

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Brenda Medeiros Pereira**

**Avaliação do desempenho de configurações físicas e operacionais  
de sistemas BRT**

Porto Alegre  
março de 2011

**Brenda Medeiros Pereira**

**Avaliação do desempenho de configurações físicas e operacionais  
de sistemas BRT**

Dissertação de Mestrado submetida ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Produção da Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul como requisito parcial à  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
de Produção, na área de concentração de  
Sistemas de Transportes.

Orientador: Luis Antonio Lindau

Porto Alegre  
março de 2011

**Brenda Medeiros Pereira**

**Avaliação do desempenho de configurações físicas e operacionais  
de sistemas BRT**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, março de 2011.

---

**Prof. Luis Antonio Lindau, PhD.**

Orientador PPGEP/UFRGS

---

**Profa. Carla Schwengber ten Caten**

Coordenador PPGEP/UFRGS

**BANCA EXAMINADORA**

Profa. Christine Tessele Nodari, Dr. (PPGEP/UFRGS)

Profa. Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D (PPGEP/UFRGS)

Bernardo Castilho, PhD (Liftech Sistemas)

Ao meu amor e à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao professor Lindau, ao Rodrigo e à Mara pelas conversas e discussões que levaram à construção deste trabalho.

Agradeço-os, principalmente, por compartilhar comigo a experiência adquirida ao longo de sua prática profissional. Infelizmente isto não pode ser citado nas referências deste trabalho.

*"Everything should be made as simple as possible, but not simpler."*

Albert Einstein

## RESUMO

**PEREIRA, B. M. Avaliação do desempenho de configurações físicas e operacionais de sistemas BRT.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Na última década, o Bus Rapid Transit (BRT) consolidou-se como uma alternativa para qualificar o transporte urbano sobre pneus. Porém, como os elementos de projeto propiciam muita flexibilidade no conceito BRT é necessário que os projetistas tenham pleno entendimento deste sistema tão complexo. Sistemas prioritários para ônibus tipo BRT são ainda projetados com base em técnicas de tentativa e erro e em experiências bem sucedidas. A literatura especializada relata os efeitos de diversos elementos físico e operacionais no desempenho de sistemas ônibus, mas, geral, estes são representados de forma isolada. Pouco se sabe sobre o efeito da combinação dos elementos no desempenho de um sistema BRT. Modelos computacionais permitem que os elementos que compõem as diferentes configurações dos sistemas BRT sejam testados de forma combinada e melhorias sejam sugeridas ainda em fase de planejamento. Esta dissertação contempla aplicações do software EMBARQ BRT Simulator em duas dimensões. A primeira demonstra o potencial de utilização da ferramenta de simulação através de dois estudos de caso onde foi testado o desempenho de corredores BRT em fase de projeto no Rio de Janeiro e Arequipa, Peru. Na segunda aplicação, 324 cenários estruturados através de um projeto de experimentos a partir de 6 diferentes elementos de projeto, foram simulados. Os resultados propiciaram o desenvolvimento de análises quantitativas e qualitativas. Através da análise qualitativa buscou-se um melhor entendimento da interação dos elementos de projeto. A análise quantitativa passou pela formulação de dois modelos de regressão que tem como variável de resposta a velocidade operacional do BRT. A pesquisa propiciou um melhor entendimento do impacto da combinação de elementos de projeto. Espera-se que os resultados contribuam para reduzir o empirismo na formulação de novos projetos de BRT.

Palavras-chave: Bus Rapid Transit, desempenho, elementos, simulação.

## ABSTRACT

**PEREIRA, B. M. Avaliação do desempenho de configurações físicas e operacionais de sistemas BRT.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

### **Assessment of BRT systems performance regarding physical and operational design**

In the last decade, the Bus Rapid Transit (BRT) has established itself as an alternative to qualifying urban transit. However, as design elements provide much flexibility in the BRT concept, designers need to have full understanding of this so complex system. Bus priority systems for BRT are still being designed based on techniques of trial and error and successful experiences. The literature reports the effects of various physical and operational elements of bus systems that impact its performance, but in general these are represented isolated. Little is known about the effect of the combination of these elements in the performance of a BRT system. Computational models allow the assessment of the different configurations of BRT systems elements being tested in combination and suggest improvements at the planning stages. This study includes the application of the software EMBARQ BRT Simulator in two applications. The first demonstrates the potential of using simulation tools through two case studies where it was tested the performance of BRT corridors in the design phase in Rio de Janeiro and Arequipa, Peru. In the second application, 324 scenarios were simulated; they were created as a combination from six different design elements. The results led to the development of quantitative and qualitative analysis. Through qualitative analysis it was possible a better understanding of the interaction of design elements. Quantitative analysis began by formulating two regression models whose dependent variable was the operating speed of BRT. The research provided a better understanding of the impact of the combination of design elements. It is hoped that the results contribute to reduce the empiricism in the formulation of new BRT projects.

Key words: Bus Rapid Transit, performance, elements, simulation.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	10
1.1 TEMA .....	10
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
1.3 OBJETIVOS.....	13
1.3.1 Objetivos Gerais .....	13
1.3.2 Objetivos Específicos.....	13
1.4 MÉTODO.....	13
1.5 DELIMITAÇÃO.....	14
1.6 DELINEAMENTO.....	15
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO.....	15
<b>2 ARTIGO 1: A IMPORTÂNCIA DE SIMULAR SISTEMAS BUS RAPID TRANSIT.....</b>	17
3 ARTIGO 2: IMPACTO DE ELEMENTOS DE PROJETO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS BRT.....	29
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	55
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	57

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 TEMA

Nos últimos anos cresce o questionamento e o debate em torno do transporte coletivo quanto à qualidade do serviço ofertado e a sua potencialidade para solucionar ou, ao menos, reduzir os congestionamentos nas grandes cidades. Este trabalho trata unicamente do sistema ônibus, que, no Brasil, responde por 88% das viagens de transporte coletivo realizadas por ano (Associação Nacional de Transportes Públicos, 2010). Com a facilidade de crédito para aquisição de automóveis particulares e motocicletas, o transporte coletivo necessita rever conceitos para aumentar a sua atratividade para usuários, que poderiam ser chamados de clientes.

Muito tem se falado dos sistemas *Bus Rapid Transit* (BRT) como uma alternativa para qualificar o transporte por ônibus. Tanto nos países em desenvolvimento como em cidades de países com economias avançadas, mais de 70 cidades já tem sistemas BRT implantados e dezenas de sistemas estão em construção ou planejamento (Hidalgo e Carrigan, 2010). No Brasil, 9 das 12 cidades-sede da Copa do Mundo de Futebol de 2014 estão planejando a implantação de sistemas BRT para a melhoria da mobilidade urbana (Brasil, 2011). A indústria provedora de ônibus está trabalhando de forma proativa em oferecer às cidades novas opções de veículos sobre pneus com layout diferenciado e visual externo que se aproximam daqueles ofertados por sistemas sobre trilhos. Apesar de todo esse avanço no estado-da-prática de sistemas BRT, ainda é perceptível a falta de um consenso quanto ao conceito do BRT, e o entendimento sobre o efeito dos elementos de projeto e suas interações sobre o desempenho deste novo sistema.

Os sistemas BRT são projetados quase que de forma artesanal, pois cada cidade apresenta distintos condicionantes em termos de demandas e restrições físicas, entre outros. Porém, para que uma implantação seja realmente exitosa é preciso projetar sistemas BRT que atendam confortavelmente altas demandas de passageiros de forma rápida (Wright e Hook, 2007). A frase anterior remete a uma necessidade de avaliação

de desempenho voltada para a capacidade de atendimento do sistema, a velocidade da viagem e a satisfação do usuário em utilizar o BRT como meio de transporte. A literatura técnica aborda o impacto de vários elementos isolados de projeto no desempenho de sistemas ônibus, porém pouco existe sobre os efeitos da interação destes elementos.

Para aumentar a sua competitividade com outros modais, tanto privados quanto públicos (caso dos sistemas sobre trilhos) os sistemas de transporte coletivo por ônibus necessitam evoluir. Parte desta evolução passa por aproveitar os avanços tecnológicos e operacionais para aprimorar a oferta deste serviço. Os avanços computacionais atingidos nos últimos anos permitem a recriação do mundo real em ambiente virtual de forma bastante verossímil. Entre as vantagens de utilizar simulações computacionais para representar sistemas de transporte consta a facilidade de estudar diferentes configurações sem incorrer em gastos e transtornos de uma implantação real. O uso de simuladores para prever o desempenho de um BRT mostra-se uma prática recomendável, pois auxilia na compreensão do sistema e permite, a um baixo custo, predizer problemas de operação. Resultados obtidos no ambiente virtual potencializam a chance de sucesso de uma implantação real.

Considerando que os simuladores microscópicos disponíveis no mercado tendem a apresentar os ônibus como mais um dos veículos operando na circulação urbana sem possibilitar o detalhamento necessário para replicar a operação destes sistemas, foi desenvolvido o EMBARQ BRT Simulator. Este software foi desenvolvido para permitir a representação detalhada da operação de sistemas BRT. Com auxílio de projetista de renome mundial e suporte da rede EMBARQ (o Centro de Transporte Sustentável do World Resources Institute), a ferramenta incorpora os principais elementos de projeto dos sistemas BRT.

Esta dissertação contempla aplicações do software em duas dimensões. A primeira reporta simulações executadas para testar o desempenho de corredores BRT propostos para o Rio de Janeiro e Arequipa, Peru. A modelagem propiciou a identificação de gargalos operacionais e a proposição de soluções que resultaram eficientes na solução de tais problemas.

Na segunda aplicação, o EMBARQ BRT Simulator foi utilizado para testar 324 cenários elaborados através de um projeto de experimentos que envolve 6 diferentes elementos de projeto. O objetivo deste experimento é avaliar o efeito dos elementos e da interação entre eles no desempenho de um sistema BRT hipotético. Como resultado do trabalho, espera-se contribuir para a melhor compreensão do desempenho dos sistemas BRT. Através de análises qualitativas são observados os efeitos dos diferentes elementos no desempenho do BRT. Os resultados da simulação propiciaram a formulação de dois modelos de regressão: um que descreve o desempenho do sistema através de elementos isolados de projeto, e outro que leva em conta a interação desses elementos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Sistemas BRT despontam como uma das principais opções para qualificar o transporte coletivo urbano e metropolitano. Esta qualificação resulta da adoção de configurações físicas e operacionais que melhoraram o desempenho de sistemas tradicionais de superfície baseados em ônibus, tornando o modal sobre pneus mais competitivo. A revisão da literatura sobre a implantação e operação de sistemas BRT remete às carências e oportunidades de estudo. Apesar do crescimento acelerado no número e extensão de corredores BRT, o impacto dos elementos de projeto no desempenho do BRT ainda não é perfeitamente compreendido. Também revela que esses elementos tendem a ser avaliados de forma um tanto isolada e que, portanto, o desempenho resultante de combinações dos elementos de projeto não foi ainda suficientemente explorado.

A experiência com sistemas de ônibus de alta capacidade resulta de um processo de tentativa e erro combinado com doses de pragmatismo e empirismo (Lindau e Willumsen, 1990). Tipicamente os projetistas tendem a tomar suas decisões com base no desempenho observado em outros sistemas já implantados que apresentam um padrão similar de configurações físicas e operacionais ao proposto. Até pouco tempo, havia a falta de instrumentos para o estudo da complexidade das interações dos elementos. Atualmente, os avanços computacionais permitem estudos mais complexos. A simulação da realidade realizada através de softwares específicos permite testar configurações já tradicionais e também novas idéias. Além disso, testar cenários em um

ambiente computacional reduz a possibilidade de falhas na implantação, que prejudicam a imagem do BRT e a qualidade do serviço prestado à população. Os resultados da pesquisa fornecem informações úteis para projetistas de sistema BRT melhor adequarem seus projetos às necessidades locais.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da interação entre elementos de projeto de sistemas BRT no seu desempenho.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Do objetivo geral foram desdobrados alguns objetivos específicos:

- a) apresentar o potencial de utilização do software EMBARQ BRT Simulator;
- b) identificar as principais medidas de desempenho do BRT;
- c) identificar elementos de projeto e a influência dos mesmos no desempenho do BRT;
- d) desenvolver modelos de regressão que auxiliem a estimar o desempenho do sistema BRT a partir de elementos de projeto;

## 1.4 MÉTODO

O método de trabalho pode ser caracterizado quanto à natureza, à abordagem, o objetivo e ao procedimento. A pesquisa desenvolvida neste estudo tem característica de natureza básica, pois não tem aplicação imediata. Quanto à abordagem, esta pesquisa pode ser considerada mista, pois realiza avaliações quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos. Em relação ao objetivo, a pesquisa possui caráter explicativo, pois busca, através de uma análise da interação de elementos, explicar o desempenho dos sistemas BRT.

A pesquisa desenvolvida é apresentada em dois artigos. O primeiro artigo descreve a ferramenta de simulação utilizada e os benefícios de sua aplicação através de estudos de caso. Após a demonstração do potencial de utilização da ferramenta de simulação, desenvolveu-se a segunda parte do estudo, que deu origem ao segundo artigo. Este trata de um projeto experimental que avalia os efeitos de elementos de projeto no desempenho de sistemas BRT. Seis dos principais elementos de projetos são combinados, originando 324 cenários. O segundo artigo apresenta uma abordagem mista, pois realiza avaliações quantitativas e qualitativas dos resultados obtidos.

## 1.5 DELIMITAÇÃO

Este trabalho aborda apenas sistemas BRT. Existem diversos elementos que influem no desempenho de um sistema de transporte coletivo sobre pneus. A própria definição de desempenho pode gerar dúvidas. Neste trabalho o desempenho está focado na velocidade operacional de um sistema BRT embora considerações sejam tecidas também sobre a capacidade do sistema. A análise de desempenho, conduzida através de um projeto de experimentos, esteve limitada à avaliação do impacto de seis elementos de projeto.

O trabalho limita-se a avaliar o desempenho dos sistemas BRT através de uma única ferramenta, o EMBARQ BRT Simulator, pois este se mostrou adequado às avaliações pretendidas. Quando da execução das simulações microscópicas, foram utilizados valores constantes para os níveis dos elementos avaliados. A introdução de variabilidade nos valores dos níveis requisitaria uma calibração muito extensa, que possivelmente impossibilitaria a realização da pesquisa no tempo disponível.

Os níveis adotados no projeto de experimento estão embasados nos adotados em projetos de sistemas BRT e naqueles reportados pela literatura técnica. Com isso, os resultados da pesquisa são relevantes para a maioria dos sistemas BRT de alto desempenho implantados no mundo. No entanto, é importante observar que os resultados encontrados podem não ser aplicáveis a configurações fora da amplitude dos níveis adotados.

## 1.6 DELINEAMENTO

Esta pesquisa foi realizada em 8 etapas. Na primeira delas, foi definido o escopo da pesquisa e as diretrizes para a pesquisa bibliográfica. A segunda etapa compreendeu uma revisão bibliográfica sobre o que caracteriza o desempenho de sistemas de ônibus e os elementos que o influenciam.

A terceira etapa constou da familiarização na utilização do EMBARQ BRT Simulator através de sua aplicação a projetos propostos em duas cidades. A quarta etapa da pesquisa compreendeu a definição dos elementos de projeto a serem estudados mais profundamente. Como pressuposto para essa escolha levou-se em conta: (i) a experiência adquirida nas simulações de corredores; (ii) relatos constantes da literatura técnica sobre a importância dos elementos no desempenho de sistemas BRT; (iii) a possibilidade de avaliar o elemento no simulador escolhido.

Na quinta etapa foi elaborado um projeto de experimentos para avaliar o efeito simples da interação de seis elementos no desempenho de um corredor hipotético de BRT. Ainda nesta etapa, com base nos valores apontados na literatura, foram definidos os níveis de cada elemento.

Na etapa de número seis foram executadas as simulações dos cenários confeccionados. A sétima etapa compreende análises qualitativas e quantitativas dos resultados obtidos; nesta etapa buscou-se também entender os efeitos da interação dos elementos no desempenho dos sistemas BRT.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa dissertação está divida em quatro capítulos. No primeiro é feita uma introdução ao tema abordado, sendo expressos: os objetivos do estudo, a justificativa, o método e as etapas da pesquisa, a delimitação do estudo e as etapas do trabalho. O segundo capítulo apresenta o primeiro artigo. Este artigo apresenta o EMBARQ BRT Simulator, descreve suas habilidades, o processo de calibração e apresenta dois casos onde a ferramenta foi aplicada: Rio de Janeiro e Arequipa, Peru.

O terceiro capítulo apresenta o segundo artigo desenvolvido. Este artigo apresenta o estudo dos efeitos de elementos de projeto no desempenho de sistemas BRT. Com base em alguns dos principais elementos de projeto e da variação de seus níveis foram configurados cenários representando a combinação de elementos. A partir dos resultados são estimados modelos e desenvolvidas análises de sensibilidade.

Por fim, o quarto capítulo apresenta as considerações finais do estudo e os novos estudos que podem ser desenvolvidos a partir deste.

## A IMPORTÂNCIA DE SIMULAR SISTEMAS BUS RAPID TRANSIT

**Brenda Medeiros Pereira, Eng. (<sup>1,2</sup>)**  
[bmedeiros@ctsbrasil.org](mailto:bmedeiros@ctsbrasil.org)

**Luis Antonio Lindau, PhD. (<sup>1,2</sup>)**  
[lindau@producao.ufrgs.br](mailto:lindau@producao.ufrgs.br)

**Rodrigo Alberto de Castilho, MSc. (<sup>2</sup>)**  
[rcastilho@ctsbrasil.org](mailto:rcastilho@ctsbrasil.org)

(<sup>1</sup>)Laboratório de Sistemas de Transporte, LASTRAN  
 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS,  
 Porto Alegre, Brasil

(<sup>2</sup>)Centro de Transporte Sustentável do Brasil, CTS-Brasil  
 Porto Alegre, Brasil

### RESUMO

Cresce o interesse por sistemas BRT tanto nas cidades dos países em desenvolvimento como nas nações desenvolvidas. Mais de 70 sistemas já foram implantados no mundo e o Brasil pretende inaugurar 500 km para a Copa do Mundo de 2014 e Jogos Olímpicos de 2016. O desempenho desses sistemas varia muito em função da configuração de projeto, podendo transportar até 45.000 passageiros/h/sentido. As estações e as interseções são os principais gargalos a limitar o desempenho de um BRT e, nem todos os corredores de BRT implantados no mundo foram projetados de forma a propiciar o seu melhor rendimento, havendo sempre margem para introduzir melhorias. Logo, é importante dispor de ferramental que propicie antecipar os problemas gerados por uma determinada configuração de projeto. Esse artigo apresenta o EMBARQ BRT Simulator, um modelo microscópico de simulação especialmente desenvolvido para representar o desempenho de sistemas de BRT sob uma variedade de configurações físicas e operacionais. O simulador foi calibrado com dados de Curitiba e Porto Alegre e foi empregado para testar e aprimorar os projetos dos corredores TransCarioca, no Rio de Janeiro e de Arequipa, no Peru. No caso do TransCarioca, o estudo demonstrou que, com pequenos ajustes no projeto, é possível aumentar a capacidade de 20 para 30 mil passageiros/h/sentido atendendo assim a demanda prevista para os Jogos Olímpicos de 2016. Em Arequipa, a simulação revelou a necessidade de antecipar a introdução de uma linha adicional de forma a aliviar a saturação no centro histórico da cidade que é patrimônio da humanidade.

## 1 INTRODUÇÃO

Sistemas Bus Rapid Transit, BRT originalmente concebidos em Curitiba (Lindau et al, 2010) e aprimorados em Bogotá, já foram implantados em mais de 70 cidades dos cinco continentes (Wright e Hook, 2007; Kittelson & Associates, 2007; NTU, 2010). BRT respondem por uma parcela crescente do transporte coletivo urbano e metropolitano, tanto no mundo desenvolvido - França, Inglaterra, Austrália e Estados Unidos - como nas nações mais populosas do planeta - China e Índia (ITDP, 2009). Na África do Sul, foram implantados em algumas das cidades sede da Copa do Mundo de 2010. Várias são as iniciativas reportadas na América Latina (Menckhoff, 2005), incluindo sistemas na Colômbia, Chile, Equador, Perú e México. O Brasil pretende construir mais de 500 km de BRT nas cidades que irão sediar jogos da Copa do Mundo de 2014. Sistemas BRT cada vez mais se revelam como soluções sustentáveis e adequadas para atenuar os problemas crescentes da mobilidade urbana.

O desempenho dos sistemas BRT pode variar muito, dependendo da configuração de projeto que inclui tanto características da demanda e oferta como o modelo operacional. A capacidade transportada varia de 2.000 passageiros/h/sentido no pico (Levinson et al., 2003) ao recorde alcançado pelo TransMilenio de Bogotá que transporta 45.000 passageiros/h/sentido (BRT Policy Center, 2010). A velocidade operacional também é influenciada pela configuração do sistema e tem impacto direto na satisfação do usuário. Enquanto sistemas convencionais de ônibus trafegando em corredores dedicados tipo *busway* atingem velocidades em torno de 15 a 20 km/h, um sistema BRT bem concebido pode operar acima dos 25 km/h.

Com o objetivo de gerar conhecimento sobre o funcionamento de sistemas BRT, avaliar projetos existentes, explorar alternativas de projeto inovadoras, e colaborar no desenvolvimento de projetos de alta qualidade, trabalhamos no desenvolvimento de um modelo de simulação microscópica de natureza estocástica, denominado *EMBARQ BRT Simulator*. O modelo, especificado a partir da experiência de profissionais brasileiros que conceberam diversos sistemas BRT implantados no mundo, é capaz de avaliar o desempenho de sistemas BRT sob diferentes configurações de oferta e demanda.

Este artigo inicia descrevendo o simulador, bem como sua calibração com dados de Curitiba. Depois são apresentados dois estudos de caso, o primeiro envolvendo um dos corredores BRT propostos no Rio de Janeiro para atender os Jogos Olímpicos de 2016 e o segundo, relacionado ao sistema de BRT proposto para Arequipa, Peru, que teve a concepção original do projeto readequada a partir dos resultados apontados pela microssimulação.

## 2 DESEMPENHO DE SISTEMAS BRT

Cidades do mundo em desenvolvimento requerem sistemas BRT de alto desempenho que possibilitem o atendimento de demandas elevadas de forma rápida e segura (Wright e Hook, 2007). Logo, o desempenho de sistemas BRT deve ser avaliado sob a ótica da capacidade, da velocidade e da satisfação do usuário.

Gardner et al. (1991) e Fernandez e Planzer (2002) indicam as estações e as interseções como os principais gargalos na operação de sistemas sobre pneus na superfície. São elas que oferecem potenciais atrasos aos veículos e que acabam por limitar o desempenho de um BRT. O dimensionamento e operação das estações influenciam na geração de filas,

no tempo despendido na aproximação de uma estação e na duração da operação de embarque e desembarque dos passageiros, fatores estes que afetam muito a velocidade e capacidade do sistema (Gardner et al., 1991). A operação de embarque de passageiros é agilizada por pisos de veículos nivelados com plataformas de estações e com a cobrança de tarifas antes do embarque. Nas interseções, onde o BRT tende a sofrer com os atrasos impostos pelo controle semafórico, a prioridade semafórica pode ser utilizada para otimizar os movimentos de travessia dos veículos BRT (Koehler, 2009; Furth e Muller, 2007).

Como na concepção de sistemas BRT de alto desempenho predominam faixas segregadas, perturbações impostas pelo tráfego misto sobre os veículos BRT ocorrem em pontos localizados do corredor ou em áreas mais centrais da cidade. Assim, a influência da infraestrutura viária no desempenho do BRT diz mais respeito à quantidade de faixas por sentido dedicadas ao sistema BRT bem como oportunidades de ultrapassagem.

Dado o grande número de fatores que influenciam o desempenho dos sistemas BRT, é importante dispor de ferramental que propicie identificar de forma antecipada os problemas que uma configuração de projeto pode gerar. Nem todos os sistemas BRT implantados foram projetados de forma a propiciar o seu melhor rendimento, havendo sempre margem para implantar melhorias. Mesmo o sistema TransMilenio, de Bogotá já sofreu modificações, na medida em que estações críticas foram readaptadas para desmanchar gargalos operacionais decorrentes de serviços distintos que propiciam ultrapassagem e que utilizam baias específicas em estações com múltiplas plataformas. Na Indonésia, a quantidade de canais de acesso proporcionada pelos veículos BRT revelou-se um elemento limitador do desempenho do sistema TransJakarta (ITDP, 2003).

### 3 MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Os novos BRT são usualmente propostos com base em experiências já existentes e modificações tidas como adequadas para o contexto de implantação. No entanto, conceitos e ideias inovadoras, que se distanciam muito das existentes, são difíceis de avaliar e arriscadas para implantar tendo em vista os riscos de efeitos adversos sobre o desempenho do sistema BRT. Sem ferramentas adequadas, mesmo projetistas experientes têm dificuldade de convencer os tomadores de decisão de que as soluções propostas irão funcionar quando implantadas. São frequentes os casos onde modificações físicas e/ou frotas e serviços adicionais precisam ser introduzidos logo após o início das operações.

Modelos computacionais, particularmente os modelos microscópicos, têm sido largamente utilizados para avaliar o desempenho resultante de modificações na circulação do tráfego urbano e rodoviário. Modelos microscópicos de simulação de tráfego, baseados em técnicas de veículos seguidores (*car-following*), são desenvolvidos há varias décadas (Fox, 2000). Na prática, quase todo grupo acadêmico de pesquisa na área de tráfego ou desenvolveu uma nova ferramenta ou trabalhou na adaptação ou transferência de uma existente.

Como a maioria dos modelos microscópicos de tráfego disponíveis no mercado foi formulada para representar o comportamento de automóveis, aos veículos de transporte coletivo coube quase sempre o papel de coadjuvante. Ônibus são, via de regra, definidos de forma a possibilitar perturbações no fluxo quando do uso misto das faixas viárias.

Onde o automóvel é o foco da análise, os passageiros dos ônibus não têm identidade própria e, portanto, não estão propriamente representados na modelagem (Fernandez et al, 2006). Silva (2001), ao avaliar simuladores comerciais disponíveis no mercado, verificou que as operações de ônibus nas estações são pobramente representadas na maioria deles.

CORSIM (FHWA, 1996), DRACULA (Liu, 2003), NETSIM (Siddique e Khan, 2006), VISSIM (PTV, 2003) e PARAMICS (Quadstone, 2004) são exemplos de simuladores que proporcionam avanços no potencial da representação de ônibus na medida em que a operação do transporte coletivo é modelada através da definição de rotas fixas com frequências pré-estabelecidas. Por outro lado, nem todos esses modelos permitem simular, de forma apropriada, as interações complexas que ocorrem nas estações de ônibus, particularmente aquelas demandadas por centenas de ônibus por hora e que acabam por determinar o desempenho de sistemas BRT de alta capacidade. Esse foi o principal estímulo para o desenvolvimento do *EMBARQ BRT Simulator*.

#### 4 DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

O *EMBARQ BRT Simulator* é um modelo de simulação microscópica desenvolvido para representar realisticamente o desempenho de sistemas de BRT sob uma variedade de configurações físicas e operacionais. O termo microscópico diz respeito ao fato de todos os veículos serem simulados individualmente, em contraste a modelos macroscópicos ou mesoscópicos, em que o fluxo de tráfego é, respectivamente, tratado por meio de equações ou através da movimentação de pelotões veiculares. O software foi desenvolvido em linguagem C#, para Windows, utilizando tecnologias de programação modernas.

##### 4.1 Parâmetros de simulação

Os parâmetros da simulação são especificados em um arquivo de dados, divido nas seguintes seções:

- **Dados gerais:** contempla o período de simulação e constantes relacionadas à animação (como a largura das faixas).
- **Geometria:** inclui, entre outros, os dados da rede (nós e arcos), posição e dimensão das plataformas, localização e programação dos semáforos, posição dos despachadores de veículos (que injetam veículos no sistema).
- **Veículos:** especifica os tipos de veículos usados na simulação e suas características, incluindo: comprimento, velocidade máxima, taxas de aceleração e desaceleração, tempos de embarque e desembarque por passageiro e tempo morto nas plataformas.
- **Linhas:** codifica as linhas simuladas e suas características, incluindo: frequência, rota, parâmetros de parada em cada estação (tempos máximo e mínimo, disciplina de embarque e desembarque de passageiros) e os tipos de veículos usados pela linha.
- **Demand:** estabelece a demanda de passageiros entre os distintos pares Origem-Destino relacionados às estações operadas pelas linhas.

##### 4.2 Modelo de deslocamento dos ônibus

Na simulação, o tempo é discretizado em intervalos de 1 segundo. A cada intervalo, o programa atualiza a velocidade e a posição dos veículos na rede. Para tanto, usa um conjunto de expressões matemáticas. O modelo de deslocamento leva em conta duas situações distintas de trânsito: fluxo livre e fluxo obstruído. A simulação do fluxo obstruído é realizada através de um modelo de veículo seguidor (*car-following*).

O modelo de veículo seguidor utilizado é o de Gipps (1981) tendo em vista sua facilidade de aplicação, larga utilização, e facilidade de calibração quando comparado a modelos de veículos seguidores baseados em condicionantes comportamentais dos motoristas (Sirivandigurage et al, 2007). Entre os simuladores que utilizam a lógica desenvolvida por Gipps, encontram-se o SISTM (Wilson, 2001), SIGSIM (Marsden *et al.*, 2001) e DRACULA (Liu, 2003). Ainda, o modelo de Gipps já foi utilizado pela atual equipe no desenvolvimento de gerações anteriores de simuladores para sistemas de transporte coletivo urbano (Lindau et al, 1997; Lindau et al, 2003; Castilho et al, 2005).

#### 4.3 Tempo de parada nas plataformas

Quando um veículo BRT chega a uma plataforma, ele permanece parado durante o tempo necessário para o embarque e desembarque de passageiros, respeitando-se o limite máximo e mínimo estipulados, pelo usuário do modelo, para cada linha e cada estação. O tempo de parada leva em conta o tempo morto (tempo requerido para abertura e fechamento de portas), o número de passageiros que embarcam e desembarcam, e os tempos de desembarque e embarque por passageiro.

#### 4.4 Indicadores de desempenho

O simulador proporciona uma grande flexibilidade na definição dos indicadores de desempenho. Além das estatísticas relativas ao desempenho global do sistema, o usuário também pode solicitar um *log* dos veículos que reporta cada evento ocorrido ao longo da simulação (entre outros: horários de chegada e partida em cada estação, quantidade de passageiros embarcados e desembarcados, diagrama espaço vs. tempo, e outros). Ao final de cada rodada de simulação, o modelo gera um arquivo com resultados que pode ser exportado para uma planilha eletrônica para fins de análise e geração de gráficos.

### 5 CALIBRAÇÃO

O principal componente do simulador que requer calibração é o modelo de veículo seguidor. Esse modelo depende de quatro parâmetros principais: velocidade desejada ou de cruzeiro, aceleração máxima, desaceleração máxima, e a expectativa do veículo que segue com relação à desaceleração máxima do veículo da frente.

Com base em dados coletados com aparelhos GPS (*Global Positioning System*) em Curitiba e ajustes nos parâmetros de calibração, foi possível demonstrar a adequação do modelo de veículo seguidor para representar, com boa precisão, o deslocamento de veículos BRT em diversas condições de carregamento e inclinação da via. A Figura 1 apresenta um exemplo da calibração onde dados de campo são confrontados com resultados da simulação, caracterizando a boa aderência entre os dois conjuntos de dados. Mas é importante observar que, dependendo das condições operacionais, os valores dos parâmetros de calibração podem variar entre sistemas BRT. Assim, recomenda-se que o processo de calibração seja realizado caso a caso, sempre que possível.

Além do estudo em Curitiba, foi realizada uma coleta de dados em Porto Alegre, ao longo de um corredor tipo *busway*, para refinar a calibração de parâmetros referentes à aceleração de ônibus sucessivos. No corredor Assis Brasil, um dos mais carregados do Brasil em termos de volume de passageiros e ônibus, filmou-se a operação de pelotões de ônibus partindo de uma estação. Através de marcas pintadas no pavimento e da

relação entre a distância percorrida e o tempo de deslocamento, foi possível estimar a aceleração dos ônibus. O estudo confirmou os dados calibrados em Curitiba.

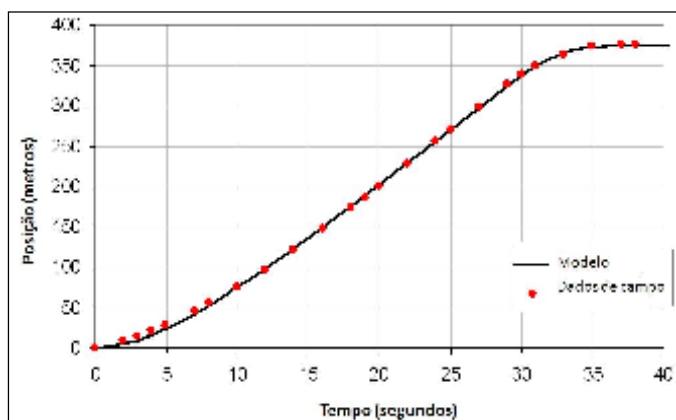


Figura 1 – Diagrama de deslocamento observado para trecho do BRT de Curitiba

## 6 ESTUDOS DE CASO

São apresentadas duas das aplicações mais recentes do simulador. Na primeira ele foi empregado para testar e aprimorar um projeto já existente de corredor de BRT no Rio de Janeiro. Na seguinte, foi utilizado na fase de concepção do projeto do BRT de Arequipa, apoiando tanto a definição do traçado como as dimensões das plataformas de estações.

### 6.1 Corredor BRT no Rio de Janeiro

O projeto do corredor BRT T5, atualmente denominado TransCarioca, no Rio de Janeiro, prevê a ligação do Terminal Alvorada, na Barra da Tijuca, ao terminal Penha, em um trajeto de 28 km, com 36 estações intermediárias e cerca de cem semáforos em cada sentido. O projeto detalhado do corredor foi desenvolvido por uma empresa de consultoria ainda antes do Rio de Janeiro se candidatar para sediar os Jogos Olímpicos de 2016.

O objetivo principal do estudo de simulação foi estimar as condições de operação do TransCarioca frente à demanda esperada para os Jogos Olímpicos e identificar maneiras de melhorar o desempenho do sistema caso necessário. Para tanto, foi preparado um arquivo de dados correspondente ao projeto original carregado com a demanda esperada para o período crítico dos Jogos Olímpicos (Comitê Olímpico Brasileiro, 2009). Uma vez identificados os principais gargalos operacionais, foram desenvolvidas alternativas visando à melhoria do desempenho do corredor.

O projeto original do corredor, anterior a candidatura do Rio como sede dos Jogos Olímpicos, previa 6 grandes estações com plataformas capazes de acomodar simultaneamente 2 veículos BRT paradores e 1 veículo BRT expresso por sentido, e 30 estações simples, com espaço para 2 veículos BRT paradores por sentido; esse cenário inicial foi denominado “Original”. O projeto proporcionava a avaliação de um cenário “Invertido” para dar conta da demanda das Olimpíadas, onde as plataformas das 6 grandes estações poderiam acomodar 2 expressos e 1 parador por sentido. Dada a intensidade da demanda prevista para o dia e hora críticos dos Jogos e, frente aos resultados preliminares da simulação, verificou-se que, para atender a demanda prevista e garantir uma maior flexibilidade operacional, seria necessário dotar as 6 grandes estações de plataformas com capacidade para atender simultaneamente 4 veículos (2 expressos e 2 paradores) por sentido; esse cenário foi denominado “Aumentado”. A figura 2 apresenta os três cenários considerados no estudo de simulação.

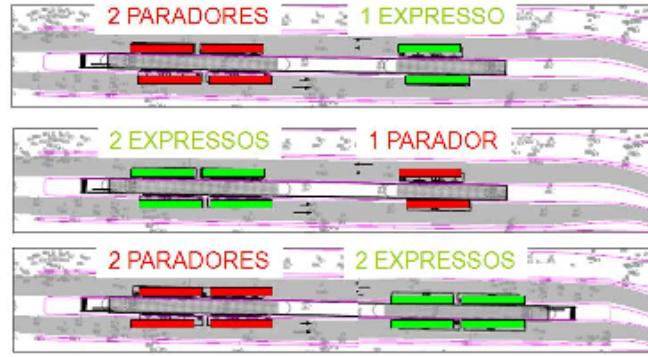


Figura 2 – Cenários proposto para análise do corredor T5

Para os parâmetros da simulação, foram adotados valores observados em sistemas semelhantes já implantados. Além desses, foram estabelecidos critérios para a escolha do passageiro entre o serviço local e o serviço expresso, uma vez que este pode optar entre os serviços ou, mesmo, por utilizar uma combinação de ambos (Figura 3):

- 1) se a origem e o destino são servidas pelo serviço expresso, o passageiro escolhe o serviço expresso;
- 2) se o número de paradas entre origem e destino é inferior a dez, escolhe o serviço local;
- 3) se a origem é servida pelo serviço expresso, mas o destino não, o passageiro escolhe o serviço expresso, desembarca o mais próximo possível do destino (sem passar do destino) e embarca em um veículo do serviço local até a estação desejada;
- 4) se a origem e o destino são servidos pelo serviço local e há mais de dez paradas entre origem e destino, o passageiro escolhe o serviço local até a estação expressa mais próxima da origem e embarca em um veículo do serviço expresso até a estação expressa mais próxima ao destino, pegando outro veículo (local) até o destino.

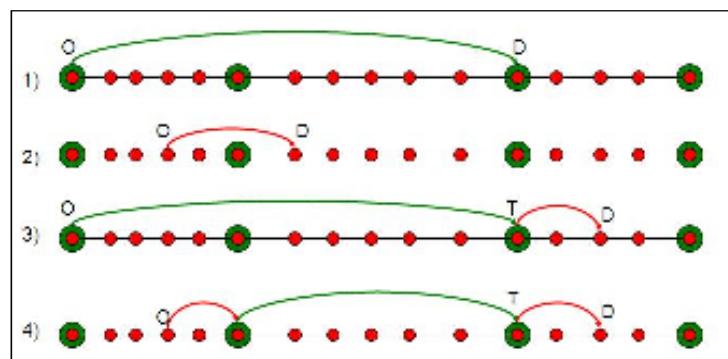


Figura 3 – Critérios adotados para escolha do serviço

A capacidade resultante para os cenários analisados pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 – Capacidade estimada para o TransCarioca

Cenário	Capacidade estimada
Original	20 a 24 mil passageiros/h
Invertido	28 a 30 mil passageiros/h
Aumentado	28 a 30 mil passageiros/h

O cenário “Invertido” apresentou maior capacidade que o “Original”, fato que dificilmente seria percebido pelos planejadores sem a utilização da simulação. A principal conclusão deste estudo é que ganhos significativos de capacidade podem ser alcançados com pequenas modificações no sistema operacional originalmente proposto. Entre os cenários “Invertido” e “Aumentado” não foram identificadas diferenças consideráveis na capacidade do sistema. Mostrou-se que não ocorrem ganhos de capacidade pela adoção de plataformas que atendam simultaneamente dois veículos paradores por sentido. Essa configuração representaria maiores custos com infraestrutura sem trazer benefícios em capacidade.

Além dos valores de capacidade do sistema proposto, o estudo de simulação analisou o efeito dos ciclos semafóricos, avaliou a saturação das plataformas, estimou as frotas requeridas para atender as demandas, além da velocidade operacional e a densidade de ocupação dos passageiros nas plataformas.

## 6.2 Sistema BRT de Arequipa

Arequipa, a segunda maior cidade do Peru, pretende seguir os passos de Lima implantando um sistema BRT que possibilite um transporte de qualidade, mais organizado, com maior capacidade e melhor nível de serviço do que o proporcionado pelos coletivos informais hoje existentes. Além disso, o sistema visa diminuir os elevados níveis de emissões de poluentes locais, bem como proporcionar uma imagem mais amigável e convidativa para a cidade como um todo e para apoiar o resgate do seu centro histórico que é patrimônio da humanidade.

O sistema BRT tronco-articulado proposto para Arequipa é estruturado por um corredor segregado que conecta os cones Norte e Sul da cidade através do centro histórico. O corredor possui por volta de 15 quilômetros, conta com 29 ou 38 estações dependendo da configuração considerada e possui, em seu trecho mais carregado, uma demanda prevista de 10.000 passageiros por sentido na hora-pico. Os objetivos do estudo de microssimulação foram: (i) verificar a saturação do sistema BRT frente às demandas previstas; (ii) identificar os pontos críticos; (iii) propor medidas para ampliar a capacidade nos pontos críticos.

O projeto inicial do BRT previa duas alternativas. A Alternativa I, corresponde a uma linha apenas, conectando os terminais localizados nos cones Norte e Sul da cidade. No centro da cidade, devido às ruas muito estreitas, os trajetos em um e outro sentido utilizam vias paralelas. A Alternativa II corresponde à operação com duas linhas, também conectando os mesmos terminais extremos, mas com trajetos diferentes na área próxima ao centro da cidade. Essa alternativa tem como objetivo distribuir a demanda do centro por uma área mais ampla, com mais estações, bem como dotar o sistema de uma maior cobertura. A Alternativa II é complementar à Alternativa I.

Antes do estudo de simulação, a equipe proponente do projeto cogitava iniciar a operação com a Alternativa I expandindo no futuro para a Alternativa II. A implantação em etapas visa diminuir os investimentos iniciais para colocar o projeto em operação. A figura 4 apresenta o traçado do corredor e das duas alternativas, assim como a localização das estações.

Primeiro foi avaliada a Alternativa I. Foram criados e testados os seis cenários descritos na Tabela 2. Verifica-se que a operação da Alternativa I inicia muito próxima da saturação, pois o cenário 6 indica que um incremento de apenas 20% na demanda estimada daria início ao congestionamento em estações do BRT. Decidiu-se, então, pela simulação da Alternativa II testando os cenários descritos na Tabela 3.

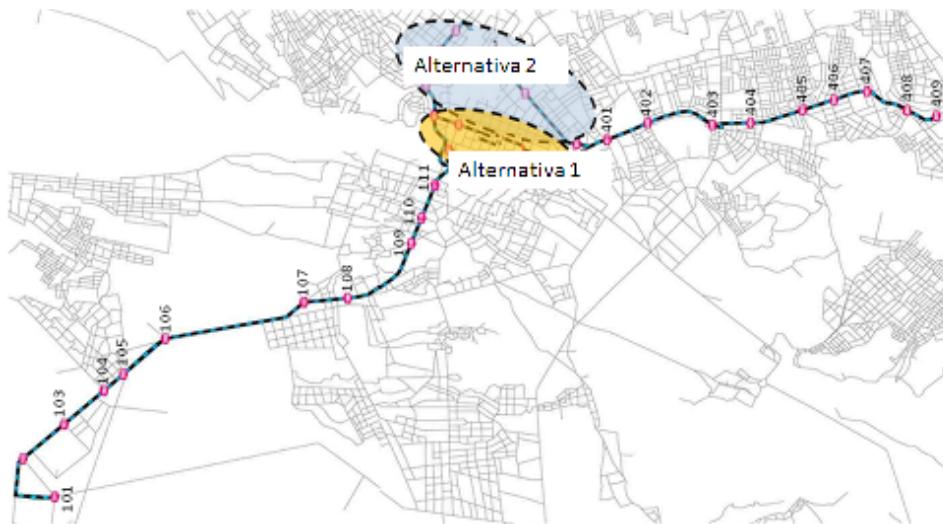


Figura 4 - Sistema BRT projetado para Arequipa, Peru

Tabela 2 – Cenários estudados na Alternativa I

Cenário	Baias/plataformas	Tempo de ciclo/tempo de verde (s)	Carregamento (% da demanda)	Resultado
1	1 em todas as estações	60/40	100%	congestionamento na estação 110
2	2 nas estação 110, 1 nas demais	60/40	100%	congestionamento nas estações 209, 210, e 401
3	2 nas estações com + de 1000 embarques/h/sentido, 1 nas demais	60/40	100%	sem formação de congestionamentos
4	2 nas estações com + de 1000 embarques/h/sentido, 1 nas demais	90/60	100%	aumento de 5% na velocidade operacional do sistema, sem congestionamentos
5	2 nas estações com + de 1000 embarques/h/sentido, 1 nas demais	90/60	110%	aumento na ocupação das plataformas, sem congestionamentos
6	2 nas estações com + de 1000 embarques/h/sentido, 1 nas demais	90/60	120%	congestionamento nas estação 409

Tabela 3 – Cenários estudados na Alternativa II

Cenário	Baias/plataformas	Tempo de ciclo/tempo de verde (s)	Carregamento (% da demanda)	Resultado
1	1 para todas as estações	90/60	100%	congestionamento na estação 104
2	2 para a estação 104, 1 nas demais	90/60	100%	congestionamento nas estações 110
3	2 para as estações que atendem as 2 rotas, 1 nas demais	90/60	100%	sem formação de congestionamentos

A Alternativa I revelou que estações dotadas de plataformas para um único BRT não apresentam suficiente capacidade para uma operação fluida e sustentável. Já a adoção de plataformas que atendam simultaneamente dois ônibus por sentido, nas estações em que o fluxo de passageiros ultrapassa 1.000 embarques e desembarques por hora, mostrou-se capaz de atender a demanda atual. O aumento nos tempos de ciclo de 60 para 90 segundos proporcionou um aumento de 5% na velocidade operacional. A Alternativa I dotada de plataformas duplas nas estações críticas absorve incrementos de demanda de até 10%, porém para uma demanda de 120%, em algumas estações são geradas filas significativas.

A operação sugerida na Alternativa II, com as linhas usando trajetórias distintas ao cruzar o centro histórico de Arequipa, reduz o volume de embarques e desembarques nas estações críticas. Fora do centro, onde as duas trajetórias se sobrepõem e os fluxos de BRT se aproximam de 80 veículos por hora, algumas estações necessitam de plataformas para dois ônibus por sentido no horário de pico.

Do ponto de vista da capacidade, do nível de serviço, e da intrusão visual no centro histórico de Arequipa, a Alternativa II apresentou-se bem superior à Alternativa I. Frente aos resultados do estudo de simulação, os proponentes do sistema BRT reviram a proposta inicial de faseamento na implantação do sistema decidindo pela implantação imediata da Alternativa II.

## 7 CONCLUSÃO

Os sistemas BRT implantados em cidades dos cinco continentes apresentam diferentes configurações e desempenhos. Faixas de ultrapassagem junto às estações, por exemplo, permitem a utilização de serviços expressos e semi-expressos que, se bem projetados, podem incrementar em muito a capacidade e a velocidade operacional. Dado o grande número de fatores que influenciam no rendimento de um sistema BRT, é importante dispor de ferramental próprio que permita uma análise detalhada e que propicie estudar, de forma sistemática, as diversas opções de projeto disponíveis tanto na concepção da infraestrutura como na especificação de veículos, planos semafóricos e formas de operação.

Este artigo descreve um modelo de simulação microscópica desenvolvido especificamente para aprimorar projetos de BRT, e sua aplicação em duas cidades. Em ambos os casos, o modelo permitiu comparar, quantitativamente, o impacto de diferentes alternativas, contribuindo assim na seleção daquela que melhor atendia cada caso.

O efeito da interação entre os vários elementos físicos e operacionais no desempenho de um BRT ainda é pouco relatado na literatura, sendo a maior parte dos elementos de projeto tratado de forma isolada. Neste contexto, a utilização de modelos de simulação microscópica específicos para sistemas BRT, como a descrita neste artigo, contribui de forma importante, na medida em que permite testar combinações tradicionais ou inovadoras de elementos de projeto sem que seja necessário incorrer no risco de desenvolver um processo de tentativa e erro no mundo real. Ambos os casos reportados revelam a importância de testar o desempenho dos sistemas BRT e aprimorar seus projetos antes da implantação física.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRT Policy Center. (2010). Em: <<http://www.gobrt.org/db/project.php?id=76>>. Acesso em: 29 jul 2010.
- Castilho, R.; Lindau, L.A.; Castilho, B. (2005). High Flow Bus Stop In Bus Rapid Transit: Conceptual Analysis And Simulation. Presented at the TRB Conference, Washington, DC, Estados Unidos.
- Comitê Olímpico Brasileiro (2009). Dossiê candidatura do Rio de Janeiro a sede dos Jogos olímpico e Paraolímpicos de 2016. Disponível em: <[www.rio2016.org.br](http://www.rio2016.org.br)>. Acesso em: 29 jul 2010.
- Fernandez, R.; Planzer, R. (2002). **On the capacity of bus transit system.** Transport Reviews, v 22, n 3, 267-293.
- Fernandez, R.; Cortes, C. E.; Burgos, V. (2006). Modelación de pasajeros, buses y paraderos en microsimuladores de trafico: revisión y extensiones. Artigo aprovado para publicação e apresentação no Congresso Panamericano de Engenharia de Tráfego e Transportes. Ilhas Canárias, Espanha.
- FHWA (1996). CORSIM User Manual, Version 1.01. Federal Highway Administration, Washington D.C
- Fox, K. (2000). **SMARTEST – new tools for evaluating ITS.** Traffic Engineering & Control 41(1), 20-22.
- Furth, P. G.; Muller, T. H. J. (2007). **Conditional bus priority at signalized intersections: better service with less traffic disruption.** Transportation Research Record, v 1731, 23-30.
- Gardner, G.; Cornwell, P. R.; Cracknell, J. A. (1991). **The performance of busway transit in developing cities.** Transportation and Road Research Laboratory.
- Gipps, P. G. (1981). **A behavioral car-following model for computer simulation.** Transportation Research, B v 15, 105-111.
- ITDP (2003) **TransJakarta Busway Project: Technical Review.** Institute for Transportation and Development Policy, Jakarta.
- ITDP (2009). Disponível em: <[www.chinabrt.org](http://www.chinabrt.org)>. Acesso em: 12 nov 2009.
- Kittelson & Associates, INC., (2007). Bus Rapid Transit Practitioner's Guide **Transit Cooperative Research Program: Report 118.** Washington, DC, Estados Unidos.
- Koehler, L. A. (2009) **Controle integrado de prioridade e retenção para operação de sistemas de transporte público.** Tese de Doutorado. PPGEE. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Levinson, H.; Zimmerman, S.; Clinger, J.; Rutherford, S.; Smith, R. L.; Cracknell, J.; Soberman, R. (2003). Bus rapid transit, v 1: Case studies in BRT. **TCRP Report 90**, Washington, DC, Estados Unidos.
- Lindau, L.A., Hidalgo, D., Facchini, D. (2010). Curitiba, Brazil: Inauguration of the sixth BRT corridor after 35 years of continuous bus-oriented development. Accepted for publication at the Transportation Research Record.
- Lindau, L.A.; Castilho, B.; Castilho, R.; Peixoto, N.M.O. (2003) **Simulação da operação de sistema prioritário para ônibus: o caso de uma estação de transferência.** Anais 14 Congresso ANTP, Vitória, Brasil.

- Lindau, L.A., Michel, F.D., Ribeiro, J.L.D; Kuhn, F. (1997) **Modelando o desempenho operacional de busways e tramways.** EGATEA, v.25, no.3, 67-76.
- Liu, R. (2003). **DRACULA Traffic Model User Manual**, Version 2.0. ITS, U. Leeds.
- NTU (2010) **Conceitos e custos para sistemas BRT.** Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. Brasilia, Brasil.
- Marsden G.; M. Belle S. Reynolds (2001) **Towards a real-time microscopic emissions model.** Transportation Research D, volume 6, 37-60.
- Menckhoff, G. (2005). **Latin American Experience with Bus Rapid Transit.** In: Annual Meeting, Institute of Transportation Engineers. Melbourne, Australia.
- PTV (2003). **VISSIM User Manual**, Version 3.7. Planung Transport Verkehr.
- Quadstone (2004). **Quadstone PARAMICS Modeller and Programmer Reference Manual**, Version 4.2.
- Siddique, A.J. e Khan, A. M. (2006) **Microscopic simulation approach to capacity analysis of bus rapid transit corridors.** Journal of Public Transportation, v. 9, no. 3, 183-200.
- Silva, P.C. (2001). **Modeling interactions between bus operations and traffic flow.** PhD Thesis, U. London.
- Sirivadidurage, S.P.K., Hounsell, N. e Cherrett, T. (2007). **Evaluating bus priority and queue relocation techniques of presignals.** Proceedings of the 2006 TRB Conference, número 07-0495. Washington, EUA.
- Wilson, R. E. (2001) **An Analysis of Gipps' car-following model of highway traffic.** IMA Journal on Applied Mathematics.
- Wright, L.; Hook, W. (2007). **Bus Rapid Transit Planning Guide.** ITDP. New York, Estados Unidos.

## **IMPACTO DE ELEMENTOS DE PROJETO NO DESEMPENHO DE SISTEMAS BRT**

Brenda Medeiros Pereira, Eng.

Luis Antonio Lindau, PhD.

Rodrigo Castilho, MSc.

Mara Chagas Diógenes, Dr.

### **RESUMO**

Apesar de seu forte crescimento, a indústria da BRT está longe de atingir a maturidade. Métodos de tentativa-e-erro e técnicas empíricas foram amplamente utilizados como para inovações no projeto de sistemas de ônibus. Alguns sistemas alcançaram grandes êxitos em termos de desempenho e se tornaram modelos de classe mundial, enquanto outros seriam mais corretamente classificados como sistemas de BRT se apresentassem melhoramentos importantes, tais como veículos com portas mais largas, a realocação das estações em relação às interseções e aos semáforos, a reorganização das plataformas para facilitar as manobras necessárias ao BRT, etc. Para reduzir as deficiências na concepção do BRT, uma equipe de pesquisadores e consultores com experiência em desenvolvimento de projetos de transportes no Brasil e no exterior desenvolveu o EMBARQ Simulator BRT. O software constitui um modelo de simulação microscópica com interface gráfica e animação para identificar gargalos e outros pontos críticos. Este modelo é capaz de representar uma ampla gama de sistemas de alto desempenho BRT prevalecente no mundo em desenvolvimento. Neste artigo vamos explorar o desempenho dos sistemas de BRT, em termos de capacidade e velocidade operacional, através da realização de um projeto de experimentos para testar cenários alternativos. Através de simulações, são analisados diversos elementos: níveis de demanda, taxas de embarque e desembarque, distância entre estações, fator de carregamento dos veículos, quantidade de berços por plataforma, e o posicionamento de semáforos em relação às estações. Da análise qualitativa são descritas as principais conclusões dos 324 cenários simulados. A análise estatística possibilitou a estimativa de modelos de regressão simples e combinados. O modelo de regressão estimado a partir dos efeitos individuais dos elementos, que é mais simples e de fácil aplicação, apresentou uma formulação consistente e representativa. Porém, do ponto de vista estatístico, o modelo do efeito dos elementos combinados apresentou maior robustez na representação do comportamento da velocidade operacional.

### **ABSTRACT**

Despite its booming growth, the BRT industry is far from reaching maturity. As trial-and-error and empiric techniques were largely used as insights for innovations in design, some systems achieved great successes in terms of performance and became world-class flagships whereas others would be most properly classified as BRT systems requiring major improvements such as buses with wider doors, relocating stations in relation to intersections and traffic lights, rearranging berths to facilitate merging and diverging BRT manoeuvres, etc. To reduce shortcomings in BRT design, a team of researchers and consultants experienced in developing transit projects in Brazil and abroad developed the EMBARQ BRT Simulator. It is a microscopic computer model with graphical user interface and animation to identify bottlenecks and other critical spots that is capable of representing a wide range of high performance BRT systems prevailing in the developing world. In this paper we explore the performance of BRT systems in terms of capacity and operating speed by conducting a design of experiments methodology to test alternative scenarios. In the simulation runs we varied demand levels, boarding and alighting rates, spacing of stations, vehicle loadings, quantity of berths, and traffic light positioning in relation to stations. In our qualitative analysis we describe the main finding from 324 simulation runs. The statistical analysis allowed the estimation of simple regression models and combined ones. The regression model estimated from the individual effects of the elements presented a formulation consistent and representative. However, from a statistical analyzes, the combined model showed greater robustness in representing the behavior of operating speed.

### **1 INTRODUÇÃO**

O Bus Rapid Transit (BRT) é tradicionalmente definido como “um transporte rápido de massa que apresenta a qualidade do transporte ferroviário e a flexibilidade do sistema

ônibus" (FTA, 2009). É caracterizado como uma forma de transporte de massa flexível que combina estações, veículos com pneus de borracha, serviços e vias em um único sistema (Levinson et al., 2003). Porém, é justamente a flexibilidade intrínseca ao conceito que pode dar margem a um BRT com melhor ou pior desempenho. Os projetistas dispõem de diversos elementos e a combinação ou configuração estabelecida entre eles é determinante para o grau de sucesso de um BRT.

O desempenho dos sistemas BRT pode variar expressivamente de acordo com a sua configuração de projeto. Quanto à capacidade, variam de 2.000 passageiros por hora através de 50 ônibus/h/sentido no período de pico (Levinson et al., 2003), ao recorde do TransMilenio, sistema BRT de Bogotá, que transporta 45.000 passageiros/h/sentido (BRT Policy Center, 2004). A velocidade operacional também é determinada pela configuração do sistema e impacta diretamente na satisfação do usuário; quanto maior a velocidade e menor a sua variabilidade tanto melhor é a avaliação de um sistema BRT.

A experiência com sistemas de ônibus de alta capacidade resulta de um processo de tentativa e erro combinado com doses de pragmatismo e empirismo (Lindau e Willumsen, 1990). Tipicamente os projetistas tendem a tomar suas decisões com base no desempenho observado em sistemas já implantados com configurações físicas e operacionais que se assemelham ao proposto. A literatura tende a reportar o impacto de vários elementos físicos e operacionais no desempenho de um sistema BRT, porém pouco trata do efeito da interação entre eles. O aprendizado com o desempenho de um sistema BRT, quando configurado de forma tradicional ou mesmo inovadora, possibilita que o projetista amplie sua gama de opções técnicas voltadas para uma melhor adequação de um projeto às demandas impostas por sua implantação.

O entendimento sobre os impactos dos elementos permite, entre outros: (i) explorar o potencial dos sistemas atuais de BRT; (ii) avaliar alternativas de projeto; (iii) testar novas concepções e detectar eventuais problemas antes da implantação física; (iv) treinar projetistas, gerentes e operadores; e, (vi) apoiar o processo de tomada de decisão.

Poucos são os instrumentos que possibilitam o estudo da complexidade das interações entre os elementos. A simulação computacional permite o estudo de conceitos tradicionais e inovadores. Ao testar cenários, o projetista distancia o projeto dos riscos inerentes às falhas na interação dos elementos, que são intrinsecamente difíceis de avaliar e que podem acarretar efeitos adversos sobre um sistema BRT quando de sua real implantação. Como objetivo principal, este artigo enfoca o efeito da interação de elementos no desempenho de sistemas BRT.

## 2 DESEMPENHO DOS SISTEMAS BRT

No mundo em desenvolvimento, é preciso projetar sistemas BRT que atendam altas demandas de passageiros de forma rápida e confortável (Wright e Hook, 2007). Logo, o desempenho dos sistemas BRT deve, entre outras dimensões, ser avaliado sob a ótica da capacidade, da velocidade operacional e da satisfação do usuário.

Há uma série de elementos físicos ou operacionais que podem influir no desempenho de sistemas BRT. Elementos físicos incluem, por exemplo: a existência ou não de faixas de ultrapassagem, a distância entre estações, o posicionamento entre estações e interseções, o tipo de veículo escolhido, e outros. Elementos operacionais se referem ao arranjo operacional adotado, entre eles: o ciclo semafórico, a coordenação entre semáforos, o número de serviços operando no corredor. Os elementos físicos e operacionais abordados neste artigo são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Elementos que influenciam o desempenho de um sistema BRT.

ELEMENTOS	INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO	FONTE
Ultrapassagem	A ultrapassagem permite a operação de serviços diferenciados: locais, acelerados e expressos. Resulta em maior velocidade operacional e capacidade.	Gardner et al. (1991)
Ciclo semafórico e Coordenação entre semáforos	Redução no atraso nas interseções, aumento na confiabilidade do sistema, aumento da velocidade operacional e consequente redução no tempo de viagem no veículo.	Gardner et al. (1991); Janos e Furth (2002)
Distância entre estações	Quanto maior a distância entre estações, menor será o tempo perdido com a aceleração e desaceleração dos veículos e maior a velocidade operacional do BRT, consequentemente, menor o tempo de ciclo; porém, maior será o tempo médio de caminhada dos passageiros para acessar as estações.	Furth e Rahbee (2000); Kittelson & Associates, Inc et al. (2003)
Posicionamento da estação em relação à interseção	Interfere no perfil de acelerações e velocidades do corredor e no instante ideal para deixar a estação com relação à programação semafórica.	Mercedes-Benz do Brasil S.A. (1987); Wright e Hook (2007)
Interface do veículo com a plataforma	A relação entre o veículo e plataforma (diferença de nível, tempo de abertura de portas, docagem) influencia no tempo de embarque e desembarque por passageiro, por consequência, nos tempos totais de viagem no veículo e na velocidade operacional do BRT.	Vuchic (2007)
Tamanho do veículo	Influi no dimensionamento e layout das estações, das frequências, no número de portas e na dirigibilidade. A frota pode operar com um tamanho de veículo padrão ou utilizar veículos variados. Em sistemas que almejam capacidades elevadas há a tendência pelo uso de veículos articulados e biarticulados.	Wright e Hook (2007); Ceder (2007)
Número de baias por estação	O maior número de baias influencia na determinação da capacidade e redução da saturação das plataformas.	Wright e Hook (2007)
Fator de carregamento dos veículos	Indica a relação entre a capacidade total do veículo, entre passageiros sentados e em pé, e a lotação máxima prevista no dimensionamento.	Vuchic (2007)
Headway	O controle da regularidade do <i>headway</i> permite maior confiabilidade nos sistemas BRT. O aumento da frequência do serviço ofertado resulta na redução do <i>headway</i> e, assim, em um menor tempo médio de espera pelo veículo.	Vuchic (2007)
Comboios	Os veículos agrupados agem como trens e, assim, reduzem os atrasos nas estações, pois aceleram e desaceleram quase simultaneamente. Alguns estudos sugerem que a ordenação de ônibus pode aumentar em 10% da capacidade de uma linha e reduzir o tempo de viagem através da área de parada dos veículos da ordem de 25% a 40%.	Gardner et al. (1991)

## 2.1 Capacidade

A capacidade de um sistema de transporte coletivo remete a diferentes classificações. Pode-se determiná-la a partir da capacidade limite de seu componente mais carregado, por exemplo: a via, as interseções e as estações (Fernandez e Planzer, 2002). Em geral, a capacidade é definida como o carregamento máximo transportado através da seção crítica em um intervalo de tempo; já alguns operadores quantificam a capacidade através da soma do total de embarques registrados ao longo do sistema em um intervalo de tempo. Ainda, varia a forma como é expressa a capacidade, que pode ter como unidade o número máximo de veículos observados em um intervalo de tempo, o número

máximo de passageiros transportados no mesmo intervalo e o número de lugares ofertados pelo sistema de transporte (Vuchic, 2001), onde a relação entre as duas últimas foi estimada na ordem de 0,75 a 0,90 (Parkinson e Fisher, 1996). A tabela 2 apresenta algumas definições para alguns dos conceitos de capacidade disponíveis na literatura.

Tabela 2 - Classificações de capacidade (adaptado de Vuchic, 2007 e Fernandez e Planzer, 2002)

Categoría	Designação
Capacidade do veículo	Sentados
	Em pé
	Sentados + em pé
Capacidade da via	Fluxo máximo de veículos que podem ser atendidos em uma seção da via em um dado período de tempo
Capacidade da linha	Quantidade máxima de lugares ou de passageiros que uma linha pode transportar por sentido de circulação através de uma seção da via em um dado período de tempo
	Total de embarques por sentido de circulação em um dado período de tempo em todas as estações atendidas por uma linha
Capacidade da estação	Número máximo de veículos atendidos em um sentido de circulação em um dado período de tempo
	Número máximo de embarque/desembarques em um sentido de circulação em um dado período de tempo
Capacidade da interseção	Número máximo de veículos que podem cruzar a interseção considerando o plano semafórico utilizado em um sentido de circulação em um dado período de tempo
Unidades de capacidade	Passageiros/hora/sentido
	Lugares/hora/sentido
	Veículos/hora/sentido

A capacidade no transporte coletivo é relacionada às pessoas através do número de passageiros atendidos, e, aos veículos, através do número máximo de veículos suportado pelo corredor, e depende do tamanho dos veículos, da frequência do serviço e da interação do tráfego de passageiros e fluxo de veículos (Highway Capacity Manual, 2000). Fernandez e Planzer (2002) aprofundam o estudo de capacidade com foco na capacidade das estações, pois apresentam estas como pontos críticos em um corredor de ônibus segregado, como ocorre no caso do BRT.

Na busca por avaliar a capacidade de atendimento das estações, um dos parâmetros de estudos é o número de baias que representa a quantidade de veículos que podem parar ao mesmo tempo na plataforma de uma estação. O número de baias varia do mínimo para atender a demanda sem gerar filas excessivas ao máximo permitido pelo espaço disponível para a estação. A literatura sugere que o acréscimo no número de baias reduz a saturação na plataforma, reduzindo as chances de congestionamento (Wright e Hook, 2007).

## 2.2 Velocidade

Assim como a capacidade, a velocidade é passível de diversas classificações. A velocidade pode ser diferenciada em categorias e, dentro destas, apresentar designações. A tabela 3 apresenta as classificações para velocidade adotadas por Vuchic (2001).

Tabela 3 – Classificação de velocidades (adaptado de Vuchic, 2001)

Categoría	Designação
Velocidade do veículo	Velocidade instantânea
	Velocidade máxima dadas as especificações do veículo
	Velocidade média entre estações, não considerando a parada na estação
	Velocidade operacional, considerando a distância e o tempos entre a saída de um terminal e chegada em outro
	Velocidade ciclo para percorrer todo o trajeto da linha e iniciar uma nova viagem
Velocidade da linha	Velocidade de projeto utilizada para dimensionamento do sistema de transporte
	Velocidade máxima da via determinada pela legislação de trânsito
	Velocidade programada considerando os pontos de parada ao longo do trajeto
Velocidade do passageiro	Velocidade de acesso à estação e ao veículo
	Velocidade entre a origem da viagem e seu destino
	Velocidade no veículo considerando o tempo entre a entrada e a saída do passageiro do veículo

A velocidade é a razão entre a distância percorrida e o tempo gasto para este deslocamento. A diferença na determinação das velocidades classificadas na tabela 2 está nas distâncias e nos tempos considerados. Por exemplo: a velocidade origem-destino de um passageiro inclui os deslocamentos a pé, dentro de veículos e esperas; enquanto a velocidade operacional considera apenas os deslocamento e tempos impostos dentro do veículo (Vuchic, 2001).

Os atrasos em estações e interseções são os principais contribuintes para a redução da velocidade operacional dos sistemas tipo BRT (Gardner et al., 1991). Entre os elementos que afetam a velocidade estão: a programação semafórica (Janos e Furth, 2002); a distância entre estações, o volume de passageiros nas estações, o número de interseções, o fluxo de ônibus na estação e a possibilidade de ultrapassagem nas estações (Gardner et al., 1991). Para os usuários do transporte coletivo, o tempo total de viagem é mais importante que a velocidade desenvolvida pelo veículo (Wright e Hook, 2007). Para planejadores e operadores, a velocidade do ciclo é um dos parâmetros mais importantes, pois influi diretamente na frota necessária e, consequentemente, nos custos de aquisição, operação e manutenção dos veículos.

Sobre a distância entre estações, um dos parâmetros avaliados neste estudo, busca-se, em geral, atender os pontos que concentrem as maiores demandas. Quanto maior for a distância entre estações, menor o tempo perdido nas fases de aceleração e de desaceleração, porém maior a distância de caminhada para que os pedestres acessem a estação e maior a concentração de passageiros nas estações, para um mesmo número de passageiros no sistema. O valor médio para distância entre estações de sistemas de ônibus é de 400 metros, não devendo ser maior que 800 metros, valor esperado para sistemas sobre trilhos (Kittelson & Associates, Inc et al, 2003; Farewell e Marx apud CEDER, 2007).

O número de semáforos em um corredor afeta o desempenho do sistema BRT ao impor mais atrasos aos veículos e maior o tempo despendido por eles em regime de aceleração e desaceleração. Em geral, um corredor BRT apresenta semáforos de dois tipos: para travessia de pedestre e para o cruzamento de veículos. Em áreas urbanas de alta densidade de pedestres, existe a discussão sobre qual deve ser a distância mínima para uma travessia segura. Para estas áreas há indicações da necessidade de uma

travessia de pedestres entre 100 e 500 metros. (Kostanjsek e Lipar, 2007). Nos cenários modelados, os semáforos foram sempre localizados com espaçamento de 250 metros entre si. Por outro lado, buscou-se determinar o efeito de posicionar os semáforos imediatamente antes e imediatamente depois das estações. A posição dos semáforos foi escolhida como um dos elementos de estudo pela facilidade de modelagem na microssimulação e por ser tema de alguns questionamentos na literatura (Kittelson & Associates, Inc et al, 2003). O estudo considera tempos de ciclo fixos de 120 segundos, sendo 60 de verde e 60 de vermelho. Wright e Hook (2007) apontam que tempos de verde de 50% do ciclo são considerados usuais para corredores operados por sistemas BRT.

### 2.3 Satisfação do usuário

A satisfação é definida como a resposta do usuário para a diferença observada entre o serviço idealizado e o real ofertado e envolve as suas percepções e expectativas (Stradling et al., 2007). A literatura apresenta diversos elementos que podem influenciar na satisfação dos passageiros, entre eles: fator de carregamento do veículo, confiabilidade, tempo total de viagem, segurança viária e pública, custo, aparência e conforto (Kittelson & Associates, Inc et al, 2003). Neste artigo são abordadas quatro medidas de desempenho relacionadas à satisfação do usuário: tempo total de viagem, conforto, frequência e confiabilidade operacional.

#### 2.3.1 Tempo total de viagem

O tempo total de viagem de um passageiro do transporte coletivo vai além do tempo em que este está no veículo. Uma viagem, do ponto de vista do passageiro, contempla o tempo em deslocamento da sua origem até a estação, o tempo de espera pelo veículo, o tempo de embarque, o tempo em deslocamento dentro do veículo, o tempo de desembarque e o tempo de deslocamento do ponto de desembarque até o seu destino final, além de possíveis tempos adicionais para integrações, também denominadas de transbordos (Kittelson & Associates, Inc et al, 2003).

Os usuários percebem esses tempos de forma diferenciada. O deslocamento até a estação, o tempo de espera pelo veículo e o tempo destinado à integração mostram-se duas vezes mais onerosos para o passageiro do que o tempo gasto dentro do veículo (Ortúzar e Willumsen, 2001). Ceder (1983) sugere valores convenientes para a razão entre o tempo de caminhada e o tempo de viagem no veículo: 2,0 na Holanda, 3,5 em Chicago e 6,2 em São Francisco. Neste exemplo, os usuários da cidade de São Francisco, EUA, consideram um minuto de caminhada até a estação 6,2 vezes mais inconveniente que um minuto dentro do veículo; a diferença de percepção pode ser atribuída à peculiar topografia do terreno. As condições do pavimento e de segurança pública, entre outras, também afetam os tempos de caminhada.

Diferentes autores apresentam procedimentos para minimizar os tempos de viagem através da otimização do espaçamento entre as estações (White, 2008; Ceder, 2007; Furth e Rahbee, 2000). Entre os parâmetros considerados nas equações estão: extensão média de uma viagem, tempo de parada na estação, distâncias e tempos em regime aceleração e desaceleração, velocidade cruzeiro, velocidade e tempo de caminhada da origem/destino até a estação. Porém, algumas dessas equações ignoram que o passageiro perceba a passagem do tempo de forma diferente em cada etapa da viagem, o que pode distorcer as conclusões sobre a distância ideal entre estações, do ponto de vista de satisfação do usuário.

O tempo de permanência dos veículos nas estações pode ser decomposto em um tempo morto, mais o tempo de embarque e desembarque. O tempo morto é todo aquele

que não é utilizado para embarque e desembarque, ou seja, o que independe do número de passageiros embarcando ou desembarcando (Chapman, 1978). Existem diferentes definições sobre o tempo de parada na estação. Nesse estudo considera-se “tempo de parada” como a diferença entre o instante que a roda do veículo para na plataforma de embarque e desembarque e o instante em que volta a rodar. O tempo de embarque e desembarque depende de diferentes fatores: desnível entre a plataforma e o veículo, distância do veículo ao meio-fio, design das portas, espaço disponível imediatamente na entrada do veículo e forma de cobrança do pagamento (Chapman, 1978). Além desses, depende muito do número de canais e da distribuição entre embarques e desembarques.

O tempo de embarque/desembarque (E/D) é função do número de passageiros que deseja embarcar e desembarcar na estação e do tempo gasto por passageiro para esta operação. Em geral, o tempo gasto para o embarque de um passageiro é superior ao de desembarque. Esse tempo pode ser estimado de duas formas (Vuchic, 2007): os passageiros embarcam por uma porta e desembarcam por outra e neste caso a estimativa é feita pelo movimento predominante (equação 1), ou primeiro ocorre o desembarque e em seguida o embarque pela mesma porta, desta forma a estimativa é feita pela soma de todos os tempos (equação 2).

$$t_s = t_o + \max(b' * \tau_b; a' * \tau_a) \quad \text{Equação 1}$$

$$t_s = t_o + b' * \tau_b + a' * \tau_a \quad \text{Equação 2}$$

Onde:  $t_s$  representa o tempo na estação;  $t_o$  representa o tempo morto;  $b'$  representa o número de embarques;  $\tau_b$ , tempo de embarque por passageiro;  $a'$  representa o número de desembarques;  $\tau_a$ , tempo de desembarque por passageiro.

A taxa de passageiros embarcando por segundo em um veículo é um dos fatores avaliados neste estudo. Considerando que essa taxa depende da quantidade de passageiros que embarca por segundo por canal e do número de canais disponíveis para embarque nos veículos, a tabela 3 apresenta diferentes valores para a taxa de passageiros embarcando por segundo em um veículo. A tabela considera que cada porta de um veículo representa dois canais e que veículos comuns apresentam duas portas, enquanto veículos articulados apresentam três ou quatro portas. Algumas cidades, como Curitiba, por exemplo, utilizam veículos biarticulados que, por adequações da plataforma, nem sempre utilizam todos os canais do veículo disponíveis para embarque/desembarque.

**Tabela 3 – Número de passageiros embarcando/segundo/veículo (adaptado de Vuchic, 2001)**

<b>Veículo</b>	<b>Altura do veículo/ Altura da plataforma</b>	<b>Passageiros por segundo por canal</b>	<b>Canais por veículo</b>	<b>Passageiros por segundo por veículo</b>
Padrão	alto/baixa	0,4	4	1,7
Articulado	alto/baixa	0,5	6	3,0
Articulado	alto/alta	0,9	6	5,6
Articulado	baixo/baixa	0,9	6	5,6
Articulado	alto/alta	0,9	8	7,5
Articulado	baixo/baixa	0,9	8	7,5
Articulado*	alto/alta	1,2	6	7,1
Articulado*	alto/alta	1,2	8	9,5

(\*) esses casos utilizam taxas de embarque por canal semelhantes às encontradas no metrô.

### 2.3.2 Conforto

Apesar de o conforto ser um conceito subjetivo, o fator de carregamento dos veículos – ou seja, a relação entre a lotação máxima e a capacidade veicular utilizada no dimensionamento – é uma das principais *proxys* do conforto e é mais perceptível para os passageiros que estão em pé, pois quanto maior o fator de carregamento, menor a área disponível por passageiro. O desconforto de estar em pé é tão maior quanto mais longa for a viagem, pois estar em pé praticamente impede a pessoa de ser produtiva dentro do veículo (Kittelson & Associates, Inc et al, 2003). Quanto menor o fator de ocupação, maior o conforto do usuário, porém maior será a frota necessária para atender a mesma demanda. A variação no tamanho da frota tem efeito sobre a velocidade operacional e saturação das plataformas, além de envolver questões econômicas referentes à compra de veículos. O fator de carregamento dos veículos é um dos fatores avaliados no estudo. A literatura aponta para valores em torno de 0,8 para dimensionamento da operação (Wright e Hook, 2007). A eficiência operacional é a principal justificativa para realizar integrações com outros veículos ou outros modais. Muitos sistemas BRT operam em regime tronco-alimentado, porém as circunstâncias em que é feita a integração pode ser mais ou menos confortável ao usuário. A integração necessita apresentar benefícios aos passageiros além dos ofertados pelos serviços tradicionais porta-a-porta, como por exemplo: redução nos tempos totais de viagem, e aumento na frequência do serviço (Kittelson & Associates, Inc et al, 2003).

A presença de algumas facilidades dentro dos veículos e estações e a forma de condução podem amenizar e tornar mais confortável a viagem, por exemplo: a presença de ar-condicionado, que ameniza as temperaturas extremas decorrentes de algumas estações do ano. Na forma de condução, variações bruscas na aceleração e desaceleração são desconfortáveis já que podem causar desde desequilíbrios até quedas dentro do veículo (Kittelson & Associates, Inc et al, 2003).

### 2.3.3 Frequência

A frequência de serviços de transporte coletivo deve garantir uma oferta adequada para acomodar a demanda estimada ao longo de uma linha ao longo de determinado período de tempo. A frequência programada para uma linha considera três componentes: a demanda estimada no trecho calculado, o fator de carregamento e a capacidade do veículo. Baseado no carregamento máximo a ser transportado, a equação básica para a determinação da frequência de veículos em um dado período de tempo  $j$  ( $F_j$ ) é (Ceder, 2007):

$$F_j = \frac{P_{mj}}{\gamma_j * c} \quad (\text{Equação 3})$$

onde  $P_{mj}$  representa o carregamento máximo observado no trecho estimado para o período  $j$ ;  $c$  representa a capacidade do veículo; e  $\gamma_j$  é o fator de carregamento adotado para o período  $j$ .

### 2.3.4 Headway

O inverso da frequência representa o intervalo de tempo entre veículos sucessivos que é denominado *headway*. O tempo de espera pelo veículo depende do *headway* programado e da confiabilidade na operação do sistema (Osuna & Newell, 1972 apud Trompet et al., 2010):

$$\bar{W} = \frac{\bar{h}}{2} + \frac{Var(h)}{2\bar{h}} \quad (\text{Equação 4})$$

onde:  $\bar{W}$  representa o tempo médio de espera do passageiro,  $h$  representa o *headway* programado e  $Var(h)$  representa a variância do *headway*. Não conhecer o tempo de

espera gera a sensação de uma espera maior que a espera real. Por outro lado, saber o tempo de espera permite ao passageiro administrar o seu tempo da forma que achar mais produtiva. Já o tempo de viagem dentro do veículo é determinado a partir da velocidade operacional.

### 2.3.5 Confiabilidade operacional

O congestionamento viário reduz a confiabilidade dos modais sobre pneus, independente de serem automóveis, ônibus ou motocicletas. Embora trafegue, na maioria dos casos, em faixas segregadas do tráfego misto, ainda assim, o BRT tem sua confiabilidade operacional reduzida devido a interferências que pode enfrentar ao cruzar interseções e também nos trechos em que precisa compartilhar a via com o tráfego em geral. A confiabilidade de sistemas de transporte coletivo vem recebendo atenção das agências operadoras devido ao crescimento dos problemas com a credibilidade do sistema e a busca pela redução nos custos operacionais. A falta de confiabilidade em um sistema pode causar: falhas nas tabelas horárias, perdas de conexões e lotação irregular de veículos (Ceder, 2007). Em um estudo produzido no Reino Unido, a confiabilidade mostra-se duas vezes mais importante para o passageiro que a frequência do serviço de transporte (Balcombe, 2004). Do ponto de vista do usuário, a confiabilidade provém da não variabilidade das parcelas que compõem o tempo total de viagem (Ceder, 2007).

A confiabilidade operacional pode ser interpretada como a regularidade dos tempos de viagem e dos *headways* programados ao longo de todo o corredor (Janos and Furth, 2002). Além, disso é importante garantir a regularidade do serviço ao longo de seu trajeto. A irregularidade do *headway* reduz a confiabilidade do passageiro, pois este precisa antecipar suas viagens para garantir que não sofrerá atrasos. Além disso, a variabilidade dos *headways* está diretamente ligada ao tempo de espera dos passageiros, como mostra a equação 3. Entre as formas indicadas para aumentar a confiabilidade estão: o tratamento preferencial ao ônibus através de faixas exclusivas (Chen et al., 2009); a prioridade semafórica (Janos e Furth, 2002), ultrapassagem nas estações (Gardner et al., 1991) e um centro de controle online que ajude a manter a regularidade do serviço.

## 3 SIMULAÇÃO OPERACIONAL

Novos sistemas BRT são usualmente propostos com base em experiências já existentes e modificações tidas como adequadas para o contexto de implantação. No entanto, conceitos e idéias inovadoras, que se distanciam muito das existentes, são difíceis de avaliar e arriscadas para implantar tendo em vista os potenciais efeitos adversos sobre o próprio sistema BRT. Sem ferramentas adequadas, mesmo projetistas experientes têm dificuldade de convencer os tomadores de decisão de que as soluções propostas irão funcionar.

### 3.1 Descrição do EMBARQ BRT Simulator

O EMBARQ BRT Simulator é um modelo de simulação microscópica desenvolvido para representar realisticamente o desempenho de sistemas de BRT sob uma variedade de configurações (Pereira et al., 2010). O termo “microscópico” se refere ao fato de os veículos serem modelados individualmente, em contraste a modelos macroscópicos, em que o fluxo de tráfego é tratado como um contínuo. O software foi desenvolvido em linguagem C#, para Windows, utilizando tecnologias de programação modernas.

Na simulação, o tempo é discretizado em intervalos de 1 segundo. A cada intervalo de tempo, o programa atualiza a velocidade e a posição dos veículos na rede. Para tanto, o programa usa um conjunto de expressões matemáticas, denominado de “modelo de

deslocamento dos veículos”. O modelo de deslocamento leva em conta duas situações distintas de trânsito: fluxo livre e fluxo obstruído. A simulação do fluxo obstruído é realizada através de um modelo de *car-following*.

O modelo de *car-following* utilizado é o de Gipps (1981). A escolha deu-se pela sua larga utilização. Entre os modelos de simulação que utilizam a lógica desenvolvida por Gipps, encontram-se o pacote para simulação rodoviária do TRL denominado SISTM (Wilson, 2001), SIGSIM (Marsden et al., 2001) e DRACULA (Liu, 1994). Ainda, o modelo de Gipps já foi utilizado pela equipe no desenvolvimento de vários simuladores.

### 3.2 Calibração

O principal elemento do modelo de simulação que requer calibração é o de deslocamento de veículos. Esse modelo depende de quatro parâmetros principais: velocidade desejada ou de cruzeiro, aceleração máxima, desaceleração máxima, e a expectativa do veículo de trás com relação à desaceleração máxima do veículo da frente.

Com base em dados coletados com aparelhos de GPS (*Global Positioning System*) no sistema de Curitiba e um método de ajuste dos parâmetros de calibração, foi possível demonstrar a flexibilidade do modelo de deslocamento de representar com boa precisão o deslocamento de veículos em diversas condições de carregamento e greide (Pereira et al., 2010). Além disso, um experimento controlado foi feito em um corredor Assis Brasil, em Porto Alegre, para determinar a curva de aceleração dos veículos.

## 4 DESEMPENHO DO BRT EM FUNÇÃO DE ELEMENTOS DE PROJETO

Este estudo enfoca o efeito da interação de elementos no desempenho de sistemas BRT. Como elementos variáveis têm-se: a distância entre estações, o número de passageiros embarcando no veículo por segundo, o fator de ocupação dos veículos, o número de baias na plataforma, a posição dos semáforos em relação à estação e a demanda. Têm-se como os elementos fixos: o tamanho (capacidade) dos veículos, a aceleração e a desaceleração, a velocidade máxima no corredor, o tempo de ciclo dos semáforos. Há ainda elementos que tem seus valores determinados em função de outros. Entre eles estão: o headway e o número de embarques por estação. Dos três indicadores de desempenho descritos neste estudo a velocidade operacional do sistema será utilizada como medida desempenho do BRT em todos os cenários propostos.

### 4.1 ELEMENTOS DE ESTUDO

#### 4.1.1 Elementos fixos

A operação de sistemas BRT no mundo se dá com veículos distintos. Eles podem ser do tipo convencional, articulado ou biarticulado. A capacidade de cada veículo varia de acordo com o seu comprimento e layout interno (distribuição de assentos, localização de porta, etc.). São referenciadas as seguintes faixas de capacidade veicular: veículo convencional: entre 70 e 80 passageiros; veículo articulado: entre 130 e 170 passageiros; e veículo biarticulado: entre 240 e 250 passageiros (Wright e Hook, 2007). Este estudo utiliza como base veículos articulados com capacidade para 170 passageiros, pois a literatura indica esta configuração como a mais recorrente.

A simulação requer que a velocidade máxima que um BRT possa desenvolver em fluxo livre seja arbitrada. Este estudo adota uma velocidade máxima de 60 km/h para o corredor, de acordo com o Código Brasileiro de Trânsito (Brasil, 1997).

A aceleração e a desacelerações dos ônibus dependem de características mecânicas dos veículos, da dirigibilidade do condutor, do carregamento do veículo (Wright e Hook, 2007). Tanto a aceleração e a desaceleração dos veículos são parâmetros de

entrada para a simulação. A calibração com dados de Curitiba e da Avenida Assis Brasil, em Porto Alegre apontou que a aceleração de veículos articulados é da ordem de  $1,0 \text{ m/s}^2$  (Pereira et al., 2010). A desaceleração dos veículos foi estimada como sendo o dobro da aceleração. Em todos os cenários a extensão do trecho simulado é de 10 km.

#### 4.1.2 Elementos dependentes

Para estimar a quantidade de embarques e desembarques por estação, foi criado um cenário para a distribuição de demanda ao longo do corredor que leva em conta a distância entre estações (Castilho, 1997). Neste estudo foi criado um cenário hipotético onde são representadas viagens entre terminais e estações intermediárias que representam a origem e destino dos passageiros, sendo o maior volume de passageiros observados nos terminais. Foram avaliadas apenas as viagens que ocorrem em um sentido.

Para uma determinada demanda, o estudo assume uma variação na distribuição dos embarques e desembarques nas estações de acordo com a distância entre estações. A figura 1 apresenta a distribuição da densidade de demanda por metro de corredor. Na figura a área dos dois trapézios sobre cada estação corresponde aos embarques e desembarques, em passageiros por hora, em cada estação. Considera-se nos ensaios deste estudo três níveis de demanda para o corredor: 8.000, 12.000 e 15.000 passageiros/hora/sentido no trecho crítico. A chegada dos passageiros na estação não é constante, esta ocorre de forma aleatória de acordo com uma distribuição de Poisson.

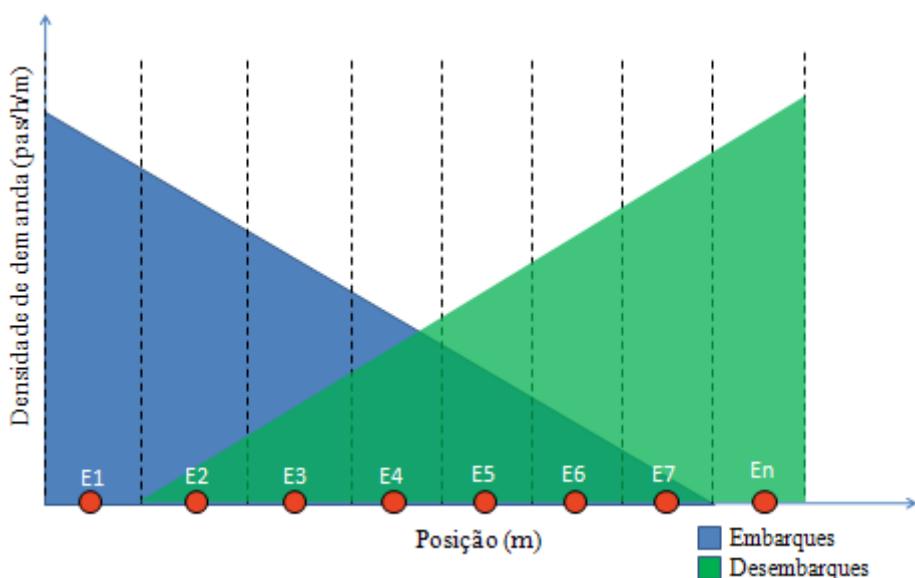


Figura 1 – Distribuição da densidade de demanda

Para cada um dos cenários o headway de operação de sistemas de ônibus é função da capacidade do veículo, da demanda a ser transportada no trecho crítico e do fator de carregamento utilizado no dimensionamento, estando estes dois últimos entre os elementos de estudo. Embora difícil de ser mantido em campo, este estudo considera o valor do headway constante para os despachos, conforme determinado pelo dimensionamento para atender a demanda. Porém perturbações inerentes aos sistemas simulados fazem com que o headway varie ao longo da linha e ao longo do tempo.

#### 4.1.3 Elementos variáveis

Este estudo selecionou seis variáveis de estudo: a distância entre estações (D), a taxa de passageiros embarcando no veículo por segundo ( $T_x$ ), o fator de ocupação dos

veículos (FO), o número de baias na plataforma (NB), a posição dos semáforos em relação à estação (PS) e a demanda (Dem).

A figura 2 apresenta um exemplo da configuração física de um dos cenários estudados. É possível observar na figura o sentido de deslocamento dos veículos, a forma como é medida a distância entre estações, a posição do semáforo em relação à estação, neste exemplo após a estação, e o número de baias do ensaio, com disponibilidade para 2 veículos (representados pelas barras em vermelho).

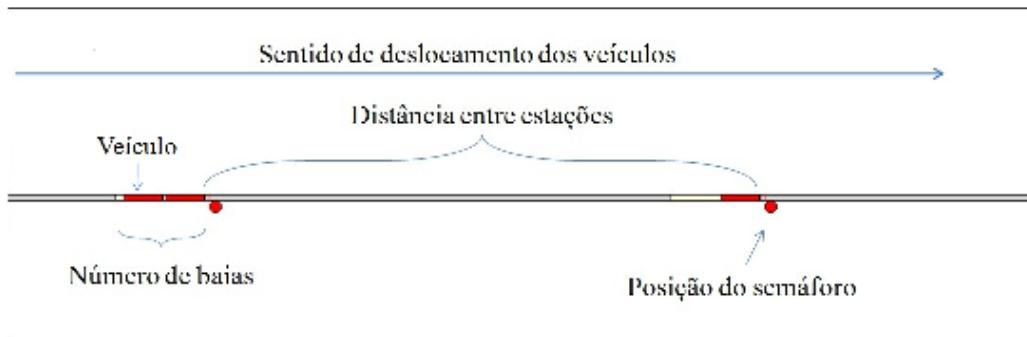


Figura 2 – Exemplo da configuração física dos cenários.

Com base na literatura foram identificados os níveis de variação dos elementos que melhor representam as opções projetos disponíveis para sistemas BRT. A combinação de elementos e níveis de variação resultaram em 324 cenários para análise. Todos os cenários consideram 3 horas como tempo de simulação e uma injeção constante de veículos. Para que a fase preenchimento (*warm-up*) do sistema não afete os resultados da simulação, após a primeira hora as estatísticas são zeradas e, então, começam a ser coletadas novamente.

A tabela 4 apresenta os elementos e os valores adotados para cada um dos níveis. Por ser uma variável qualitativa, a posição dos semáforos em relação à estação foi incluída ao estudo utilizando o recurso das variáveis dummy.

Tabela 4 – Elementos e níveis estudados

Distância entre estações [m]	Taxa de embarques [pax/s/veic]	Fator de ocupação [%]	Número de baias	Posição do semáforo	Demanda [pax/h/sentido]
250	2	60%	2	antes da estação (-1)	8000
500	5	80%	3	depois da estação (1)	12000
750	8	100%			15000
Níveis	3	3	2	2	3

## 5 RESULTADOS

Este artigo propõe análises qualitativas e quantitativas dos cenários elaborados. Nas análises qualitativas são feitas observações sobre os valores de velocidade operacional encontrados para cada cenário. Parte da análise qualitativa foi feita com base na animação do software, capaz de representar as filas de veículos no corredor e de passageiros nas estações, indicando problemas de operação do sistema. São feitas ainda análises sobre os efeitos dos elementos na velocidade. Para as análises quantitativas,

busca-se estimar um modelo que explique o comportamento da velocidade operacional, com base nos elementos usados no estudo.

### 5.1 Análise qualitativa

A partir dos cenários desenvolvidos é possível fazer observações qualitativas sobre o efeito dos elementos estudados no desempenho do BRT. As figuras 3, 4 e 5 representam, respectivamente, os cenários que avaliam o impacto das demandas de 8.000, 12.000 e 15.000 passageiros/hora/sentido no trecho crítico. A figura 6 permite uma visão geral de todos os cenários estudados.

Os cenários que apresentam 8.000 passageiros/hora/sentido na seção crítica (8k) apresentam menor dispersão entre os valores de velocidade. A estabilidade dos valores de velocidade sugere que o sistema não atingiu a sua capacidade; exceto por alguns poucos cenários que apresentaram valores de velocidade fora do esperado. Através da análise dos resultados dos cenários cuja síntese encontra-se na figura 3:

- a) nota-se que não há diferença de patamar de velocidade quando se aumenta a distância entre estações de 250 para 500 metros, é observado um ganho de velocidade de cerca de 5 km/h quando a distância passa de 500 para 750 metros;
- b) para os cenários em que a distância entre estações é de 250 metros ( $D = 250$  metros) e taxa de embarque/desembarque é de 2 passageiros/segundo ( $Tx = 2$ ), a velocidade apresenta uma pequena dispersão, o que representa queda na velocidade e sugere a formação de pequenas filas em certos pontos da rota.
- c) observando-se a posição dos semáforos, nos cenários onde  $D = 250$  metros e  $Tx = 2$  o semáforo localizado antes das estações reduz a velocidade; enquanto nos cenários onde  $D = 750$  metros observam-se efeitos contrários: o semáforo localizado após a estação reduz a velocidade.
- d) os cenários 74, 86 e 98 destacam-se com pontos incomuns, pois apresentam valores de velocidade operacional aquém dos demais valores apresentados à  $D = 750$  metros. Apresentam-se como fatores comuns a estes cenários número de baias de parada igual a 2, semáforo localizado após a estação e fator de ocupação do veículo igual a 0,6.

Os cenários que avaliam um nível de demanda intermediário, de 12.000 passageiros/hora/sentido (12k), apresentam maior dispersão que os cenários com 8k. Nota-se este efeito principalmente nos cenários onde  $Tx = 2$  para  $D = 250$  metros e  $D = 500$  metros. Para  $D = 750$  metros a dispersão ocorre em todos os níveis de  $Tx$ ; a dispersão nestes cenários sugere que o sistema pode ter atingido a capacidade. Da análise dos cenários:

- a) não há diferença de patamar de velocidade quando a distância entre estações aumenta de 250 para 500 metros. Apesar da dispersão dos valores de velocidade quando  $D = 750$  metros, é percebido um patamar mais elevado de velocidade, que apesar da dispersão parece tender a 20 km/h.
- b) nos cenários em que a  $Tx = 2$  e a distância entre estações é  $D = 250$  metros e  $D = 500$  metros, nota-se certa dispersão nos pontos que representam a velocidade, sendo mais perceptível para  $D = 250$  metros. A dispersão observada nestes trechos para o nível de demanda 12k é maior que a observada para 8k; além da queda na velocidade, a dispersão mais acentuada sugere a formação de filas mais longas ou de mais duração em alguns pontos da rota. Para  $D = 750$  metros, a dispersão ocorre em todos os níveis de  $Tx$ .
- c) observando-se a posição dos semáforos, nos cenários onde  $D = 250$  metros e  $Tx = 2$  o semáforo localizado antes das estações reduz a velocidade; enquanto nos

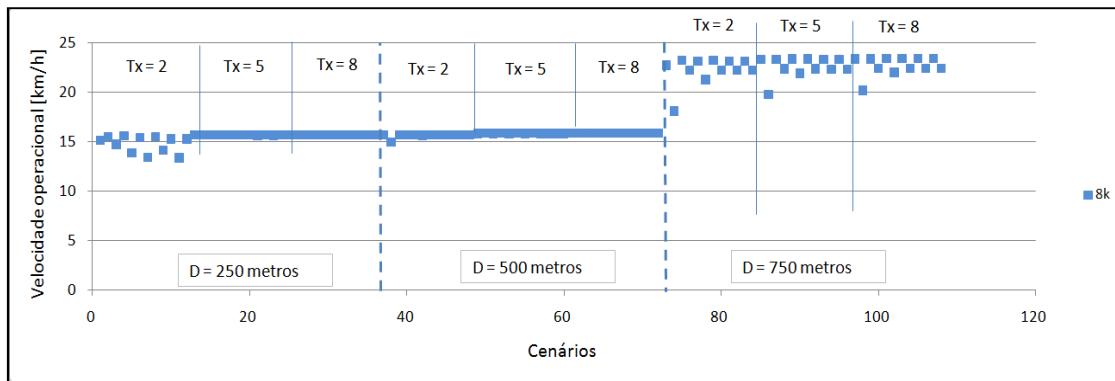


Figura 3 – Resultados dos cenários baseados na demanda de 8.000 passageiros/hora/sentido

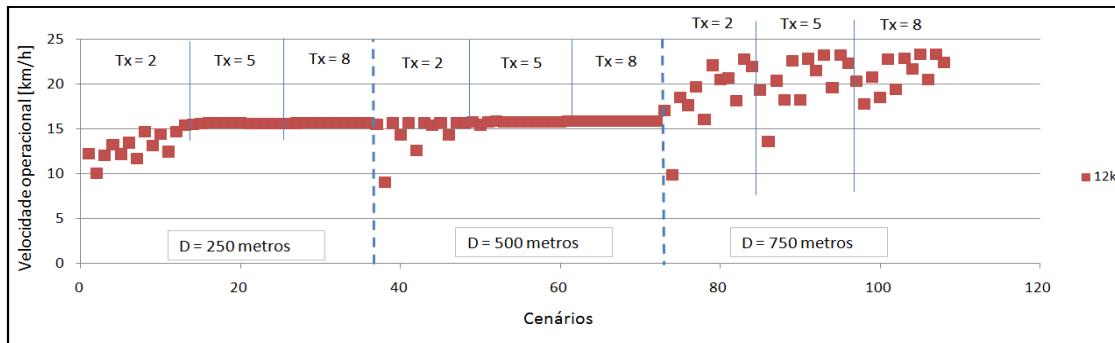


Figura 4 – Resultados dos cenários baseados na demanda de 12.000 passageiros/hora/sentido

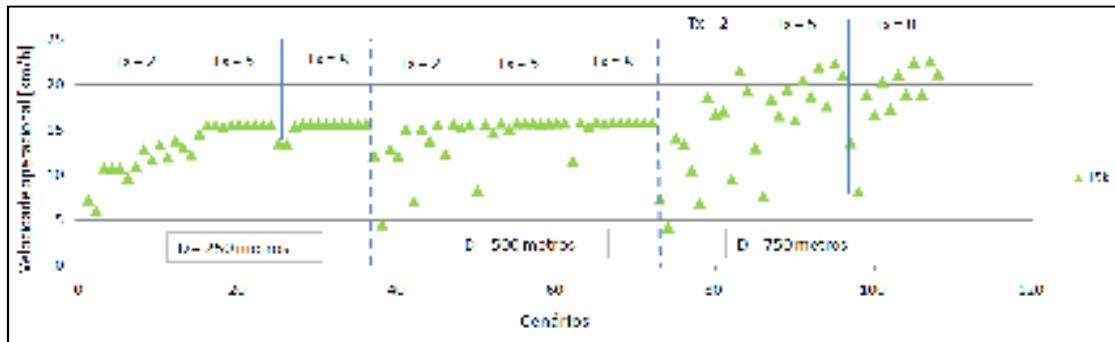


Figura 5 – Resultados dos cenários baseados na demanda de 15.000 passageiros/hora/sentido

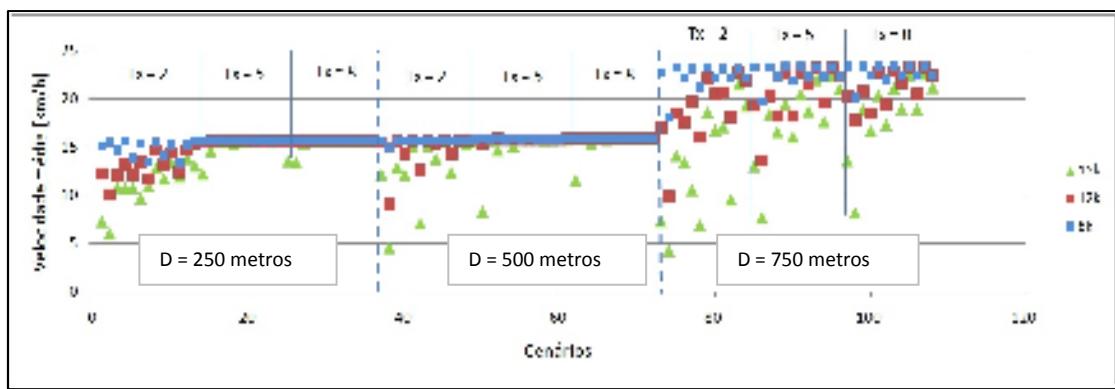


Figura 6 – Resultados dos cenários baseados em todas na demanda avaliadas

cenários onde  $D = 500$  metros e  $D = 750$  metros observam-se efeitos contrários: o semáforo localizado após a estação reduz a velocidade.

- e) Os cenários 38, no trecho onde  $D = 500$  metros, e 74 e 86, onde  $D = 750$  metros, mostra-se valores de velocidade muito abaixo dos demais, mesmo considerando dispersão dos valores de velocidade. Entre os fatores comuns a estes cenários estão: número de baias de parada igual a 2, semáforo localizado após a estação e fator de ocupação do veículo igual a 0,6.

Os cenários que representam o nível máximo de demanda avaliado neste estudo, 15.000 passageiros/hora/sentido (15k), também apresentam a maior dispersão entre os níveis de demanda avaliados. Ao contrário dos outros níveis de demanda, para os cenários de 15k, poucos são os trechos em que se observa uma tendência de estabilidade da velocidade. Ainda, são vários os cenários que resultaram em velocidades operacionais da ordem de 5 km/h, o que indica a dificuldade em atender a demanda dentro de padrões estáveis de desempenho. Ou seja, vários cenários são marcados pela formação de filas frequentes. Há fortes indícios que o sistema BRT simulado atinge sua capacidade quando a demanda no trecho crítico atinge patamares da ordem de 15.000 passageiros/h/sentido. Este cenário mostra-se mais sobrecarregado e muito próximo da capacidade de atendimento do corredor, pois facilmente tem problemas de queda na velocidade operacional, o que sugere a formação frequente de filas. Da análise dos cenários:

- a) assim como nos níveis anteriores de demanda, não há diferença de patamar de velocidade quando a distância entre estações aumenta de 250 para 500 metros. Mesmo com uma dispersão maior nos valores de velocidade de forma geral, e em especial quando  $D = 750$  metros, nesta distância entre estações a velocidade operacional atinge um patamar médio mais elevado em relação aos outros dois níveis de distância entre estações, chegando à faixa dos 20 km/h.
- b) os pontos estáveis de velocidade têm em comum  $T_x = 5$  e  $T_x = 8$  para  $D = 250$  metros e  $D = 500$  metros. Nos cenários em que a  $T_x = 2$ , independente da distância entre estações, os valores de velocidade encontram-se dispersos. Quando se observa o nível de  $D = 750$  metros, nota-se que os valores de velocidade apresentam a maior dispersão entre todos os níveis de demanda e distância entre estações. A dispersão observada mostra que alguns pontos resultam de fortes quedas na velocidade e apresentam valores menores que os do nível  $D = 500$  metros, o que de certa forma é um resultado inesperado.
- c) como nos níveis de demanda anteriores, não fica claro a interferência da posição do semáforo para a redução da velocidade. Em alguns casos onde  $D = 250$  metros e  $T_x = 2$ , o semáforo localizado antes das estações reduz a velocidade, porém em outros o semáforo localizado após a estação é responsável por reduzir a velocidade. Já nos cenários onde  $D = 500$  metros e  $D = 750$  metros os efeitos são os mesmos observados nos outros níveis de demanda: o semáforo localizado após a estação causa uma redução na velocidade operacional.
- d) como efeito da maior dispersão, mais pontos mostram-se fora de uma tendência. Considerando os três valores mais baixos de velocidade, têm-se os cenários 2, onde  $D = 250$ , 38, onde  $D = 500$  metros e 74, onde  $D = 750$  metros. São fatores comuns a estes cenários a taxa de embarque/desembarque igual a 2, numero de baias de parada igual a 2 e semáforo localizado após a estação. A dispersão e os baixos valores de velocidades observados sugerem que muito possivelmente os valores de velocidade cairiam ainda mais caso a simulação durasse mais tempo, levando a estagnação do sistema.

De maneira geral os cenários desenvolvidos evidenciam o efeito do aumento de demanda sobre o desempenho do sistema BRT simulado. Percebe-se que com o aumento da demanda começam a ocorrer instabilidades nos valores observados para a velocidade operacional. Por exemplo, para  $D = 750$  metros e  $Dem = 15k$ , os valores de velocidade operacional apresentam grande variabilidade, aparentemente não há estabilização. Este resultado indica que  $Dem = 15k$  pode ser o limite para situação hipotética avaliada neste estudo.

Para todos os níveis de distância entre estações e demanda, a taxa de embarque e desembarque igual a 2 apresentou influência negativa na estabilidade dos valores de velocidade operacional. Sendo que quanto maior a demanda e maior a distância entre estações, mais perceptível é este efeito.

A presença de semáforos a cada 250 metros em todos os cenários deve ter contribuído para que o patamar de velocidades não variasse entre cenários com  $D = 250$  e  $D = 500$  metros. Com  $D = 750$  metros o efeitos dos semáforos pode ter sido reduzido, assim permitindo um aumento na velocidade, mas ainda assim, pode ter camuflado ganhos potenciais de velocidade operacional. Os resultados deste estudo não apontam clareza para a relação entre a posição dos semáforos e a velocidade operacional. É possível que outros elementos relacionados aos semáforos tenham maior importância para o aumento de velocidade, como, por exemplo: a coordenação semafórica (onda-verde).

Entre todos os cenários ensaiados, o de número 74 destaca-se por apresentar valores de velocidade operacional abaixo dos demais cenários. Para demandas na faixa de 8k, a velocidade deste cenário sofre uma pequena perturbação, porém para valores de 12k e 15k, a queda na velocidade operacional é acentuada. Este cenário apresenta como elementos comuns: distância entre estações igual 750 metros, taxa de embarque e desembarque igual a 2, fator de ocupação dos veículos igual a 0,6, número de baias igual 2 e semáforos localizados após a estação. Para uma mesma demanda, a maior distância entre estações resulta na maior concentração de passageiros que, combinada à taxa de embarque e desembarque baixa, faz com que os veículos permaneçam por mais tempo na estação. O baixo fator de carregamento dos veículos faz com que se tenham mais veículos para atender a mesma demanda. Esta combinação, aliada ao menor número de baias, alimenta filas de veículos nas estações, reduzindo a velocidade operacional do sistema.

Ainda, não é apresentado neste artigo, mas foi observado no estudo, que durante os ensaios dos cenários com fatores de ocupação igual a 1, foram observadas filas de passageiros nas estações, independentemente dos patamares de demanda simulados e da distância entre estações. Mesmo com o dimensionamento correto para freqüência necessária para atender a demanda, com um fator de ocupação igual 1, tem-se menos veículos circulando no corredor, fator que combinado a chegada aleatória dos passageiros à estação, possibilita maiores filas de passageiros nas estações.

## 5.2 Análise quantitativa

A partir dos elementos usados para construção dos cenários e dos valores de velocidade operacional obtidos, utilizou-se da técnica de regressão linear múltipla para estimar modelos que representem satisfatoriamente o desempenho do BRT. Foi utilizado o software de análise estatística STATA (Stata Corp., 2010) para a criação dos modelos. Durante a elaboração dos modelos foram considerados como variáveis explicativas todos os seis elementos em estudo que podem influenciar a velocidade do sistema BRT. Para a obtenção dos modelos mais adequados para explicar o fenômeno

em estudo, as variáveis não significativamente explicativas do ponto de vista estatístico foram retiradas uma a uma. A análise de significância embasou-se no coeficiente de Pearson, onde o p-value das variáveis significativas deve ser igual ou menor do que 0,05, para um nível de significância de 5% (que equivale à confiança estatística de 95%).

Antes de iniciar a construção dos modelos foi construída a matriz de correlação entre a variável de resposta (velocidade operacional) e as variáveis explicativas (elementos de projeto), conforme apresentado na Tabela 5. Nesta tabela observa-se que a variável com maior correlação com a velocidade é a distância entre as estações (0.5696), indicando que quanto maior a distância entre as estações maior a velocidade operacional.

Tabela 5 - Matriz de correlação entre a variável de resposta e as variáveis explicativas

	Velocidade operacional	Distância entre estações	Taxa de embarques	Fator de ocupação	Número de baias	Posição do semáforo	Demanda
Velocidade operacional	1						
Distância entre estações	0.5696	1					
Taxa de embarques	0.2520	0	1				
Fator de ocupação	0.2203	-1.3158E-18	-1.713E-18	1			
Número de baias	0.1714	0	0	0	1		
Posição do semáforo	-0.1353	0	0	0	0	1	
Demanda	-0.3359	7.1937E-18	-1.092E-17	8.781E-18	0	0	1

O primeiro modelo estimado considerou apenas as variáveis explicativas de forma isolada, sem considerar as interações entre elas. Esse modelo demonstrou que todos os seis elementos considerados: distância entre estações, taxa de embarque e desembarque, fator de ocupação dos veículos, número de baias por plataformas, posição do semáforo em relação à estação e demanda, são estatisticamente significativas para explicar a variação da velocidade operacional do sistema BRT. A equação 5 apresenta o modelo obtido por regressão linear múltipla utilizando elementos isolados.

$$\text{Velocidade operacional} = 0,0102 * D + 0,3770 * Tx + 4,945 * FO + 1,257 * NB - 0,4960 * PS - 0,429 * Dem \quad (\text{equação 5})$$

Onde,

D = distância entre estações [m];

Tx = taxa de embarque/desembarque [passageiros/s]

FO = fator de ocupação dos veículos [decimal]

NB = número de baias na plataforma [unid]

PS = posição dos semáforos em relação à estação [antes = -1 e depois = 1]

Dem = número de passageiros esperados na seção crítica por hora por sentido [x 1000]

O modelo apresenta a distância entre estações como elemento mais significativo para explicar a variação da velocidade operacional. Ainda, apresenta coeficientes coerentes como esperado pela literatura. A análise do ajuste do modelo da equação 5 foi feita

através do coeficiente de determinação e do gráfico de resíduos. No modelo da equação 5, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) obtido foi de 0,59, indicando que 59% da variação da velocidade operacional é explicada pelos elementos incluídos no modelo. O gráfico de resíduos, figura 7, apresentou grande dispersão em torno da reta, principalmente para velocidades inferiores a 10 km/h, indicando que esse modelo não é apropriado para situações onde resultam valores baixos de velocidade operacional, casos onde o sistema BRT simulado atinge a capacidade.

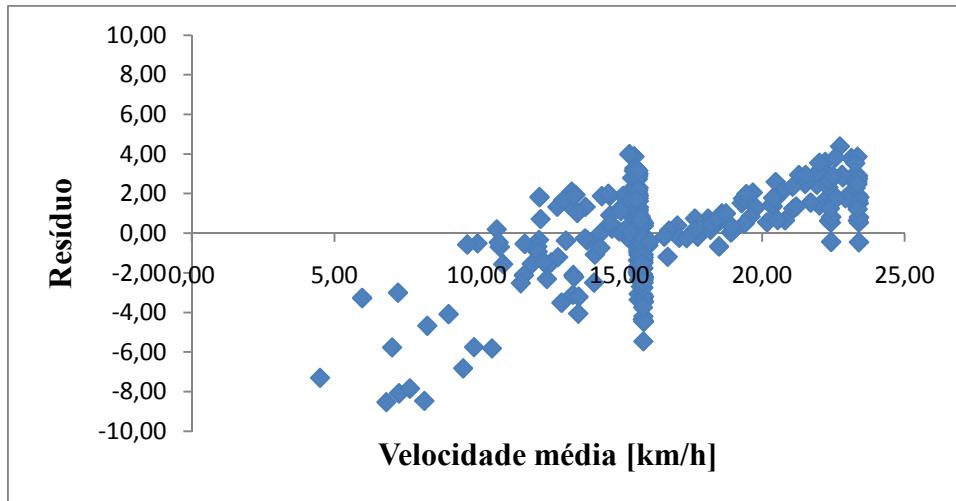


Figura 7 – Gráfico de resíduos gerados pelo modelo obtido por regressão linear múltipla utilizando elementos isolados

Buscando obter um modelo mais robusto e que representasse melhor o desempenho do BRT, foram feitos alguns testes utilizando a interação entre as variáveis explicativas (elementos), de forma a entender se a interação entre elas também influencia a velocidade operacional do sistema BRT. Criaram-se combinações através da multiplicação das variáveis em diferentes níveis; pela multiplicação de dois, três ou todos os elementos. Observou-se que os modelos com variáveis combinadas representam melhor o comportamento da velocidade operacional. A tabela 5 apresenta os valores dos coeficientes deste novo modelo e os dados estatísticos que dizem respeito à significância do modelo. A equação 6 apresenta o melhor modelo estimado para variáveis combinadas em 2 e 3 níveis.

$$\begin{aligned}
 \text{Velocidade operacional} = & 0,0246 * D - 2,872 * Tx - 10,505 * FO - 5,170 * \\
 & NB - 2,402 * Dem + 0,002 * D * Tx - 0,004 * D * Dem + 0,910 * Tx * NB + \\
 & 0,372 * Tx * PS + 0,289 * Tx * Dem + 0,815 * FO * PS + 1,758 * FO * Dem + \\
 & 0,583 * NB * Dem - 0,286 * PS * Dem - 0,0008 * D * Tx * NB + 0,0014 * D * FO * \\
 & Dem + 0,0007 * D * NB * Dem - 0,0002 * D * PS * Dem - 0,0506 * Tx * FO * \\
 & Dem - 0,1411 * Tx * NB * PS - 0,0657 * Tx * NB * Dem - 0,3514 * FO * NB * \\
 & Dem + 0,1190 * NB * PS * Dem + 33,5480
 \end{aligned} \quad (\text{equação 6})$$

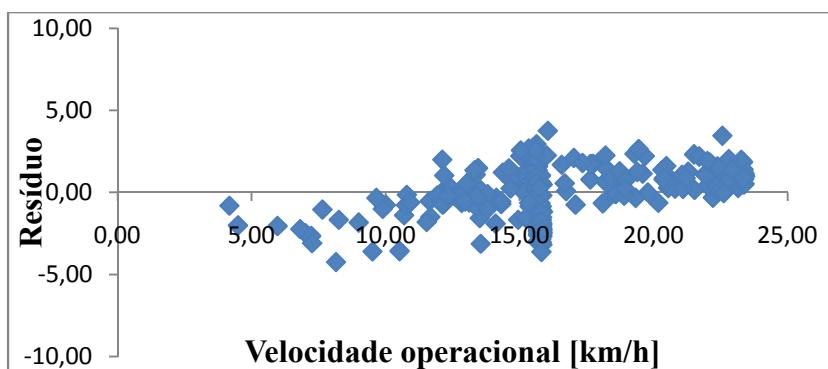
O modelo combinado em três níveis apresenta o maior coeficiente de determinação,  $R^2$  igual a 0,82, e, entre todos os modelos gerados, é o que apresenta menor dispersão dos pontos em relação à reta no gráfico de resíduos, como apresentado na figura 8.

Devido à combinação das variáveis, estas se apresentam significativamente correlacionadas na geração do modelo, o que resulta em problemas de multicolineariedade nos modelos. A principal consequência deste problema está relacionada à estimativa imprecisa dos coeficientes de variáveis com forte correlação.

Dessa forma, não é possível estabelecer conclusões acerca da relação entre uma variável correlacionada e o fenômeno em estudo, impossibilitando, então determinar através dos coeficientes do modelo se uma dessas variáveis exerce maior poder explicativo do que a outra, ou mesmo se a relação da variável com o desempenho do BRT é positiva ou negativa.

**Tabela 5 – Dados estatísticos do modelo combinado em três níveis.**

V	Coef.	Std. Err	t	P> t	[95% Conf. Interval]
a	0,0246260	0,0020421	12,0600000	0,0000000	0,0206073 0,0286447
b	-2,8719370	0,8821266	-3,2600000	0,0010000	-4,6078760 -1,1359970
c	-10,5048800	2,2947830	-4,5800000	0,0000000	-15,0207900 -5,9889720
d	-5,1696010	1,7035750	-3,0300000	0,0030000	-8,5220710 -1,8171300
f	-2,4017120	0,4913042	-4,8900000	0,0000000	-3,3685510 -1,4348720
ab	0,0019849	0,0008237	2,4100000	0,0170000	0,0003639 0,0036059
af	-0,0041387	0,0004406	-9,3900000	0,0000000	-0,0050057 -0,0032716
bd	0,9099368	0,3456572	2,6300000	0,0090000	0,2297171 1,5901570
be	0,3721053	0,1677792	2,2200000	0,0270000	0,0419321 0,7022784
bf	0,2893616	0,0666166	4,3400000	0,0000000	0,1582666 0,4204566
ce	0,8152443	0,3775144	2,1600000	0,0320000	0,0723326 1,5581560
cf	1,7579390	0,3310246	5,3100000	0,0000000	1,1065140 2,4093630
df	0,5831451	0,1760187	3,3100000	0,0010000	0,2367574 0,9295328
ef	-0,2861958	0,0820914	-3,4900000	0,0010000	-0,4477437 -0,1246479
abd	-0,0008039	0,0003216	-2,5000000	0,0130000	-0,0014369 -0,0001710
acf	0,0013957	0,0002233	6,2500000	0,0000000	0,0009562 0,0018353
adf	0,0007194	0,0001491	4,8300000	0,0000000	0,0004261 0,0010127
aef	-0,0002338	0,0000365	-6,4100000	0,0000000	-0,0003055 -0,0001620
bcf	-0,0506155	0,0186120	-2,7200000	0,0070000	-0,0872422 -0,0139888
bde	-0,1411202	0,0656513	-2,1500000	0,0320000	-0,2703156 -0,0119248
bdf	-0,0657216	0,0254681	-2,5800000	0,0100000	-0,1158405 -0,0156028
cdf	-0,3513957	0,0911800	-3,8500000	0,0000000	-0,5308292 -0,1719623
def	0,1189907	0,0304257	3,9100000	0,0000000	0,0591159 0,1788656
Constante	33,5480100	4,8246150	6,9500000	0,0000000	24,0536300 43,0423800



**Figura 8 – Gráfico de resíduos gerados pelo modelo obtido por regressão linear múltipla utilizando elementos combinados**

Em modelos combinados é importante não tentar entender sinais nem valores dos coeficientes das combinações das variáveis. Mas duas condições precisam ser

satisfeitas. A primeira condição é que as variáveis correlacionadas tenham sido estimadas corretamente, ou seja, a correlação realmente exista. A segunda é que o padrão de correlação entre as variáveis prevaleça em qualquer situação, independente da amostra avaliada (Kennedy, 1985 apud Baltes e Chu, 2002). Como no caso deste estudo a correlação deriva da multiplicação de variáveis esta condição está plenamente satisfeita. Ainda, no caso de modelos estimados a partir de combinações de variáveis, para determinar as variáveis de maior influência na velocidade operacional é preciso fazer análises de sensibilidade.

Na primeira análise de sensibilidade foi avaliada a influência da distância das estações e da posição do semáforo na velocidade, mantendo os valores de todas as outras variáveis fixas. No gráfico da Figura 9, observa-se que quanto maior a distância entre as estações maior é a velocidade operacional. Porém o posicionamento dos semáforos antes das estações propicia um melhor desempenho do sistema quando as estações estão mais espaçadas. Quando a distância entre estações é de 200 metros, não há diferença significativa entre as velocidades médias, mas a partir de um espaçamento entre estações superior a 400 metros a inserção de semáforos antes das estações resulta em velocidades médias mais elevadas.

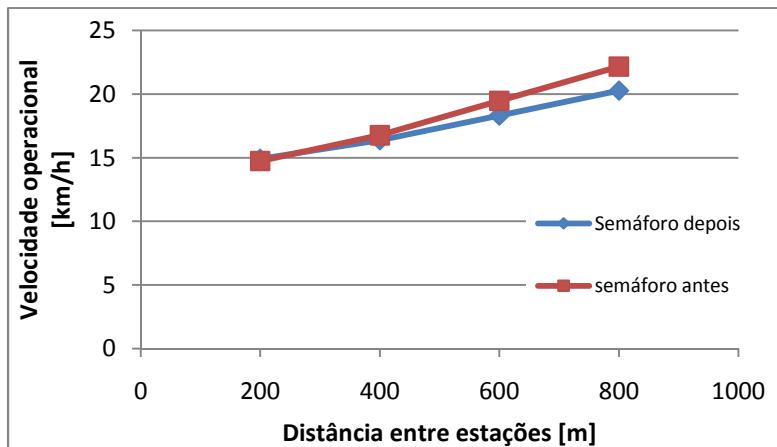


Figura 9 - Análise da influência da distância das estações e da posição do semáforo na velocidade operacional segundo o modelo combinado.

Em uma segunda análise de sensibilidade foi feita a avaliação da influência da distância entre estações e da demanda no desempenho do sistema. Assim como na análise anterior, a velocidade operacional aumenta com o aumento da distância entre estações e esse efeito, apresentado na figura 10, é mais pronunciado para a menor faixa de demanda testada, 8.000 passageiros/hora/sentido. Para a demanda de 15.000 passageiros/hora/sentido verifica-se pouco efeito sobre a velocidade operacional de um maior espaçamento entre as estações, isso porque com esse carregamento o sistema BRT testado opera próximo à capacidade.

As demais análises de sensibilidade mostraram que a variação dos elementos: taxa de embarque e desembarque, fator de ocupação dos veículos e número de baias na plataforma tem baixo impacto na velocidade quando relacionados com a distância entre estações.

Nas análises de sensibilidade observa-se que a distância entre estações é o elemento que mais impacta a velocidade operacional. Em todos os casos, o aumento da distância entre estações apresentou efeito positivo no aumento da velocidade operacional, conforme já observado no modelo da equação 4.

Percebe-se que elementos combinados à distância entre estações podem potencializar os ganhos de velocidade operacional. Na prática este resultado representa que, mesmo que não haja possibilidade de variar a distância entre estações, é possível se obter ganhos de velocidade operacional através da combinação desta com outros elementos. Caso a variação da distância entre estações ainda seja uma opção possível de variar no projeto, os efeitos na velocidade operacional podem ser ainda mais positivos quando combinados com outros elementos de projeto.

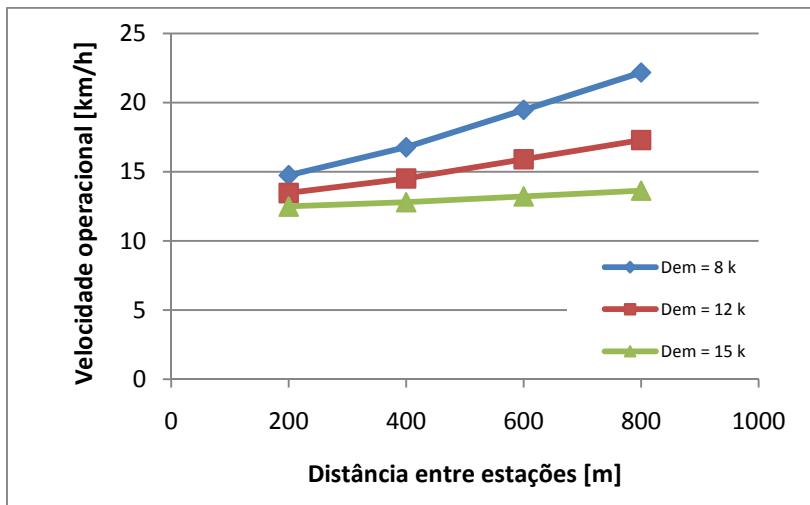


Figura 10 – Análise da influência da distância das estações e da demanda na velocidade operacional segundo o modelo combinado.

Além da distância entre estações, a demanda no trecho crítico se mostrou um elemento de projeto com forte impacto na velocidade operacional. Quanto à localização dos semáforos em relação às estações, os localizados antes das estações resultaram em velocidades operacionais mais elevadas particularmente nos cenários marcados por um maior espaçamento entre estações.

### 5.3 Comparação entre os modelos simples e combinado

Esta seção compara os resultados obtidos através da aplicação dos modelos simples e combinado. Ambos os modelos apresentam significância estatística para explicar o desempenho do sistema BRT ensaiado, sendo o modelo combinado mais robusto. Considerando que todos os elementos sejam mantidos em um valor fixo e apenas a distância entre estações e a demanda sejam variadas, notam-se algumas diferenças nos resultados apresentados. No modelo simples a velocidade operacional cresce de forma proporcional ao aumento da distância entre estações, independente do nível de demanda. Já o modelo combinado mostra que para distâncias maiores, a demanda tem maior efeito na velocidade operacional. As figuras 11 e 12 representam, respectivamente, apresenta a análise da influência da distância das estações e da demanda na velocidade operacional segundo o modelo simples e combinado.

O efeito da posição dos semáforos apresenta uma diferença interessante quando comparados os modelos simples e combinado. Ambos os modelos apontam que o semáforo antes da estação tem efeito positivo sobre o desempenho do sistema, porém no modelo simples as curvas que representam o desempenho são paralelas, indicando ganhos de velocidade operacional proporcionais em todos os níveis de distância entre estações. No modelo combinado as curvas que representam o desempenho estão praticamente sobrepostas quando a distância entre estações é baixa. Com o aumento da distância entre estações, as curvas começam a se distanciar, indicando que a baixas

distância a posição do semáforo em relação à estação tem pouco ou nenhum efeito na velocidade operacional, enquanto a velocidades maiores, este efeitos passa a ser percebido. As figuras 13 e 14 representam a análise da influência da distância das estações e da posição do semáforo na velocidade operacional segundo os modelos simples e combinados, respectivamente.

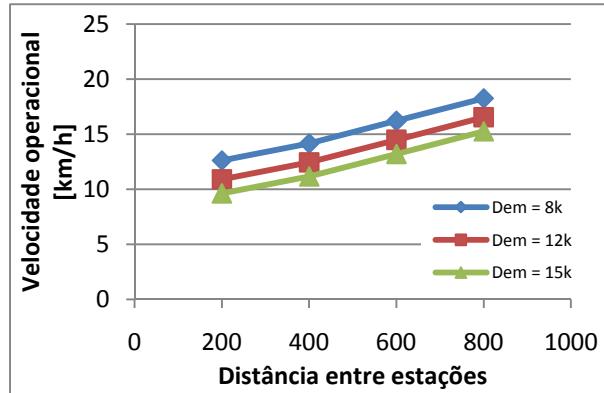


Figura 11 - Análise da influência da distância das estações e da demanda na velocidade média segundo o modelo simples.

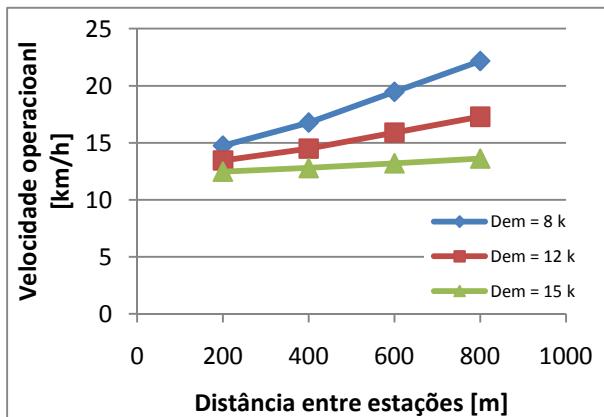


Figura 12 - Análise da influência da distância das estações e da demanda na velocidade operacional segundo o modelo combinado.

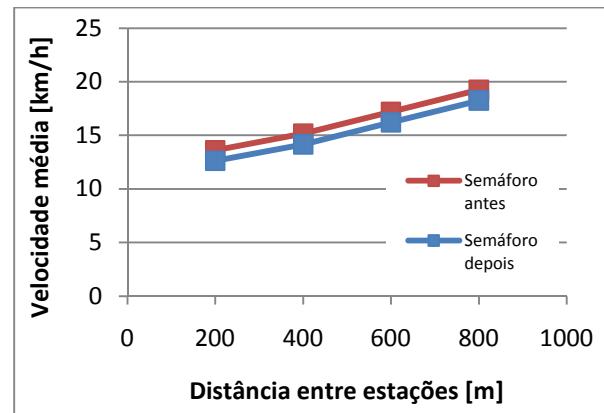


Figura 13 - Análise da influência da distância das estações e da posição do semáforo na velocidade operacional segundo o modelo simples.

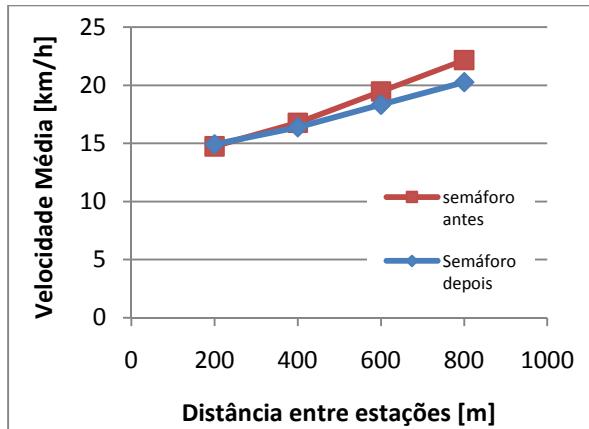


Figura 14 - Análise da influência da distância das estações e da posição do semáforo na velocidade operacional segundo o modelo combinado.

Outra observação feita a partir da comparação dos modelos simples e combinado foi o efeito inesperado da taxa de embarque e desembarque na velocidade operacional. No modelo simples, para cada nível de distância entre estações, a velocidade operacional aumenta com aumento da taxa de embarque e desembarque. No modelo combinado, porém, este efeito não é percebido, parecendo quase nulo. As figuras 15 e 16 apresentam a análise da influência da distância das estações e da taxa de embarque e desembarque na velocidade operacional segundo o modelo simples e combinado.

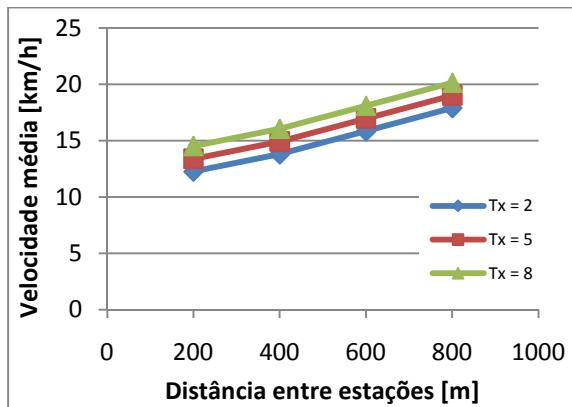


Figura 15 - Análise da influência da distância das estações e da taxa de embarque e desembarque na velocidade operacional segundo o modelo simples.

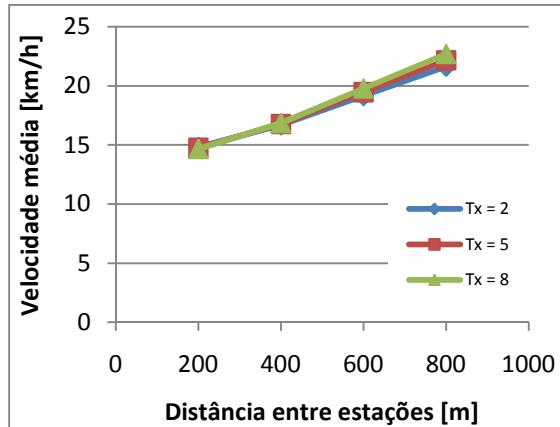


Figura 16 - Análise da influência da distância das estações e da taxa de embarque e desembarque na velocidade operacional segundo o modelo combinado.

## 6 CONCLUSÕES

A prática da implantação dos sistemas BRT ainda carece de um melhor entendimento sobre o impacto dos elementos de projeto no desempenho do sistema como um todo. A simulação através de modelos computacionais adequados para simular o desempenho detalhado de sistemas de transporte coletivo por ônibus permitem a condução de estudos aprofundados dos efeitos dos elementos de projeto sobre o sistema BRT.

A revisão da literatura propiciou a identificação dos elementos de projeto considerados como críticos para o desempenho de sistemas de ônibus de alto rendimento, em especial o BRT. A partir de uma combinação de seis elementos críticos (distância entre estações, taxa de embarque e desembarque, fator de ocupação do veículo, número de baias na plataforma, posição dos semáforos em relação à estação e demanda) foram montados cenários para testar a avaliação dos efeitos desses elementos e da interação entre eles.

As análises conduzidas seguiram duas linhas. A primeira constou de uma análise mais qualitativa que apontou efeitos gerais dos elementos de projeto na velocidade. A segunda análise apresenta natureza quantitativa e constou da especificação e aplicação de modelos de regressão linear múltipla onde os elementos foram testados de forma individual e combinados.

O modelo de regressão estimado a partir dos efeitos individuais dos elementos apresentou uma formulação consistente e representativa. Porém, do ponto de vista estatístico, o modelo do efeito dos elementos combinados apresentou maior robustez na representação do comportamento da velocidade operacional. Isso indica que os efeitos decorrentes das interações entre os elementos não deve ser menosprezado em um projeto de um sistema BRT. Além disso, o modelo dos efeitos combinados permite testar formas de potencializar a velocidade operacional, mesmo que elementos importantes não possam ser variados.

Embora limitado a um corredor de BRT com uma faixa por sentido, ou seja, sem ultrapassagem, este estudo ressalta a necessidade de tomar em conta, quando da etapa de projeto, o efeito dos elementos crítico no desempenho de um sistema BRT. Cada projeto é único na medida em que a quantidade possível de combinações de elementos é praticamente infinita. Mesmo assim, conhecer o impacto dos principais elementos e os efeitos das interações entre eles, aumenta as chances de sucesso na implantação real.

## 6 REFERÊNCIAS

BALCOME, R.; MACKETT, R.; PAULLEY, N.; PRESTON, J.; SHIRES, J.; TITHERIDGE, H.; WARDMAN, M.; WHITE, P. The demand for public transport: a practical guide. **Transportation Research Laboratory**. 2004.

BALTES, M. R.; CHU, X. Pedestrian level of service for midblock street crossings. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1818, p. 125-133, 2002.

BRASIL. **Código de Transito Brasileiro**. 1997. Disponível em: <<HTTP://WWW.PLANALTO.GOV.BR/CCIVIL/LEIS/L9503.HTM>>.

BRT POLICY CENTER. Transmilenio. 2004. Disponível em: <<http://www.gobrt.org/dbfront.html>>. Acesso em: 02 out 2009.

CEDER, A.; PRASHKER, J.; STERN, H. I. **An algorithm to evaluate public transportation stops for minimizing passengers walking distance**. Applied mathematical modeling, volume 7, páginas 19-24. 1983.

CEDER, A. **Public transit planning and operation: theory, modelling and practice**. Reino Unido: Elsevier, 2007.

CHAPMAN, R. A. **Bus boarding times – a review of studies and suggestions for interpretation**. Research Report number 8. Transport operations research group. University of Newcastle upon Tyne. 1975.

CHEN, X.; YU, L.; ZHANG, Y.; GUO, J. Analyzing urban bus service reliability at the stop, route and network levels. **Transportation Research Part A: policy and practice**. Volume 43, tópico 8, páginas 722-734. 2009.

CASTILHO, R.A., **Análise e simulação da operação de ônibus em corredores exclusivos**. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997.

FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. **Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making**. 2009. Disponível em: <<http://www.nbrti.org/CBRT.html>>.

FERNANDEZ, R.; PLANZER, R. **On the capacity of bus transit system**. Transport Reviews, volume 22, número 3, página 267-293. 2002.

FURTH, P.; RAHBEE, A. B. Optimal Bus Stop Spacing Through Dynamic Programming and Geographic Modeling. **Transportation Research Record: journal of the Transportation Research Board**, 2000.

GARDNER, G.; CORNWELL, P. R.; CRACKNELL, J. A. The performance of busway transit in developing cities. **Transportation and Road Research Laboratory**. 1991.

GIPPS, P. G. (1981). **A behavioral car-following model for computer simulation**. Transportation Research, B v 15, 105-111.

HIGHWAY CAPACITY MANUAL. **Transportation Research Board**. 2000.

JANOS, M; FURTH, P. Bus Priority with Highly Interruptible Traffic Signal Control: Simulation of San Juan's Avenida Ponce de Leon. **Transportation Research Record: journal of the Transportation Research Board**, 2002.

KITTLESON & ASSOCIATES, INC.; KFH GROUP, INC.; PARSONS BRINCKERHOFF QUADE & DOUGLASS, INC; HUNTER-ZAWORSKI, K. Transit capacity and quality of service manual. **Transit Cooperative Research Program: Report 100**, Washington, DC, USA. 2003.

KOSTANJSEK, J.; LIPAR, P. **Pedestrian crossings priority for pedestrian safety**. 33<sup>rd</sup> Urban Symposium. Seattle, Washington. 2007.

LEVINSON, H.; ZIMMERMAN, S.; CLINGER, J.; RUTHERFORD, S.; SMITH, R. L.; CRACKNELL, J.; SOBERMAN, R. Bus rapid transit, Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit. **Transit Cooperative Research Program: Report 90**, Washington, DC, USA. 2003.

LINDAU, L.A.; WILLUMSEN, L. G. **Allocating road space to vehicles: the experience of Brazil**. In: Proud'homme, R.. (Org.). New perceptions and new policies - urban transport in developing countries. Paris: Paradigme, páginas 127-142. 1990.

LIU, R. (2003). **DRACULA Traffic Model User Manual**, Version 2.0. ITS, U. Leeds.

MARSDEN G.; M. BELLE S. REYNOLDS (2001) **Towards a real-time microscopic emissions model**. Transportation Research D, volume 6, 37-60.

MERCEDES-BENZ DO BRASIL S.A. **Sistemas de Transporte Coletivo Urbano por Ônibus: planejamento e operação**. São Bernardo do Campo, SP. 1987.

PARKINSON, T.; FISCHER, I. Rail Transit Capacity. **Transit Cooperative Research Program: Report 13**, Washington, DC, USA. 1996.

PEREIRA, B. M. ; LINDAU, L.A. ; CASTILHO, R. A. **A importância de simular sistemas Bus Rapid Transit**. In: XVI Congreso Latinoamericano de Transporte Publico y Urbano, 2010, Cidade do Mexico. Anais do XVI CLATPU. Buenos Aires : ALAPTU, 2010. v. 1. p. 1-11.

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modeling Transport**. 3<sup>a</sup> edição. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

OSUNA, E.E.; NEWELL, G.F. Central strategies for an idealized public transport system. **Transportation Science**. Vol. 6, No.1, 52-72. 1972

STATA CORPORATION. Stata: data analysis and statistical software. Disponível em: [www.stata.com](http://www.stata.com). Acesso em: 15 jan. 2011.

STRADLING, S. G.; ANABLE, J.; CARRENO, M. Performance, importance and user disgruntlement: a six-step method for measuring satisfaction with travel modes. **Transportation Research Part A: policy and practice**, volume 41, tópico 1, páginas 98-106. 2007.

TROMPET, M.; LIU, X.; GRAHAM, D. **Development of a key performance indicator to compare regularity of service between urban bus operators**. Transportation Research Board 90<sup>th</sup> Annual Meeting. 2010. Disponível em: <[http://workspace.imperial.ac.uk/rtsc/Public/Trompet\\_Liu\\_Graham%20Regularity%20F%20Service%20Regularity.pdf](http://workspace.imperial.ac.uk/rtsc/Public/Trompet_Liu_Graham%20Regularity%20F%20Service%20Regularity.pdf)>. Acesso em: 12 fev. 2011.

VUCHIC, V. **Urban Transit: operations, planning and economics**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

VUCHIC, V. **Urban Transit: Systems and Technology**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

WILSON, R. E. (2001) **An Analysis of Gipps' car-following model of highway traffic**. IMA Journal on Applied Mathematics.

WRIGHT, L.; HOOK, W. **Bus Rapid Transit Planning Guide**. 3<sup>a</sup> edição. New York: Institute for Transport and Development Policy. 2007.

WHITE, P. **Public Transport: its planning, management and operation**. 5<sup>a</sup> edição. T & F Books UK, 2008.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A qualificação do transporte coletivo é necessária tanto para a atração de novos usuários quanto para a manutenção da demanda atual. Os sistemas sobre pneus são responsáveis pela maior parcela do transporte coletivo no Brasil. Frente aos elevados custos de implantação de sistemas de alta capacidade sobre trilhos e as restrições orçamentárias da quase totalidade dos municípios brasileiros, vislumbra-se um horizonte onde os sistemas BRT estarão implantados em uma parcela significativa das nossas cidades de médio e grande porte. Logo é importante entender estes sistemas e contar com a capacidade de configurá-los de forma a atender, com qualidade, as necessidades de demanda dos principais corredores de transporte coletivo no Brasil.

A experiência adquirida pela prática dos bons projetistas é de grande valia no planejamento de sistemas BRT e o uso de ferramentas computacionais só vem somar na qualificação dos projetos. Criar cenários, ensaiá-los e avaliá-los ainda na fase de projeto potencializa as chances de sucesso da implantação. Este processo evita que recursos materiais, humanos e financeiros sejam desperdiçados por tentativas em campo; tentativas essas que, quando mal sucedidas, podem comprometer o próprio conceito do BRT.

A literatura sobre sistemas ônibus, mais especificamente sobre sistemas busway e BRT, apresenta boa quantidade de títulos que avaliam os elementos de projeto e suas relações com o desempenho destes sistemas, porém pouco foi encontrado sobre a interação entre elementos. Esta dissertação apresenta a avaliação dos efeitos das interações entre elementos de projeto sobre o desempenho de sistemas BRT operando em uma faixa segregada de via.

O primeiro artigo cumpre o objetivo de apresentar o potencial de utilização do software EMBARQ BRT Simulator, através da descrição da ferramenta e do relato de dois estudos de caso: Rio de Janeiro e Arequipa, Peru. O segundo artigo atinge os demais objetivos deste estudo. Através da simulação de corredor hipotético que reúne os principais elementos de sistemas BRT, identifica-se a influência dos mesmos no desempenho de um sistema BRT. Ainda, com base nos resultados dos cenários simulados foram avaliados os efeitos da interação entre elementos de projeto de sistemas BRT na sua operação, de forma qualitativas e quantitativas. A partir das

velocidades observadas, procedeu-se a análise qualitativa. Na análise quantitativa, foram gerados modelos de regressão para explicar o comportamento da velocidade com base nos elementos de projeto. Da modelagem resultaram dois modelos capazes de explicar a interação entre elementos: um com variáveis simples (isoladas), de mais fácil aplicação; e outro com variáveis combinadas, este mais robusto que o primeiro.

O trabalho explora o limite de corredores BRT com uma faixa segregada por sentido. Novas configurações podem ser simuladas para avaliar outras possibilidades de sistemas BRT que incorporem características como, por exemplo: ultrapassagem, prioridade semafórica, uso de comboios, etc.

## REFERÊNCIAS

**ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS.** Disponível em: <<http://portal1.antp.net/site/default.aspx>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

**BRASIL.** Presidência da república. **Copa 2014 - Transparência em 1.º lugar.** Disponível em: <<http://www.portaltransparencia.gov.br/copa2014/>>. Acesso em: 12 jan. 2011.

**HIDALGO, D.; CARRIGAN, A.** **Modernizing public transportation: lessons learned from major bus improvements in Latin America and Asia.** Disponível em: <[http://pdf.wri.org/modernizing\\_public\\_transportation.pdf](http://pdf.wri.org/modernizing_public_transportation.pdf)>. Acesso em: 21 jan. 2011

**LINDAU, L.A.; WILLUMSEN, L. G.** **Allocating road space to vehicles: the experience of Brazil.** In: Proud'homme, R. (Org.). New perceptions and new polices - urban transport in developing countries. Paris: Paradigme, páginas 127-142. 1990.