfis de demanda definidos acima. Os padrões de linha avaliados para cada cenário foram obtidos como uma função da forma do perfil. O conjunto total de linhas foi fixado em 28, uma quantidade que permite uma grande variedade de padrões de serviço sem estender indevidamente o tempo de execução do algoritmo de solução.

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. Este indicador é calculado como a 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. No caso em que não existam corridas expressas, apenas um serviço local, este indicador assume o valor de 1.

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 10 a seguir.

**Tabela 10 - Simulações Larrain, Giesen e Muñoz (2010)**

## Resultados desagregados da modelagem por Cenário e por Indicador

	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
	(%)	(%)	(%)	(%)					(%)	(%)	(%)	(%)
<b>Escala de Demanda</b>												
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
<b>Desequilíbrio</b>												
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
<b>Compr. Médio Viagem</b>												
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

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.

Os autores chamam a atenção para o efeito do emprego de modelos de distribuição baseados na maximização da entropia, onde não há pares com um número desproporcional de viagens. Nos cenários gerados a partir desse modelo, os benefícios dos serviços expressos são menores do que os encontrados em simulações com matrizes demandas reais, onde uma porcentagem significativa de viagens é comumente concentrada em pares específicos, levando, assim, a benefícios mais expressivos. Citam os resultados do estudo de (LEIVA et al., 2010) que utilizou dados do corredor Pajaritos em Santiago e que reportou benefícios de até 13,9%.

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). Tais serviços constariam da prestação de serviços expressos ou com paradas limitadas no sentido de maior movimento com a implantação de serviços

locais quando operando no sentido de menor movimento, permitindo maior equilíbrio entre as demandas de ida e volta.

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.

#### **2.4. 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. No entanto, ao descrever os dados do sistema

empregados em seu estudo de caso, os autores refiram-se à avenida Tian-Um-Shan que classificam como um corredor de alta demanda na cidade de Hangzhou.

As premissas estabelecidas para o desenvolvimento do modelo foram:

- I. A demanda de viagens entre qualquer par de origem e de destino (matriz O-D) é fixa e permanece a mesma durante o período de análise. Adota-se que a demanda não é afetada pela introdução dos serviços com paradas limitadas.
- II. Existem apenas dois modos de transporte (ônibus e carros) que utilizam a rede.
- III. O tempo de parada dos veículos em cada ponto é determinado pelo número de passageiros que entram e saem do ônibus.
- IV. Os passageiros estão uniformemente distribuídos por toda a área.
- V. Os passageiros não deixam a plataforma e não esperarão mais de duas passagens dos veículos de suas linhas.
- VI. Foi simulado apenas o período de pico da manhã.

Os resultados do modelo são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Modelagem Feng, Wen-tao e Dian-hai (2010)  
Comparativo tempos – Serviço Local x Serviço Paradas Limitadas**

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

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

Nos resultados é notável a redução de tempo para os viajantes de automóveis ser maior que a redução para os viajantes de ônibus. A maior redução para os automóveis (-12,86%) pode ser atribuída ao aumento relativamente grande dos tempos de espera para os ônibus, reduzindo os ganhos com a limitação de linhas ou mesmo a alguma supervalorização da interferência dos ônibus no tráfego que, com o aumento de velocidade destes, melhora as condições do tráfego. Essa valorização pode estar relacionada ao cálculo da interferência que as manobras dos ônibus exercem na capacidade das vias, uma vez que os autores empregaram os métodos do Bureau of Public Roads – BPR para esse cálculo.

De qualquer modo, o fato de que os usuários de automóvel tenham tido ganhos totais maiores que os ganhos de usuários de ônibus, 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.

### **3. Modelos com Limitação Dinâmica de Paradas**

#### **3.1. Xu Jun Eberlein - 1995**

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. Eberlein (1995) diferencia as duas estratégias pelo fato de que, enquanto a MV percorre o trecho sem atendimento sem passageiros a bordo, na limitação de paradas, o trecho sem atendimento é percorrido com passageiros embarcados, ampliando, de alguma maneira, a oferta de lugares.

Outra diferença entre as duas estratégias que se reflete na formulação dos algoritmos é que na MV é aplicada restrição para que apenas o terminal final seja o início do segmento sem atendimento, enquanto na limitação de paradas essa restrição é eliminada – qualquer estação pode ser o ponto inicial da limitação.

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.

Em sua breve revisão bibliográfica para esta seção, a autora aponta os trabalhos de Macchi (1990)<sup>39</sup> e Soeldner (1992)<sup>40</sup> os dois primeiros estudos que ela tomou conhecimento nos Estados Unidos trabalhando com limitações de parada em tempo real.

A autora, no caso das limitações dinâmicas de paradas, trabalha nas simulações 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 12.

**Tabela 12 - Modelagem Eberlain (1095)  
Comparativo tempos – Serviço Local x Serviço Paradas Limitadas  
Sistema “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*) apresentados na Tabela 5 (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 Tabela13

<sup>39</sup> Macchi, R.A.; Expressing Vehicles on the MBTA Green Line.- Tese de Mestrado – Engenharia Civil, MIT – 1990.

<sup>40</sup> Soeldner, D. W.; A Comparison of Control Options on the MBTA Green Line. Tese de Mestrado – Engenharia Civil, MIT – 1993.

**Tabela13 - Modelagem Eberlain (1095)**  
**Comparativo tempos – Serviço Local x Serviço Paradas Limitadas**  
**Sistema “F”**

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 limitação. O resultado está na Tabela 14 que indica os melhores trechos nas diversas simulações e a incidência de viagens com limitação em cada trecho.

**Tabela 14 - Modelagem Eberlein (1095)**  
**Seleção de trechos com limitação e identificação dos inícios**  
**Sistema “G”**

ATRIBUTO	TRECHOS COM LIMITAÇÃO									Total
	1-3	1-4	1-5	1-7	2-4	6-8	13-18	15-18	16-18	
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%

FONTE: Adaptada de (EBERLEIN, 1995)

A autora chama a atenção para o fato de que os segmentos expressos ótimos estão bastante concentrados: na direção 1, 43% das viagens expressas começam na estação 1 e outros 51% ignoram a estação 17. Não é coincidência que estes dois segmentos tenham a menor demanda (desembarques + embarques) nessa direção. Na direção 2, a estação 28 concentra 87% dos inícios de segmentos expressos. As implicações empíricas desta são:

- (i). é provável que um segmento expresso ótimo comece o mais cedo possível ao longo da linha, desde que as estações de alta demanda não sejam ignoradas; isto significa que é provavelmente melhor começar um segmento expresso na primeira estação da direção estudada se as estações de alta demanda não estiverem no trecho inicial.
- (ii). Se iniciar um segmento expresso na primeira estação da direção resulta em ignorar uma estação de alta demanda, como no caso da direção 2 da linha estudada, onde a segunda estação (ou seja, 28) tem a maior demanda de passageiros; é provavelmente melhor iniciar o segmento expresso naquela estação de alta demanda. Aqui entendemos por "estação de alta demanda", que tem uma demanda significativamente maior do que a média.

Em seguida são mostrados os resultados para o sistema "G" sem, no entanto compará-los com a situação sem controle, ido diretamente para a comparação com a meia viagem. O produto dessa comparação encontra-se na Tabela 15.

**Tabela 15 - Modelagem Eberlein (1095)  
Seleção de trechos com limitação e identificação dos inícios  
Sistema "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	-11,36	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. O texto chama a atenção para o fato de que a escolha do segmento limitado ótimo depende da interação entre as condições de percurso do veículo e o padrão de demanda na direção trabalhada. Essa interação é bastante complicada e pode ser melhor tratada por computador. Contudo, 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.

Entre outras instruções, recomenda para a escolha da estação de início da limitação que, se o pico da demanda estiver no meio da linha ou além dele na direção da limitação, deve ser escolhida a primeira estação como a de início da limitação; se o pico de demanda estiver dentro do primeiro par de estações, escolher a estação 1 de demanda como a estação de início.

### **3.2. Liping Fu, Qing Liu, and Paul Calamai**

(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 variável Restrições

Cada rodada de simulação gera informações sobre quatro medidas de eficácia: (a) tempo de espera do passageiro; (b) tempo do passageiro dentro do veículo; (c) tempo de viagem do ônibus; e (d) custo ponderado total. Essas medidas de eficácia são utilizadas na análise de sensibilidade que, por sua vez, aborda três parâmetros do modelo: demanda de passageiros, percurso e tempo de viagem.

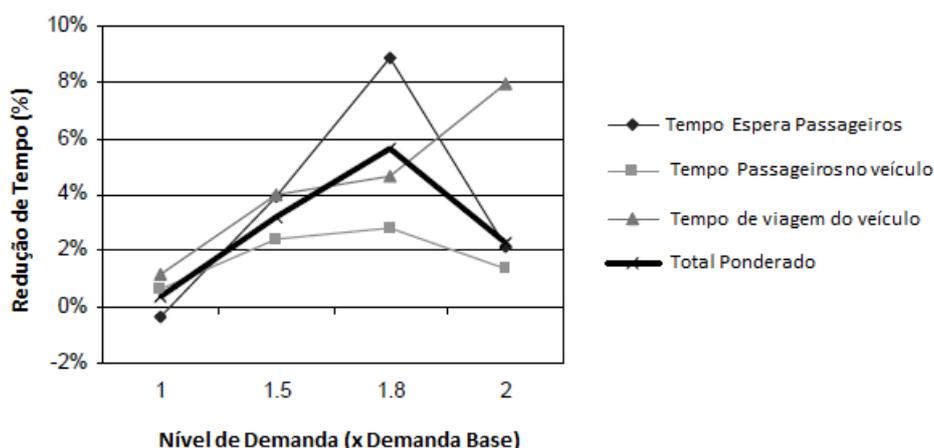
A análise de sensibilidade foi realizada com dados de uma linha de ônibus real (Linha 7D) operada pela Grand River Transit (GRT) no Município de Waterloo, Ontário, Canadá. A linha 7D atende as cidades gêmeas de Kitchener e de Waterloo, que têm uma população combinada de 293,800 habitantes conta com 28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

Foi introduzido um desvio uniforme de  $\pm 90$  segundos relativamente ao “*headway*” programado para modelar a variação inerente ao “*headway*” na partida. Para modelar a variação do tempo de deslocamento do ônibus, uma distribuição normal com um coeficiente de variação (COV) de 0,20 foi assumida para todos os links ao longo da rota. O COV (0,20) representa a variação típica do tempo de viagem observada no campo.

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. À medida que a demanda aumenta, sobem as reduções do tempo de espera dos passageiros, do tempo no veículo e do tempo de viagem em ônibus também aumenta. A tendência prossegue até a demanda chegar a um nível além do qual tanto o tempo de espera dos passageiros como o tempo no veículo começam a diminuir, em comparação com o tempo de viagem do ônibus. 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 8.

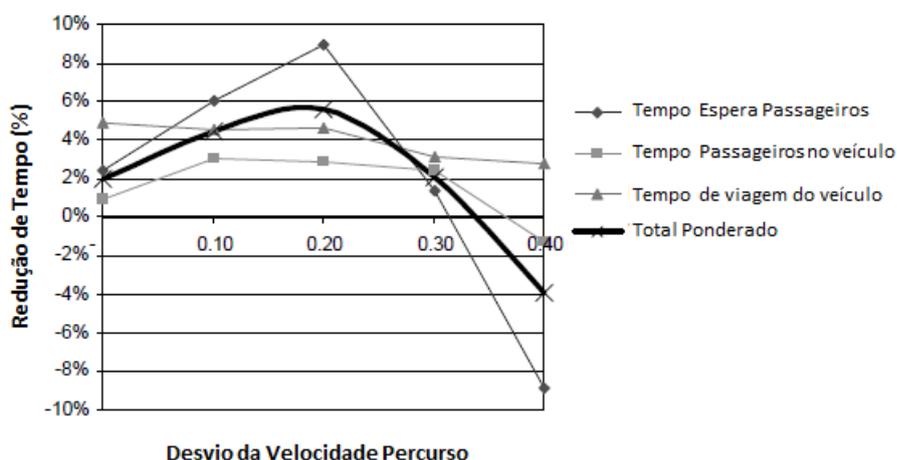
**Gráfico 8 - Modelagem Fu, Liu e Calamai (2003)**  
**Análise de Sensibilidade a Níveis de Demanda - Resultados**



FONTE: (FU; LIU; CALAMAI, 2003)

Uma variação no tempo de viagem maior significa erros maiores nos tempos de chegada estimados usados como entrada para o modelo de otimização o que pode levar a soluções de programação subótimas. Esta observação intuitiva é suportada pelos resultados da análise de sensibilidade apresentados no Gráfico 9, onde as curvas 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 9 - Modelagem Fu, Liu e Calamai (2003)**  
**Análise de Sensibilidade a Variação da Velocidade - Resultados**



FONTE: (FU; LIU; CALAMAI, 2003)

A estratégia de limitação de paradas mostra-se mais eficaz quando o coeficiente de variação do tempo de deslocação está próximo de um valor crítico de 0,20. Quando a variabilidade do tempo de viagem é menor do que o valor crítico, a estratégia de ainda é benéfica, porém em níveis menores. Os benefícios diminuem rapidamente quando a variabilidade ultrapassa o valor crítico, sugerindo que devam ser tomadas precauções quando se aplica a estratégia em condições de tráfego altamente variadas, uma vez que pode ter qualquer efeito ou, pior ainda, ser contraproducente. 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: O objetivo do “*holding*” é deliberadamente atrasar os ônibus que estão à frente da programação planejada ou muito próximos aos ônibus que os precedem. Em contrapartida, a limitação de paradas é empregada para acelerar os ônibus que estão atrasados ou muito longe dos ônibus precedentes. 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 14 apresenta este comparativo.

**Tabela 14 - Modelagem Fu, Liu e Calamai (2003)**  
**Aplicação Combinada de Limitação de Parada e “ *Holding* ”**  
**Resultados das Reduções de Tempos**

ESTRATÉGIA	REDUÇÃO DE TEMPOS MÉDIOS (%)			Redução no Total Ponderado (%)
	Nos Veículos	Espera	Viagem Veículo	
Limitação paradas	2.84%	8.91%	4.66%	5.62%
“ <i> Holding </i> ”	6.46%	30.72%	-0.67%	16.17%
Limitação paradas + “ <i> Holding </i> ”	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.

### **3.3. Aichong Sun e Mark Hickman - 2005**

(SUN; HICKMAN, 2005) elaboraram modelo com características peculiares. Além da limitação dinâmica de paradas que 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. Como já foi mostrado, no caso dos metrô, que dispõem de meios de comunicação por áudio e mesmo mensagens tanto nas estações quanto embarcados, o problema é menor, o que não ocorre em boa parte nos sistemas de ônibus.

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.

São várias as premissas assumidas para o desenvolvimento do modelo. A primeira delas determina que um veículo sofre uma interrupção de serviço por um dado período. O atraso devido à contingência é igual à duração da interrupção.

Em termos da funcionalidade da intervenção, foram estabelecidas as seguintes premissas: (i) ao determinar que um veículo execute a limitação, os veículos subsequentes não serão elegíveis para quaisquer ações de controle, dados os efeitos negativos do aumento da frustração dos passageiros não atendidos; além disto, os autores recomendam que a estratégia deva ser aplicada com pouca frequência; (ii) buscando a simplificação da modelagem, a capacidade do veículo não é explicitamente considerada. Com o objetivo de verificar este pressuposto, um conjunto adicional de cenários foi incluído na simulação para explorar os efeitos práticos de uma restrição de capacidade.

Para a estratégia básica, foi especificamente pressuposto: (iii) o veículo de controle recolherá todos os passageiros até a última estação antes do início do trecho de limitação, mesmo aqueles cujo destino está neste trecho; (iv) uma vez que o trecho de limitação foi decidido, o veículo de controle deixa sempre os passageiros destinados para paradas naquele trecho na última estação antes dele; neste sentido, o veículo de controle nunca pode ignorar a primeira estação após o trecho de limitação, uma vez que poderá ter que desembarcar alguns passageiros cujo destino estava no referido trecho.

Em termos de características de modelagem foram estabelecidas as seguintes premissas: (v) para os passageiros embarcados em cada estação, a parcela deles que desce em cada estação à frente pode ser obtida a partir de dados históricos e presume-se que é independente do número de passageiros que embarcam nesta estação; (vi) a taxa média de chegada de passageiros em cada é dada; (vii) o tempo médio de viagem do veículo entre estações é dado, sendo o mesmo para todos os veículos durante o período de análise; para todas as estações já servidas pelo veículo,

o número de passageiros embarcados e desembarcados é conhecido; usando esta informação, a distribuição de origem-destino de passageiros (O-D) é introduzida mais tarde na seção 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.

Interessante observar que os três cenários cobrem os padrões de demanda encontrados na prática: as linhas diametrais com perfis simétricos, as linhas radiais com pendularidade nos sentidos bairro-centro (pico da manhã) e centro-bairro (pico da tarde).

Outros parâmetros adotados nas simulações são mostrados na Tabela 15.

**Tabela 15 - Modelagem Sun e Hickman (2005)  
Parâmetros empregados na 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
$\alpha, \beta_1, \beta_2$ (seg) <sup>(1)</sup>	25, 3 e 1,5 respectivamente (3)
Número de veículos impactados	4, excluídos o veículo limite e o veículo de controle
$w_1, w_2, w_3$ <sup>(2)</sup>	1, 0,5 e 5 respectivamente

OBSERVAÇÕES:

(1) Símbolos representam os parâmetros ( $\alpha$ ) tempo médio de embarque de passageiros ( $\beta_1$ ) tempo médio de desembarque de passageiros ( $\beta_2$ ) 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 so autor da Dissertação

Observação: salvo engano, parece ter ocorrido uma troca na digitação dos valores de  $\alpha, \beta_1, \beta_2$ . Não parece razoável que todas as operações do veículo para a parada sejam executadas em 1,5 seg. Entende-se que a ordem mais provável dos valores seja 3, 1,5 e 25 segundos.

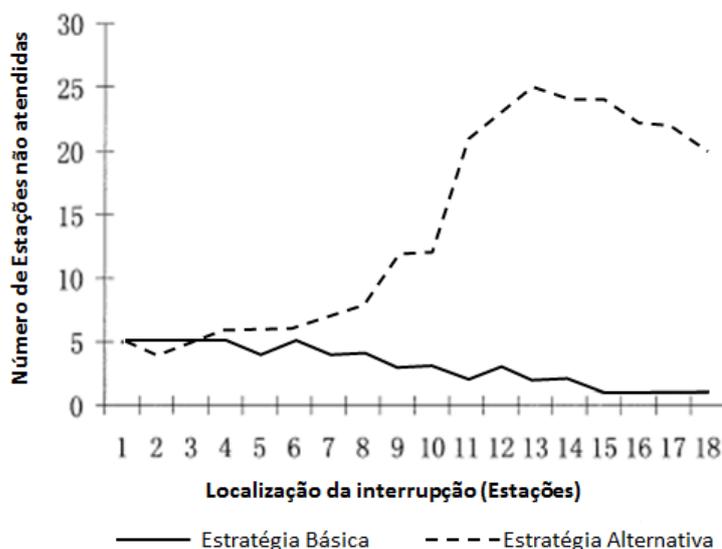
Essa observação parece reforçada quando os autores chamam a atenção que, na tabela, pode-se notar que “...o tempo perdido total quando um veículo faz uma parada é de pelo menos 25 segundos ( $\alpha=25$ ), dando um tempo mínimo de economia por parada quando uma estação é ignorada.”

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 10 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 interrupção se desloca para jusante.

**Gráfico 10 - Modelagem Sun e Hickman (2005)  
Resultados da simulação – Estações atendidas**

### Comparativo Estratégia Básica x Estratégia Alternativa



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. Assim, se observa que, à medida que o local de interrupção se move mais para jusante, para além da Estação 14, a compensação do custo e benefício do passageiro "força" o veículo de controle a ignorar menos Estações, visto que não há quantidade delas suficientes para ignorar e assim superar o custo incorrido pela limitação de paradas. Também faz sentido que o número necessário de paradas ignoradas da Estratégia Alternativa continue a diminuir, uma vez que o número de paradas a jusante que podem beneficiar-se do controle de limitação à medida que o local de interrupção se desloca para jusante.

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. No entanto, diferenças de desempenho considerável entre as políticas ainda podem ser vistas em uma porcentagem significativa de casos. Para o padrão normal de distribuição de passageiros, uma vez que a interrupção do veículo ocorre perto do início da rota e não dura muito tempo, a Estratégia Alternativa pode superar a Básica. Caso tais condições não ocorram, esta pode conseguir mais

redução do custo do passageiro do que a Alternativa. 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 em função 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 afeta mais ou menos profundamente os hábitos de viagem dos usuários.

### **3.4. Weihua Gu, Zahra Amini e Michael J. Cassidy**

Gu, Amini e 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)<sup>41</sup> and Daganzo (2010)<sup>42</sup>.

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. Os custos dos usuários compreendem: (i) o tempo de acesso à parada de origem mais próxima e sair no ponto de destino mais próximo; (ii) a espera de um veículo de transporte público no ponto de origem; (iii) a transferência entre veículos que servem linhas distintas; (iv) o tempo gasto viajando dentro do (s) veículo (s). Os custos operacionais incluem: (v) salários do pessoal; (vi) custos de combustível; (vii) custo de manutenção do veículo; (viii) custos de compra de veículos amortizados durante sua vida útil; (ix) custos de infraestrutura semelhantemente amortizados. 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 em sistemas idealizados assumindo que: (i) as linhas percorrem corredores bidirecionais de malha fechada; (ii) a demanda de viagens em cada direção é invariável no tempo e homogênea ao longo do corredor com densidade  $\lambda$  (passageiro / km / h; (iii) as extensões das viagens dos passageiros são uniformemente distribuídas; iv) os veículos permaneçam durante um tempo constante em cada estação,  $T$  (h), aí incluído o tempo dispendido para a desaceleração e aceleração do veículo quando ele chega e parte da estação; (v) os clientes chegam aleatoriamente a uma parada de origem independente do horário de serviço. Note-se que, como uma consequência de (ii), as paradas localizadas de forma ótima são uniformemente espaçadas.

---

<sup>41</sup> Freyss, M., Giesen, R., Muñoz, J.C.; Continuous approximation for skip-stop operation in rail transit. Transp. Res. Part C 36, 419–433 - 2013

<sup>42</sup> 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.

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. Esse aumento do tempo de espera é adicionado ao tempo de espera inicial. Como as transferências podem motivar uma caminhada adicional do usuário entre o local de embarque de uma linha e de outra, este custo é contabilizado por meio de uma penalidade de tempo especificada. Se as duas linhas compartilham a mesma plataforma, a penalidade de transferência é notada  $Ct$ . Se, em vez disso, usam plataformas diferentes (o que ocorre em um sistema de trilhos de via dupla quando um cliente precisa transferir para um trem viajando na direção oposta), a penalidade é assumida como  $2Ct$ .

Nos apêndices do trabalho são descritas em detalhes soluções encontradas para diversos problemas. O Apêndice B apresenta os cálculos desenvolvidos para contabilizar custos adicionais arcados pelos usuários durante as Paradas Limitadas em comparação com o serviço normal (todas as paradas). São eles:

- espera por serviço descoordenado;
- espera em serviço ferroviário coordenado (via dupla);
- espera em serviços coordenados de ônibus e BRT;
- penalidades de transferência;
- tempo da viagem parcial de retorno (viagem “negativa” para chegar ao ponto de destino);
- máximo carregamento de passageiros a bordo por veículo.

O Apêndice C mostra as soluções para contabilizar os custos dos usuários de três tipos específicos de viagens sob serviço expresso e local, e os fluxos de passageiros nas linhas expressas e locais, a saber:

- custo para viagens entre duas estações expressas;
- custo para viagens entre um expresso e um local;
- custo para viagens entre duas estações locais;
- fluxos máximos de usuários para as linhas expressas e locais.

Por último, 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.

## APÊNDICE D – TRABALHOS RELATIVOS A MEIAS-VIAGENS – MV (“*deadheading*”)

### ÍNTEGRA DAS RESENHAS

#### 1. CONCEITOS E ORIGENS

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. ESTUDOS SELECIONADOS

##### 2.1. 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. No campo geral da programação de veículos, cita que DANTZIG E FULKERSON (1954)<sup>43</sup> demonstraram que encontrar o número mínimo de veículos para cumprir uma determinada programação é um problema de otimização linear. Eles originalmente sugeriram resolvê-lo pelo método simplex.

Mais tarde, usando o teorema de decomposição da cadeia de Dilworth, FORD E FULKERSON<sup>44</sup> mostraram que ele poderia ser resolvido de forma mais eficiente com um algoritmo de fluxo máximo. Abordagens clássicas como essa requerem uma busca iterativa. Cita, em seguida que CEDER E STERN<sup>45</sup> utilizaram a função de déficit para computar o tamanho da frota necessário para um determinado cronograma. Esta abordagem requer apenas um cálculo das partidas e chegadas cumulativas ao longo do tempo em cada terminal no sistema. Com base nessa abordagem, eles desenvolveram heurísticas iterativas para inserir Meias Viagens em uma determinada programação no intuito de minimizar o tamanho da frota requerido.

O autor enfatiza que tal abordagem aplica-se para uma programação geral, compreendendo muitos terminais e viagens arbitrariamente programadas. Defende sua abordagem com o argumento de que se refere a uma situação mais limitada,

---

<sup>43</sup> G. B. DANTZIG e D. R. FULKERSON, "Minimizing the Number of Tankers to Meet a Fixed Schedule" - Nav. Res. Log. Quart. 1, pp. 217-222 - 1954.

<sup>44</sup> L. R. FORD e D. R. FULKERSON, Flows in Networks, Princeton University Press, Princeton, N.J. - 1962.

<sup>45</sup> A. CEDER e H. STERN, "Deficit Function Bus Scheduling, with Deadheading Trip Insertions for Fleet Size Reduction," Trans. Sci. 15, 338-363 - 1981

envolvendo apenas dois terminais, entre os quais circulam ônibus em viagens com intervalos regulares nos dois sentidos.

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:

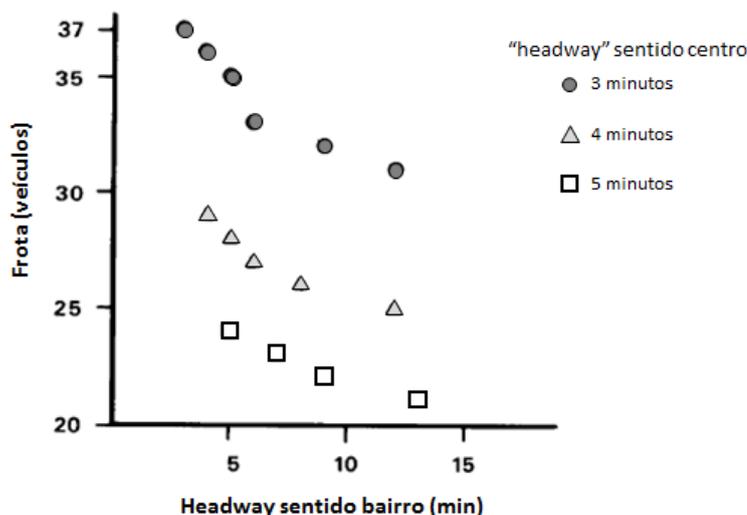
- determinação da frota mínima para atender a uma dada programação de Meias Viagens Alternativas;
- determinação da frota mínima sob restrições máximas de “*headway*”;
- solução exata para minimização do tempo de espera para um tamanho fixo de frota.

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. A linha é paralela à autoestrada 1-280, que poderia ser uma boa opção para a Meia Viagem de retorno se na linha fossem utilizados ônibus diesel. Os dados foram um tanto simplificados. Durante o pico da manhã, a linha opera com “*headway*” de 4 minutos nas duas direções, com tempos percurso (incluindo as paradas) de 56 min no sentido bairro-centro e de 58 min no sentido oposto. Assumiu-se que o aumento do tempo de percurso resultante de um aumento de 1 minuto no “*headway*” foi de 1 minuto no sentido bairro e 2 min no sentido centro. A estimativa do tempo de percurso da Meia Viagem de retorno foi de 30 min caso fosse empregada a autoestrada 1-280.

O Gráfico 11 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” e  $h_A$ .

**Gráfico 11 - Modelagem Furth (1985)**

## Meias-viagens - Tamanho de Frotas segundo os “headways”



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%.

O autor acrescenta que a alternância de *deadheading* também foi incorporada em um estudo de projeto de uma linha de corredor que considerou o desenho complementar de linhas de ônibus locais e expressas<sup>46</sup>. Supunha-se que as rotas expressas ficariam totalmente desalinhas, ao passo que as rotas locais podiam usar uma programação de “*deadheading*” alternativo. Algoritmos para projeto com essa estratégia foram incorporados em procedimentos em um projeto de maior porte que escolheu segmentos de mercado para cada tipo de serviço e zonas de serviço para cada linha local e expressa, assim como seus “*headways*”.

## 2.2. Xu Jun Eberlein - 1995

<sup>46</sup> O autor cita P. G. FURTH, P. G.; Designing Bus Routes in Urban Corridors, não publicado; Tese de Doutorado, M.I.T. Department of Civil Engineering, 1981

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. Além disso, pode ser menos frustrante já que nenhum passageiro é forçado a desembarcar. O benefício do “*deadheading*” é que o tempo de espera dos passageiros em pontos além do trecho sem serviço pode ser reduzido. O aspecto negativo é a espera adicional dos passageiros nas estações sem serviço. Outro potencial negativo é a perda de capacidade nesse trecho, fazendo, em princípio, aumentar a probabilidade de que os veículos sem serviço atinjam sua ocupação máxima.

A função objetivo procura captar os impactos em dois grupos de passageiros: aqueles nas estações além do trecho sem serviço e aqueles nas estações ignoradas. O primeiro termo captura o tempo de espera de passageiros chegando aleatoriamente nas estações. O segundo termo capta o tempo de espera dos passageiros que estavam esperando para o veículo “*i*” na estação “*k*”, mas não puderam embarcar, porque não houve atendimento, tendo que esperar o próximo veículo “*i + 1*”.

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. Embora esta seja uma maneira eficiente de usar veículos do ponto de vista do operador, não

é desejável para os passageiros que esperam em tais estações. Uma vez que o “*headway*” programado é o mesmo em todas as estações, os passageiros certamente sentirão o inconveniente se os intervalos reais sejam consistentemente maiores. Um modo de evitar tal conflito é redesenhar a programação (off-line). Por exemplo, programar o “*deadheading*” alternado, prover veículos locais atendendo em algumas estações e publicar a programação com antecedência.

Entre as condições estabelecidas no trabalho, está a que estabelece que “um veículo “*i*” é passível de fazer uma MV (“*deadheadable*”) se e somente se existe um segmento cujas condições são detalhadas, chegando à condição de que um veículo “*i*” “*deadheadable*” não deve ser bloqueado pelo veículo que o precede em qualquer lugar durante o percurso de seu segmento.

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 por dois veículos adjacentes (sucessivos). Considera essa restrição razoável quando ambos os veículos apresentam “*headways*” longos, admitindo que poderia ser estudada uma outra regra que permitisse a viagem quando um veículo com “*headway*” longo é sucedido por dois ou mais ônibus com intervalos curtos. Por outro lado, quando o “*deadheading*” adjacente é permitido, o problema não facilmente tratado, visto que a estratégia para um veículo depende do controle dos veículos que lhe são adjacentes. Neste caso, a estratégia ótima de controle dependerá do tamanho do Horizonte de Influência, definido anteriormente no item 2.2.1.2. deste documento.

**Tabela 16 - Modelagem Eberlein (1995)  
Meias-viagens de veículos adjacentes  
Tamanho de Frotas segundo os Horizontes de Influência**

VEÍCULOS “ <i>i</i> ”	2	3	6	7	9	10	12	Total de Benefícios	Redução de Custos (%)	Tempo Processam. (s)
<b>MEIA-VIAGEM - VEÍCULOS NÃO ADJACENTES</b>										
n*	7	0	4	0	6	0	1	2.891,50r	9.96%	2
<b>MEIA-VIAGEM - VEÍCULOS ADJACENTES</b>										
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
<b>OBSERVAÇÕES</b>										
n* = número ótimo de estações não atendidas										
m = Horizonte de Influência										

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

A Tabela 16 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. Neste exemplo, a solução ótima para diferentes tamanhos de Horizonte de Influência não muda entre  $m=2$  e  $m=3$ . Comparado com os resultados quando a restrição está aplicada, vemos que os benefícios totais são aumentados, permitindo Meias-viagens adjacentes.

Quando  $m = 1$ , o impacto sobre o custo total é de cerca de 2% e para  $m > 1$  é de cerca de 3%. Embora a complexidade e a carga computacional do problema aumentem rapidamente à medida que  $m$  aumenta, os benefícios marginais são bastante pequenos. Em todos os pares consecutivos, o primeiro veículo salta mais estações quando  $m > 1$  do que quando:  $m = 1$ . Isso mostra o impacto do segundo veículo sobre a MV do primeiro.

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.

Os principais objetivos destes testes são: (i) investigar a eficácia e as características das estratégias de MV em geral; (ii) prosseguir a investigação dos efeitos de Meias-viagens adjacentes; (iii) investigar os efeitos do Horizonte de Influência “ $m$ ” quando MV adjacente não estiver restrita.

Os resultados desses testes estão listados nas Tabelas 17 e 18.

**Tabela 17 - Modelagem Eberlein (1995)**  
**Aplicação Green Line - Meias-viagens – Sistema “F” – Teste 1**  
**Comparativo Meias-viagens não adjacentes com Viagens Sem Controle**

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

FONTE: (EBERLEIN, 1995)

**Tabela 18 - Modelagem Eberlein (1995)**  
**Aplicação Green Line - Meias-viagens – Sistema “F” – Teste 2**  
**Meias-viagens adjacentes segundo os Horizontes de Influência**

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)

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.. As diferenças na redução de custos entre

$m=1$  e  $m>1$  são insignificantes mesmo que 35 ou mais ( $> 10\%$ ) estações adicionais sejam ignoradas quando  $m>1$ . Isso indica que a solução de subproblemas com  $m> 1$  provavelmente não vale o esforço. No Teste 1 observam-se apenas 4 casos em que dois veículos adjacentes têm, cada um, custo benéfico e os que têm benefícios mais baixos não fizeram MV. Por outro lado, no Teste 2, existem 15 casos de “*deadheading*” adjacentes quando  $m=1$  e 20 quando  $m>1$ . Embora o número de casos de *deadheading* adjacentes tenha aumentado quando  $m> 1$ , com  $m = 1$  ou  $m> 1$ , o estudo informa ter havido apenas 2 casos em que 3 veículos consecutivos fizeram MV (conjunto de dados “m2”, veículos 15, 16, 17 e “w2”, 4,5,6). Todos os outros casos de “*deadheading*” adjacentes envolvem apenas 2 veículos. Conclui, inicialmente, ser razoável não assumir não mais que 2 veículos em consecutivos.

A conclusão é alargada ao verificar que, uma vez que a eficácia do controle com e sem adjacência é muito semelhante, qualquer um dos dois algoritmos pode ser usado dependendo de que seja aceitável a MV adjacente.

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”, mostra que objetiva saber se a função objetivo anteriormente formulada ainda atende às necessidade, quais são os impactos do tempo de percurso variável, da demanda variável, da MV adjacente e da interposição forçada de paradas em estações e o quão efetiva é a estratégia neste tipo de sistema. Neste, não há restrição a “*deadheadings*” adjacentes. Neste problema mais geral, interessa saber se a função objetivo ainda tem o comportamento esperado, quais são os impactos do tempo de permanência variável, da demanda variável, do *deadheading* adjacente e da interposição forçada das soluções e como Políticas eficazes de *deadheading* estão neste tipo de sistema.

Mais à frente, Eberlein (1995), tendo em vista a complexidade e a alta carga computacional para processar soluções exatas quando  $m> 3$ , considerou um método alternativo conhecido como “*controle-o-primeiro*”, no qual é controlado apenas o primeiro veículo em cada grupo, no lugar de avaliar o impacto na estratégia de controle de cada veículo, avalia-se o impacto dos  $m-1$  veículos com base em suas trajetórias sem controle. Devido à não divisibilidade do Sistema G, mesmo com apenas um veículo sendo controlado, a estratégia ótima pode ser diferente quando diferentes números de veículos adjacentes são considerados na avaliação de custos. Esta é uma grande diferença entre os sistemas G e F.

A autora alega que a principal vantagem deste método é a sua simplicidade e viabilidade para a implementação em tempo real. O tempo de computação aumenta apenas linearmente em vez de exponencialmente à medida que  $m$  aumenta. O método não impede o controle adjacente, devido ao Horizonte de Influência. Demonstra, entretanto, preocupação de que as estratégias resultantes sejam significativamente menos eficazes do que as obtidas pela solução exata de cada problema.

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 19.

**Tabela 19 - Modelagem Eberlein (1995)  
Meias-viagens – Sistema “G”  
Meias-viagens adjacentes segundo os Horizontes de Influência**

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	-11,36	-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	-11,32	-11,32	-11,48
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. Esses dois biases levam a uma melhora sistemática ("*over-deadhead1ng*") quando  $m=2$ , causando "*headways*" maiores para os veículos seguintes, enquanto, quando  $m=1$  serão provocados "*under-*

*deadheading*" e menores "*headways*", o que pode não ser totalmente eficaz. Tais vieses são amplamente eliminados quando  $m=3$  é escolhido.

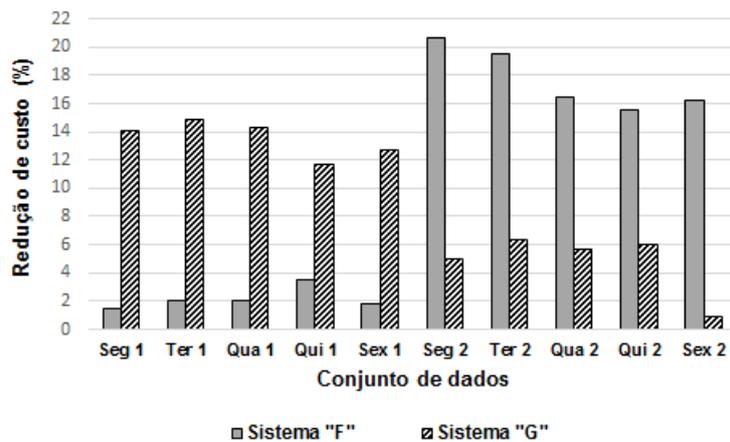
Pode-se observar também que há alguns casos em que o custo total pode aumentar ligeiramente à medida que  $m$  aumenta. Por exemplo, quando  $m=16$  a redução de custo total é ligeiramente menor do que quando  $m=5$ . Esse fenômeno se deve ao fato de que uma otimização com um base no Horizonte de Influência é diferente da otimização estática durante todo o período.

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.

Acrescenta ainda que a discussão acima é mais aplicável quando estratégias de limitação de paradas são usadas sozinhas. Quando as estratégias de limitação são usadas com a retenção, as curvas de custo adjacentes e as curvas de custo não quasiconvexas são muito menos prováveis de ocorrer. Neste caso  $m=3$  tem claras vantagens sobre  $m=1$ . Novamente, neste caso, um sistema de controle manual não funcionará bem e um sistema de controle computadorizado torna-se necessário.

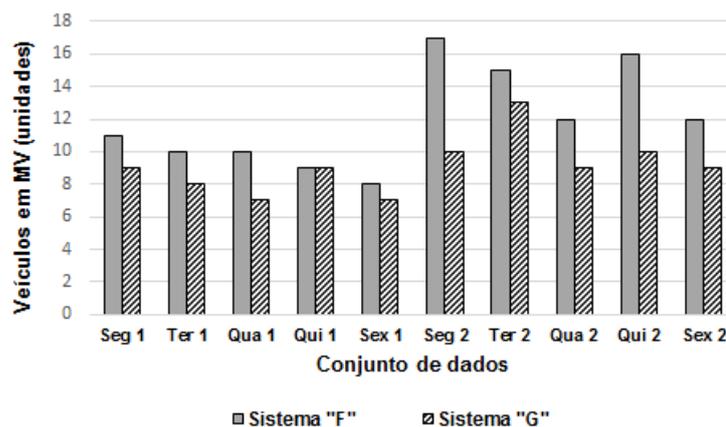
As Tabelas 20 e 21 apresentam comparativo de resultados entre o Sistema "F" e o Sistema "G". A comparação foi feita com base nos algoritmos que permitem as MV adjacentes. As duas tabelas empregaram a mesma base de dados, contendo nas abcissas os conjuntos de dados referidos aos dias da semanas e pareados por sentido (1 ou 2). A Tabela 20 tem como ordenadas os dados das mudanças no Custo Total, enquanto a Tabela 21 tem como coordenadas as quantidades de veículos com MV no dia.

**Tabela 20 - Modelagem Eberlein (1995)  
Meias-viagens – Comparativo Sistema "F" com Sistema "G"  
Mudanças de Custo em relação aos conjuntos de dados**



FONTE: (EBERLEIN, 1995)

**Tabela 21 - Modelagem Eberlein (1995)  
Meias-viagens – Comparativo Sistema “F” com Sistema “G”  
Veículos em MV em relação aos conjuntos de dados**



FONTE: (EBERLEIN, 1995)

A Tabela 20 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 na Tabela 21 o número de veículos em MV no sistema F é maior em todos os conjuntos de dados. A autora lança a pergunta: uma vez que ambos os sistemas usaram exatamente os mesmos conjuntos de dados de entrada que contêm dados de “*headway*” idênticos para a mesma direção no mesmo pico de manhã, o mesmo Horizonte de Influência ( $m=1$ ) e ambos permitindo MV adjacente, por que esses resultados são tão diferentes? A própria autora responde que é porque há uma série de fatores importantes que afetam o Sistema G, mas não o Sistema F: os efeitos dos tempos de parada nas estações, os efeitos dos “*headway*” de despacho e os efeitos da demanda. Sucederem-se explicações mais detalhadas que, entende-se, sejam supérfluas para os objetivos

da presente dissertação, uma vez que dizem respeito a diferenças nas modelagens entre os sistemas.

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.

### **2.3. 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) elabora um modelo para a solução do problema da programação da MV que objetiva, segundo os autores, preencher três lacunas encontradas nos trabalhos anteriores.

A primeira lacuna apontada, parte do argumento de que a maioria dos modelos de otimização de Limitação de Paradas e MV na revisão bibliográfica assumiu um tempo de viagem determinista e um “*headway*” constante. No entanto, estas premissas são, em certa medida, irrealistas porque o tempo de viagem do ônibus é, em grande parte, influenciado pelas condições de trânsito encontradas. Para refletir a variabilidade dessas condições, é racional supor que o tempo de viagem entre dois pontos de ônibus consecutivos de uma rota de ônibus é uma variável aleatória contínua.

A segunda lacuna indicada argumenta que 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.

A terceira lacuna é apontada com base em que 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, que, segundo os autores, são levados em consideração no artigo.

(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. Um plano ótimo aquelas estratégias têm como objetivo beneficiar tanto os passageiros quanto a empresa operadora. Assim, propõe-se um modelo de otimização para o problema abordado, com o objetivo de minimizar a soma ponderada desses três índices.

Algumas premissas são assumidas ao longo do trabalho:

- A estratégia é trabalhada apenas no âmbito da programação, não sendo considerada em tempo real, ou seja, assim que o veículo é despachado do terminal, as paradas prescritas não podem ser alteradas.
- Caso o veículo “i” seja programado a ignorar saltar uma ou mais estações, então o próximo veículo “i+1” deve servir todas as estações. Esta premissa assegura que a passagem de ônibus alterada em cada estação devida à MV não excederia duas vezes o “headway” programado, para evitar um grande tempo de espera para os passageiros.
- O tempo de viagem de cada ônibus pode sofrer influência diversos fatores externos, como o clima, semáforos e condições de trânsito. Assim, o tempo de viagem entre duas estações varia entre veículos diferentes em dias diferentes. Para cobrir esta variação, assume-se que o tempo de deslocamento entre as estações é uma variável aleatória com média constante “ $r_j$ ” e variância “ $r^2$ ”, cujos valores podem ser facilmente calibrados a partir dos dados de levantamento real obtidos a partir dos AVL.
- A taxa de chegada de passageiros em cada estação “j” que se dirige a qualquer outra estação “k” (“k>j”) é predeterminada com base em dados históricos e constante. A suspensão da parada do veículo “i” não afeta as operações do veículo “i-1” e o tempo de espera dos passageiros por este veículo. Somente são contabilizados os tempos de espera dos passageiros que tomam os veículos “i” e “i+1”.
- Não foi considerada no artigo restrição relativa à capacidade dos ônibus.
- Todos os passageiros em cada estação podem embarcar com êxito no primeiro ônibus disponível.

Os autores tecem críticas a estudos anteriores que efetuam simplificações para tornar o modelo trabalhável. No entanto, eles também, como mostra a lista acima, fazem numerosas simplificações.

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:

- resultado ótimo para MV do veículo 1;
- programação com tempo de viagem do ônibus constante;
- considerando circunstâncias práticas: veículo 1 não pode deixar de atender duas estações consecutivas visando evitar desbalanceamento dos “headways”;
- solução do problema da MV.

Os resultados destas simulações são mostrados na Tabela 22

**Tabela 22 - Modelagem Liu et al (2013)  
Meias-viagens – Resultados das simulações  
Estação atendidas para cada padrão simulado**

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
“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)

Em suas conclusões, os autores comentam os principais resultados. Inicialmente, consideram positivo o emprego de um Algoritmo Genético (AG) incorporando, em seguida uma Simulação Monte Carlo para resolver o modelo de otimização. Consideram que, validado pelo exemplo numérico, o AG pode obter, de forma eficiente, um resultado satisfatório. Comentam, a seguir, o teste em paralelo empregando o tempo de viagem dentro do veículo constante, cujos resultados diferentes daqueles que empregaram tempos aleatórios, mostram que a aleatoriedade dos tempos de viagem dentro do veículo não deve ser ignorada.

Por último, 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.