

Avaliação do desempenho limite de corredores Bus Rapid Transit (BRT) sem ultrapassagem

Brenda Medeiros Pereira¹, Luis Antonio Lindau²,
Mara Chagas Diógenes³ e Rodrigo Alberto de Castilho⁴

Resumo: Investiga-se o desempenho de um corredor BRT com uma única faixa por sentido e sem ultrapassagem, em termos de capacidade e velocidade operacional, através da simulação de 324 cenários alternativos. Nas simulações variaram-se os níveis de demanda, as taxas de embarque e desembarque, a distância entre estações, o fator de carregamento dos veículos, o número de baias por estação e o posicionamento do semáforo em relação às estações. A análise dos resultados revela que esse corredor BRT, quando operado por ônibus articulados, pode atingir uma capacidade de cerca de 15.000 pass/h/sentido ao longo de sua seção crítica e uma velocidade operacional de 23 km/h. Uma análise estatística preliminar permitiu a estimativa de um modelo de regressão que representa o impacto de elementos de projeto na velocidade operacional de um BRT. Os resultados fornecem informações úteis para projetistas de corredores BRT de alto desempenho.

[DOI:10.4237/transportes.v21i1.497](https://doi.org/10.4237/transportes.v21i1.497).

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

Abstract: The performance of a BRT corridor with a single lane per direction and no overtaking is investigated, in terms of capacity and operating speed, by simulating 324 alternative scenarios. The simulation runs comprised a range demand levels, boarding and alighting rates, station spacing, vehicle loading, number of berths per station, and traffic signal positioning in relation to stations. The analyses reveal that such BRT corridor, when operated by articulated buses, can achieve a capacity around 15,000 pass/h/dir along its critical section and an operating speed of 23 km/h. Preliminary statistical analysis enabled the estimation of a regression model representing the impact of BRT design elements on the operating speed. The findings could provide useful insights for designers of high-performance BRT corridors.

Keywords: Bus Rapid Transit, performance, elements, simulation.

1. INTRODUÇÃO

Bus Rapid Transit (BRT) se caracteriza por ser um transporte rápido de passageiros que apresenta a qualidade do transporte ferroviário e a flexibilidade do sistema ônibus (Federal Transit Administration, 2009; Levinson *et al.*, 2003; Wright e Hook, 2007). 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 de projeto e a combinação estabelecida entre eles é determinante para o desempenho operacional de um corredor de BRT.

Quanto ao volume transportado, o desempenho dos sistemas BRT varia de 2.000 passageiros por hora através de 50 ônibus/h/sentido no período de pico (Levinson *et al.*, 2003), ao recorde atual de capacidade 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. Ve-

locidades da ordem de 25 km/h estão associadas a sistemas BRT que ofertam níveis de serviço aceitáveis (Wright e Hook, 2007).

Sistemas de ônibus de alto desempenho resultam de um processo de tentativa e erro combinado com doses de pragmatismo e empirismo (Lindau e Willumsen, 1990). Tipicamente os projetistas de novos sistemas tendem a tomar suas decisões com base no desempenho observado em corredores 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.

Como cada corredor BRT é quase único em termos de configurações e é praticamente infinita a quantidade de combinações entre elementos de projeto, não é razoável esperar que o desempenho de um determinado corredor possa ser replicado em condições distintas. Estudos baseados em microsimulação computacional oferecem uma oportunidade única ao propiciar, através da análise de cenários, a determinação dos limites de desempenho operacional de corredores BRT. Este artigo enfoca, através do uso de simulação e de um projeto de experimento, o efeito da interação de elementos de projeto no desempenho de sistemas BRT de faixa única sem ultrapassagem, particularmente em termos de capacidade e velocidade operacional.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

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

¹ **Brenda Medeiros Pereira**, EMBARQ Brasil, Laboratório de Sistemas de Transporte, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (e-mail: bmedeiros@embarqbrasil.org).

² **Luis Antonio Lindau**, EMBARQ Brasil, Laboratório de Sistemas de Transporte, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (e-mail: tlindau@embarqbrasil.org).

³ **Mara Chagas Diógenes**, Laboratório de Sistemas de Transporte, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (e-mail: maracd@gmail.com).

⁴ **Rodrigo Alberto de Castilho**, EMBARQ Brasil, Laboratório de Sistemas de Transporte, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (e-mail: racastilho@hotmail.com).

refere-se ao fato de todos os veículos serem simulados individualmente, em contraste a modelos macroscópicos, em que o fluxo de tráfego é tratado por meio de equações ou através da movimentação de pelotões veiculares. O software foi desenvolvido em linguagem C#, para Windows.

2.1. Parâmetros de simulação

Os parâmetros da simulação são especificados em um arquivo de dados, que contemplam:

- **Dados gerais:** define o período de simulação e constantes relacionadas à animação (como a largura das faixas);
- **Geometria:** inclui os dados da rede (nós e arcos), posição e dimensão das plataformas, localização e programação semafórica, posição dos despachadores de veículos (que injetam veículos no sistema), entre outros;
- **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; e
- **Demanda:** estabelece a demanda de passageiros entre os distintos pares Origem-Destino relacionados às estações operadas pelas linhas.

2.2. 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), DRACULA (Liu, 2003) e AIMSUN (Casas *et al.*; 2010). 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).

2.3. 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 embar-

que por passageiro.

2.4. 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* que reporta cada evento ocorrido ao longo da simulação para cada veículo (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.

3. 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 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.

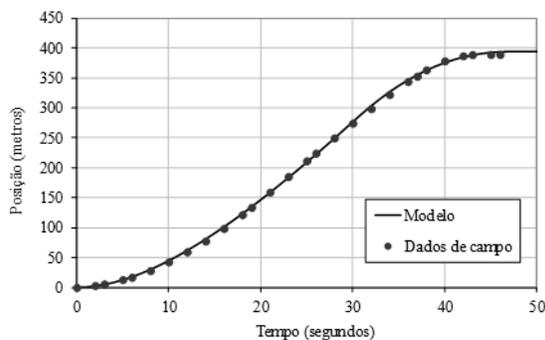


Figura 1. Diagrama de deslocamento observado para trecho do BRT de Curitiba (Pereira *et al.*, 2010)

Além do estudo em Curitiba, foi realizada uma coleta de dados em Porto Alegre ao longo de um corredor tipo *busway*, visando 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 (Pereira *et al.*, 2010).d

4. ELEMENTOS DE PROJETO E DESEMPENHO DE SISTEMAS BRT

Diversos são os elementos físicos e operacionais que influ-

em 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 e o tipo de veículo escolhido. Elementos operacionais dizem respeito ao arranjo operacional adotado, entre eles: o ciclo semafórico, a coordenação entre semáforos e o número de serviços operando no corredor. A Tabela 1 apresenta os principais elementos de projeto e seus possíveis impactos no desempenho de um sistema BRT.

Para o caso de sistemas de transporte coletivo de alta demanda, como o caso dos BRT, a capacidade e a velocidade operacional constam entre as principais medidas de desempenho. 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 demandado como, por exemplo, um trecho da via, uma interseção ou uma estação (Fernandez e Planzer, 2002). Em geral, a capacidade é definida como o carregamento máximo transportado através da seção crítica em um intervalo de tempo (Vuchic, 2007). Quedas acentuadas na velocidade são fortes indicativos dos limites de capacidade de um corredor BRT.

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 de projeto de um BRT que dizem respeito às estações e interseções constam: a programação semafórica (Janos e

Furth, 2002); a distância entre estações; o volume de passageiros e as condições de embarque/desembarque; o número de interseções; o fluxo de ônibus e a possibilidade de ultrapassagem no corredor (Gardner *et al.*, 1991). A Tabela 2 apresenta taxas de embarque/desembarque para diferentes combinações de veículos e plataformas; estas taxas influenciaram os valores utilizados nas simulações.

Em geral, um corredor BRT requer semáforos para travessias de pedestres e para o cruzamento de veículos. Em áreas urbanas de alta densidade de pedestres, recomenda-se uma incidência de travessias de pedestres entre 100 e 500 m (Kostanjsek e Lipar, 2007), sendo que o Manual de Segurança Viária em Corredores de Ônibus (Duduta *et al.*; 2012) indica, no mínimo, uma travessia de pedestre controlada por semáforos a cada 300 metros. Nos cenários modelados, os semáforos sempre foram posicionados com espaçamento de 250 m. Ainda, buscou-se determinar o efeito de posicionar os semáforos imediatamente antes e imediatamente depois das estações. O estudo considera tempos de ciclo fixos de 120 s, que são usuais para vias arteriais urbanas, com *offset* zero e 60 s de verde. Wright e Hook (2007) apontam que tempos de verde no corredor durando 50% do ciclo são usuais para corredores operados por sistemas BRT.

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

<i>Elemento</i>	<i>Possível influência no desempenho</i>	<i>Fonte</i>
Ultrapassagem	A ultrapassagem permite a operação de serviços diferenciados: locais, acelerados e expressos. Resulta em maior velocidade operacional e capacidade.	Gardner <i>et al.</i> (1991)
Ciclo semafórico e coordenação entre semáforos	Redução do atraso nas interseções, aumento na confiabilidade do sistema e aumento da velocidade operacional.	Gardner <i>et al.</i> (1991); Janos e Furth (2002)
Distância entre estações	Quanto maior a distância entre estações, menor o tempo perdido com a aceleração e desaceleração dos veículos e maior a velocidade operacional do BRT. A distância média ideal entre estações de sistemas de ônibus é de 400 metros, não devendo ser maior do que 800 metros.	Furth e Rahbee (2000); Kittelson & Associates, Inc <i>et al.</i> (2003); Farewell e Marx apud Ceder (2007)
Posicionamento da estação em relação à interseção	Interfere no perfil de acelerações e velocidades do corredor e no instante ideal para deixar a estação.	Mercedes-Benz do Brasil (1987); Wright e Hook (2007)
Interface do veículo com a plataforma	A relação entre o veículo e a plataforma (diferença de nível, tempo de abertura de portas e docagem) influencia no tempo de embarque e desembarque por passageiro e, assim, na velocidade operacional do BRT.	Vuchic (2007)
Tamanho do veículo	Influi no dimensionamento e layout das estações, nas frequências, no número de canais e na dirigibilidade. Em sistemas que almejam capacidades elevadas ocorre uma tendência pelo uso de veículos articulados e biarticulados.	Wright e Hook (2007); Ceder (2007)
Número de baias por estação	O número de baias influencia na capacidade da estação e na saturação das plataformas.	Wright e Hook (2007)
Fator de carregamento dos veículos	Indica a relação entre a capacidade prática do veículo e a lotação máxima. Quanto menor o fator, maior a frota necessária.	Vuchic (2007)
<i>Headway</i>	Quanto menor o <i>headway</i> (1/frequência), menor é o tempo de espera dos passageiros nas estações.	Vuchic (2007)
Comboios	Permitem que ônibus acelerem e desacelerem quase que simultaneamente. Podem aumentar tanto a capacidade quanto a velocidade operacional de um corredor de ônibus.	Gardner <i>et al.</i> (1991)

Tabela 2. Taxa de embarque/desembarque para diferentes combinações de veículos e plataformas (adaptado de Vuchic, 2005)

<i>Veículo</i>	<i>Altura do veículo/ Altura da plataforma</i>	<i>Passageiro por segundo por canal</i>	<i>Número de canais por veículo</i>	<i>Passageiros por segundo por veículo</i>
Padrão	piso alto/baixa	0,4	4	1,6
Articulado	piso alto/baixa	0,5	6	3,0
Articulado	piso alto/alta	0,9	6	5,4
Articulado	piso baixo/baixa	0,9	6	5,4
Articulado	piso alto/alta	0,9	8	7,2
Articulado	piso baixo/baixa	0,9	8	7,2
Articulado*	piso alto/alta	1,2	6	7,2
Articulado*	piso alto/alta	1,2	8	9,6

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

5. DESEMPENHO DO BRT EM FUNÇÃO DE ELEMENTOS DE PROJETO

O efeito da interação de elementos no desempenho de sistemas BRT foi avaliado através de um projeto de experimentos que contemplou a simulação de 324 cenários. Este estudo adota a velocidade operacional como principal medida de desempenho do BRT em todos os cenários propostos.

5.1. Elementos fixos

A capacidade de cada veículo BRT varia de acordo com o seu comprimento e *layout* interno (distribuição de assentos, localização de porta, etc.). Este estudo adota 170 passageiros como a lotação máxima para os veículos (Wright e Hook, 2007). Nos cenários simulados a ocupação máxima do veículo será afetada pelo fator de carregamento adotado: 60%, 80% e 100%, que representam uma ocupação máxima respectiva de 102, 136 e 170 passageiros.

A simulação requer que a velocidade máxima que um BRT possa desenvolver em fluxo livre seja arbitrada; adotou-se 60 km/h para o corredor, de acordo com o Código Brasileiro de Trânsito (Brasil, 1997). A calibração do simulador apontou que a aceleração de veículos articulados é da ordem de 1,0 m/s² (Pereira *et al.*, 2010), taxa também indicada por outros autores para sistemas ônibus (Vuchic, 2007). A desaceleração dos veículos foi adotada como sendo o dobro da aceleração. Em todos os cenários a extensão do trecho simulado é de 10 km.

5.2. Elementos variáveis

Seis são os elementos variáveis: a distância entre estações (D), a taxa de passageiros embarcando no veículo por segundo (Tx), 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). Com base nas informações constantes na literatura indicada na tabela 1, foram identificados os níveis de variação dos elementos que melhor representam as opções de projetos disponíveis para sistemas BRT. A combinação de elementos e níveis de variação resultou na simulação de 324 cenários. Todos os cenários consideram 3 horas como o período de simulação e uma injeção de veículos a *headways* constantes. Para que a fase preenchimento (*warm-up*) do sistema não afete os resultados da simulação, após a primeira hora as estatísticas foram zeradas e, então, começaram a ser coletadas novamente.

Com vistas a testar a influência da demanda no desempenho dos corredores, três foram os níveis adotados: 8.000,

12.000 e 15.000 passageiros/hora/sentido no trecho crítico, o que representa, respectivamente, 15.000, 22.500, e 28.500 embarques/h/sentido em todas as estações do corredor. A Tabela 3 apresenta os elementos e os valores adotados no estudo. Por ser uma variável qualitativa, a posição dos semáforos em relação à estação foi incluída ao estudo utilizando o recurso das variáveis *dummy*.

Tabela 3. Elementos e valores adotados no estudo

<i>Elementos de projeto</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valores adotados</i>
Distância entre estações	metros	250, 500 e 750
Taxa de embarques	[pass/s/veic]	2, 5 e 8
Fator de ocupação	[%]	60, 80 e 100
Número de baias	unidade	2 e 3
Posição do semáforo		antes (-1) e depois (1)
Demanda	[pass/h/sentido]	8.000, 12.000, 15.000

5.3. Elementos dependentes

Para estimar a quantidade de embarques e desembarques por estação distribuiu-se a demanda levando em conta a distância entre estações e a densidade de demanda por metro de corredor (Castilho, 1997; Pereira, 2011). Considerou-se que: (i) a maioria dos embarques e desembarques ocorre no início e fim do corredor; (ii) o número de embarques decresce linearmente ao longo do corredor, enquanto o de desembarques cresce, (iii) o número total de embarques/desembarques por estação depende da distância entre estações – quanto maior a distância, maior o número de passageiros por estação. A Figura 2 apresenta esta lógica.

A Figura 3 apresenta um exemplo do perfil de embarques e desembarques e do carregamento resultante ao longo de um corredor com 20 estações separadas por 500 m. Neste caso, há 8.000 pass/h/sentido na seção crítica, localizada no meio do corredor. Nas simulações, a chegada dos passageiros ocorre de forma aleatória de acordo com uma distribuição de Poisson.

Para cada um dos cenários, o *headway* operacional no despacho é função da capacidade do veículo, da demanda a ser transportada no trecho crítico e do fator de carregamento utilizado no dimensionamento. Nos diferentes cenários simulados, as frequências resultantes de despacho variaram entre 46 e 160 ônibus/hora. Porém perturbações inerentes aos sistemas simulados fazem com que o *headway* varie ao longo do corredor e ao longo do tempo.

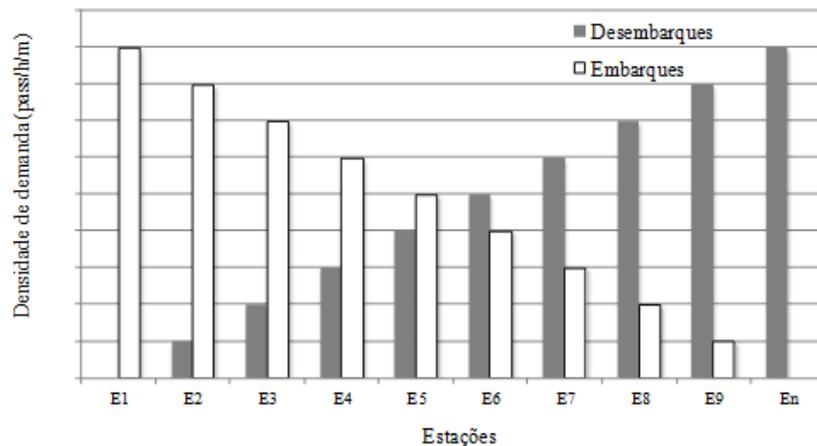


Figura 2. Distribuição de demanda ao longo do corredor

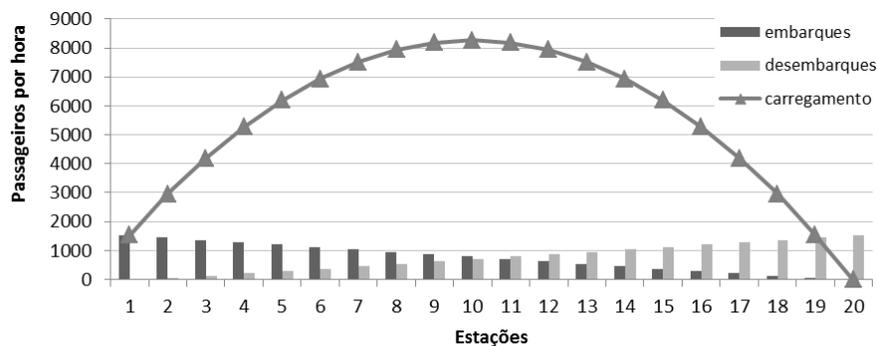


Figura 3. Exemplo de diagrama de carregamento: o caso de 8.000 pass/h/sentido

6. RESULTADOS

Este estudo contemplou análises qualitativas e quantitativas. A animação da simulação proporcionada pelo software contribuiu para as análises qualitativas ao identificar filas de veículos no corredor e de passageiros nas estações, típicas de situações operacionais que beiram o limite de desempenho. As análises qualitativas também tomaram por base os valores de velocidade operacional encontrados para cada cenário. Na dimensão quantitativa, buscou-se estimar modelos que representassem o comportamento da velocidade operacional, com base nos elementos de projeto.

6.1. Análise qualitativa

As Figuras 4, 5 e 6 representam, respectivamente, as velocidades operacionais resultantes de cada cenário para demandas de 8.000, 12.000 e 15.000 pass/h/sentido na seção crítica. A Figura 7 apresenta uma representação comparativa de todos os cenários simulados. Cada ponto na figura representa, para um determinado cenário, a média da velocidade operacional de todos os veículos simulados durante um período de 2 horas-pico consecutivas. Para compensar a falta de repetição nas rodadas de simulação de cada cenário, simulou-se a operação ao longo do corredor por um período mais longo do que uma hora.

Em muitos casos, a velocidade operacional resultou inferior a 15 km/h, indicando os cenários que não foram capazes de atender a suas respectivas demandas. Como esperado, esses casos ocorreram com maior frequência quando o

sistema foi submetido ao mais alto nível de demanda no trecho crítico, ou seja, 15.000 pass/h/sentido. Velocidades tão baixas quanto 5 km/h indicam condições de saturação do sistema.

Para todos os níveis de demanda, 15 km/h foi a velocidade operacional predominante para distâncias entre estações (D) de 250 e 500 m. Para D = 750 m, foram alcançadas velocidades operacionais de até 23 km/h, mas também se notou uma variação considerável nas velocidades resultantes dos diferentes cenários. Esta variação nas velocidades aumentou com o crescimento da demanda.

Para todos os níveis de demanda, e independentemente da distância separando as estações BRT, o embarque e desembarque a uma taxa de 2 pass/s, o que equivale a um ônibus com duas portas com 2 canais cada uma, além do desnível entre a plataforma do ônibus e da estação, gerou grande variação na velocidade operacional. Quanto maior a demanda e maior distância entre as estações, mais perceptível foi este efeito. Para demandas elevadas, três baias nas estações proporcionaram melhor desempenho do que duas baias.

A presença de semáforos a cada 250 m, em todos os cenários simulados, contribuiu para limitar a velocidade operacional em 15 km/h quando D = 250 m e D = 500 m. Para D = 750 m, quando havia mais passageiros para embarcar e desembarcar nas estações e os veículos eram obrigados a parar por mais tempo, semáforos localizados antes das estações contribuíram, de forma consistente, para o aumento das velocidades, um efeito que não foi claramente observado para os outros níveis de distância entre estações. É pro-

vável que os aspectos associados aos semáforos não testados neste estudo, tais como a coordenação, *offset*, detecção dos veículos para extensão do verde, também tenham impacto na velocidade de operacional.

Cenários com 8.000 pass/h/sentido na seção crítica (8k) apresentam a menor variação entre os valores das velocidades operacionais resultantes. A estabilidade dos valores de velocidade sugere que o sistema não atingiu a sua capacidade, exceto em alguns poucos cenários que apresentaram velocidades fora do esperado. Analisando a Figura 4:

- nota-se que não há diferença de patamar de velocidade quando se aumenta a distância entre estações de 250 para 500 m, mas observa-se um ganho de cerca de 5 km/h quando a distância passa de 500 para 750 m;
- para os cenários em que a distância entre estações é de 250 m ($D = 250$ m) e taxa de embarque/desembarque é de 2 pass/s ($T_x = 2$), a velocidade apresenta alguma variação, o que sugere a formação de pequenas filas em certos pontos do corredor; e
- os cenários 74, 86 e 98 destacam-se ao apresentarem valores de velocidade operacional aquém dos demais referentes à $D = 750$ m. Como elementos comuns a estes cenários despontam o número de baias na parada igual a 2, semáforo localizado após a estação e fator de ocupação do veículo igual a 0,6.

Os cenários que utilizam o nível de demanda intermediário, de 12.000 pass/h/sentido (12k), apresentam maior variação que os cenários com 8k. Nota-se este efeito principalmente nos cenários onde $T_x = 2$ para $D = 250$ m e $D = 500$ m; para $D = 750$ m a variação ocorre em todos os níveis de

T_x . Essa variação sugere que o sistema simulado aproxima-se da capacidade. Da análise comparativa dos cenários de 12k constantes da Figura 5:

- verifica-se que não há diferença no patamar de velocidade quando a distância entre estações aumenta de 250 para 500 m. Apesar da variação dos valores de velocidade quando $D = 750$ m, percebe-se um patamar mais elevado de velocidade, que tende aos 20 km/h;
- nos cenários em que $T_x = 2$ e $D = 250$ ou 500 m, nota-se uma variação nas velocidades maior que a observada para 8k, sugerindo a formação de filas mais longas ou de maior duração em pontos da rota do corredor; e
- os cenários 38, quando $D = 500$ m, e cenários 74 e 86, onde $D = 750$ m, revelam valores de velocidade operacional muito abaixo dos demais, mesmo considerando a variação 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 dizem respeito ao nível máximo de demanda avaliado neste estudo, 15.000 passageiros/hora/sentido (15k), apresentam as maiores dispersões da velocidade operacional entre todos os níveis de demanda avaliados. Poucos são os lotes de cenários 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 incapacidade em atender a este patamar de demanda dentro de padrões aceitáveis de desempenho, além de sugerir a formação frequente de filas. Da análise dos cenários constantes da Figura 6,

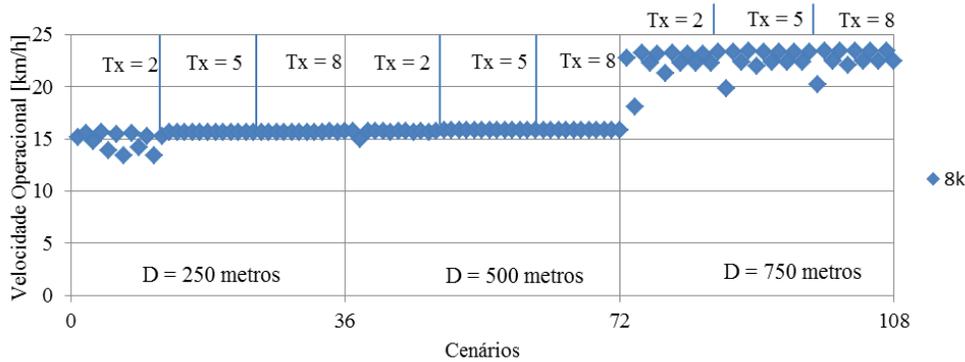


Figura 4. Resultados dos cenários baseados na demanda de 8.000 pass/h/sentido

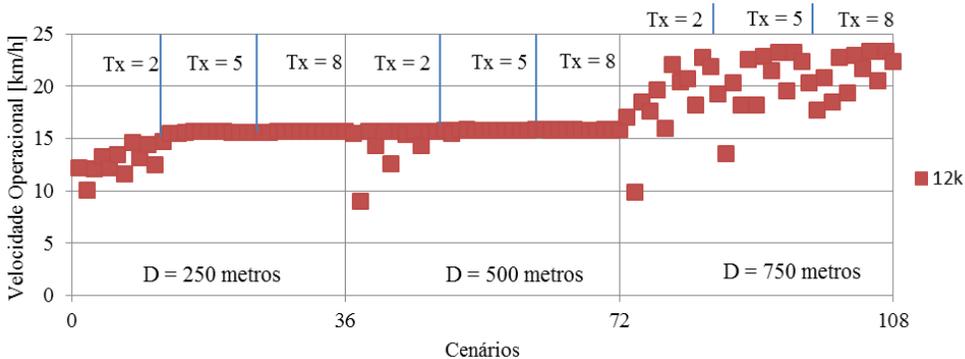


Figura 5. Resultados dos cenários baseados na demanda de 12.000 pass/h/sentido

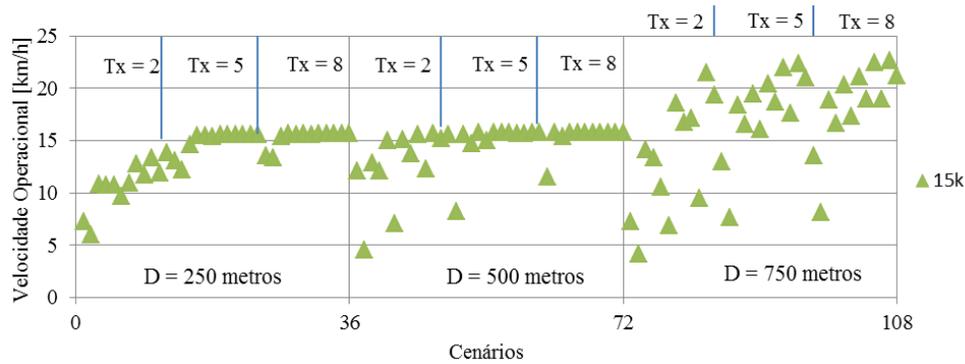


Figura 6. Resultados dos cenários baseados na demanda de 15.000 pass/h/sentido

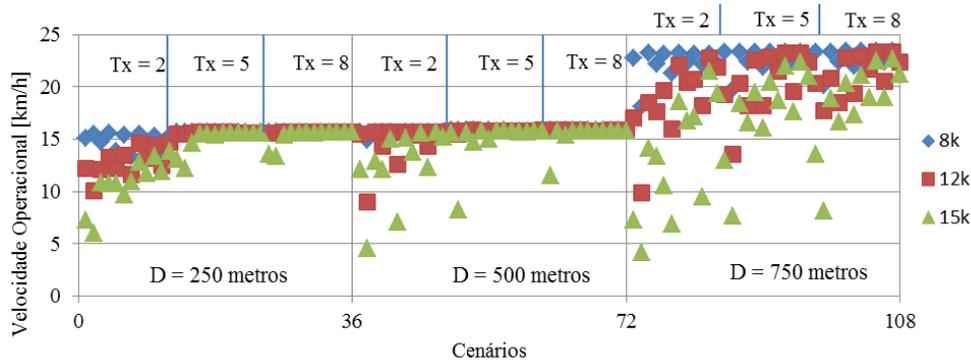


Figura 7. Resultados de todos os cenários simulados

verifica-se que:

- assim como nos níveis anteriores de demanda, não há diferença de patamar de velocidade quando a distância entre estações aumenta de 250 para 500 m. Mesmo com uma variação maior nos valores de velocidade de forma geral, em especial quando $D = 750$ m, a velocidade operacional atinge um patamar médio mais elevado em relação a menores distâncias entre estações, chegando à faixa dos 20 km/h;
- os pontos estáveis de velocidade têm em comum $T_x = 5$ e $T_x = 8$ para $D = 250$ m e $D = 500$ m. Nos cenários em que $T_x = 2$, independente da distância entre estações, a velocidade operacional é bastante afetada pelas filas; e
- como efeito da maior variação da velocidade, 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 $D = 500$ m e 74, onde $D = 750$ m. São fatores comuns a estes cenários a taxa de embarque/desembarque igual a 2, número de baias de parada igual a 2 e semáforo localizado após a estação. A variação 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 à estagnação do sistema.

Os cenários simulados apresentaram velocidades operacionais entre 5 e 23 km/h. Esses valores incluem-se na faixa reportada pela literatura, para as frequências entre 46 e 160 ônibus/hora utilizadas neste estudo. A velocidade predominante foi de 15 km/h. Para os níveis de demanda simulados, distância entre paradas inferiores a 500 m e travessias se-

maforizadas de pedestres a cada 250 m, não foi possível alcançar velocidades superiores a 15 km/h. Condicionantes geométricas de projeto são determinantes das velocidades operacionais, já que valores mais elevados só podem ser atingidos quando as operações de aceleração e desaceleração associadas às paradas nas estações ocorrem a cada 750 m.

6.2. Análise quantitativa

Este estudo de simulação compreende um conjunto de 324 cenários resultantes da combinação completa de 6 elementos de projeto. Assim, a proposta inicial de modelagem foi calibrar um modelo de regressão linear múltipla, um procedimento comum em projetos de experimentos, mesmo entendendo que os efeitos dos elementos de projeto na velocidade operacional não sejam necessariamente lineares.

No modelo, todas as combinações possíveis dos seis elementos de projeto foram potencialmente consideradas como variáveis explicativas para a velocidade operacional do corredor BRT. Combinações não representativas, do ponto de vista estatístico, foram retiradas uma a uma. Foram aceitas as combinações com valor p de Pearson igual ou inferior a 0,05 para o nível de significância de 5% (equivalente a 95% de confiança estatística).

A Tabela 4 apresenta o modelo mais representativo da velocidade operacional em um corredor BRT. É importante mencionar que este é válido somente para as faixas de valores testados dos elementos de projeto. Assim, usar o modelo de regressão em extrapolações pode levar a estimativas erradas. As variáveis apresentadas na Tabela 4 representam: distância entre estações [m] - D ; taxa de embarque/desembarque [passageiros/s] - T_x ; fator de ocupação dos veículos [decimal] - FO ; número de baias na platafor-

ma [unidade] - NB; posição dos semáforos em relação à estação [antes = -1 e depois = 1] - PS; número de passageiros transportados na seção crítica por hora por sentido [(pass/h/sentido)/1000] - Dem.

O modelo representado pela Tabela 4, com combinações de até 3 elementos, foi o que apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2 = 0,82$) entre todos os gerados. Também foi o que apresentou a menor variação dos pontos em relação à reta no gráfico de resíduos (Pereira, 2011). Modelos com combinações de elementos criam dificuldades de interpretação. Nesses casos, técnicas gráficas podem fornecer meios mais úteis para a realização de análises de sensibilidade.

Tabela 4. Modelo de regressão para a velocidade operacional em um corredor BRT

<i>Coefficiente</i>	<i>Variáveis</i>
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	Constante

A Figura 8 apresenta o caso onde todos os elementos, com exceção da demanda e da distância entre as estações, foram mantidos com valores fixos. Aumentar a distância entre as estações resultou ser mais eficaz para o aumento da velocidade operacional quando Dem = 8k.

A Figura 9 revela que o posicionamento do semáforo antes da estação quando Dem = 8k permite velocidades operacionais mais elevadas quando as distâncias entre as estações forem maiores do que 500 m. Para distâncias menores entre as estações, a posição relativa dos semáforos apresentou pouco ou nenhum efeito sobre a velocidade operacional resultante.

7. CONCLUSÕES

A revisão da literatura e a compreensão do estado-da-prática levaram à identificação dos elementos de projeto considerados determinantes para o desempenho dos sistemas de ônibus de alta demanda, em particular os sistemas de BRT da América Latina. Com base em uma combinação

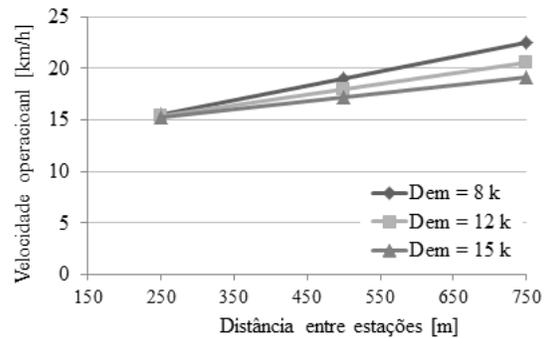


Figura 8. Influência da distância das estações e da demanda na velocidade operacional (Tx = 8; FO = 0,6; NB = 3; e PS = -1)

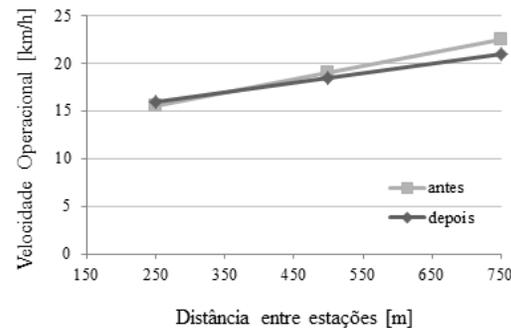


Figura 9. Influência da distância das estações e da posição do semáforo na velocidade operacional (Tx = 8; FO = 0,6; NB = 3; e Dem = 8)

de seis elementos críticos (níveis de demanda, taxas de embarque e desembarque, distância entre estações, fator de carregamento de veículos, número de baias por plataforma, e posicionamento do semáforo em relação às estações) 324 cenários foram criados para determinar o desempenho limite, em termos de velocidade operacional e capacidade, de um corredor BRT.

Os resultados apontam que um corredor BRT com uma única faixa por sentido e sem ultrapassagem pode alcançar uma capacidade de 15.000 pass/h/sentido ao longo de sua seção crítica com uma velocidade operacional de 20 km/h. Sob combinações ideais de elementos de projeto (estações separadas por 750 m, taxas de embarque e desembarque da ordem de 5 pass/s ou mais, semáforos posicionados antes das estações, e três baias por estações) foram observadas velocidades operacionais de até 23 km/h.

Do estudo também constou a calibração um modelo de regressão multilinear, que é convencionalmente usado em projetos de experimentos, para representar a velocidade operacional como resultado de uma combinação de elementos. Testou-se a consistência do modelo e a sua utilidade foi caracterizada através da realização de uma análise de sensibilidade.

Esse estudo demonstra que a simulação computacional microscópica é uma ferramenta adequada para recriar um ambiente de estudo detalhado do desempenho operacional de corredores BRT. Este artigo destaca a importância de se levar em conta, em fases que antecedem a implantação, os efeitos dos elementos críticos de projeto que determinam a velocidade operacional e a capacidade de um corredor de BRT.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do CNPq, do WRI, da rede EMBARQ e do ALC, o Centro de Excelência em BRT.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brasil (1997) *Código Brasileiro de Trânsito*. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/19503.htm>>. Acesso em: 12/nov/2012.
- BRT Policy Center (2004) *Transmilênio*. Disponível em: <<http://www.gobrt.org/dbfront.html>>. Acesso em: 02/10/2009.
- Casas, J.; J. L. Ferrer; D. Garcia; J. Peramau e A. Torday (2010) Traffic Simulation with Aimsun. In: Barceló, J. (eds.) *Fundamentals of Traffic Simulation*. International Series in Operations Research & Management Science, v. 145, p. 173–232. DOI: 10.1007/978-1-4419-6142-6_5.
- Castilho, R. A. (1997) *Análise e Simulação da Operação de Ônibus em Corredores Exclusivos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Castilho, R.; L. A. Lindau e B. Castilho (2005) High Flow Bus Stop in Bus Rapid Transit: Conceptual Analysis and Simulation. *Anais do 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., USA.
- Ceder, A. (2007) *Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice*. Elsevier, Reino Unido. ISBN: 9780750661669
- Duduta, N.; C. Adriazola; C. Wass; D. Hidalgo e L.A. Lindau (2012) *Segurança Viária em Corredores de Ônibus*. Disponível em: <http://www.embarqbrasil.org/node/565> Acesso em: 01/06/2012.
- Federal Transit Administration (2009) *Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making*, Project No. FTA-FL-26-7109.2009. Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation. Disponível em: <<http://www.nbtri.org/CBRT.html>>. Acesso em: 20/11/2010.
- Fernandez, R. e R. Planzer (2002) On the Capacity of Bus Transit System. *Transport Reviews*, v. 22, n. 3, p. 267–293. DOI:10.1080/01441640110106328.
- Furth, P. e A. B. Rahbee (2000) Optimal Bus Stop Spacing through Dynamic Programming and Geographic Modeling. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1731, p. 15–22. DOI:10.3141/1731-03.
- Gardner, G.; P. R. Cornwell e J. A. Cracknell (1991) *The Performance of Busway Transit in Developing Cities*. TRRL Report 329. Transportation and Road Research Laboratory, Crowthorne, Reino Unido. ISSN 0266-5247.
- Gipps, P. G. (1981) A Behavioral Car-Following Model for Computer Simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 15, p. 105–111. DOI:10.1016/0191-2615(81)90037-0
- Janos, M. e P. Furth (2002) 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*, v. 1811, p. 157–165. DOI:10.3141/1811-19.
- Kittlenson & Associates, Inc.; KFH Group, Inc.; Parsons Brinckerhoff Quade & Douglass, Inc e K. Hunter-Zaworski (2003) Transit Capacity and Quality of Service Manual (2^a ed.). *Transit Cooperative Research Program: Report 100*, Transportation Research Board, Washington, D. C., USA.
- Kostanjsek, J. e Lipar, P. (2007) Pedestrian Crossings Priority for Pedestrian Safety. *Anais do 3rd Urban Street Symposium*, Seattle, Washington, USA, 1 CD-ROM.
- Levinson, H.; S. Zimmerman; J. Clinger; S. Rutherford; R. L. Smith; J. Cracknell e R. Soberman (2003) Bus Rapid Transit, Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit. *Transit Cooperative Research Program: Report 90*, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Lindau, L. A. e L. G. Willumsen (1990) 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, França, Paradigme, p. 127–142.
- Lindau, L. A.; F. D. Michel; J. L. D. Ribeiro e F. Kuhn (1997) Modelando o Desempenho Operacional de Busways e Tramways. *EGATEA, Revista da Escola de Engenharia da UFRGS*, Porto Alegre, v.25, n.3, p. 67–76.
- Lindau, L.A.; B. Castilho; R. Castilho e N. M. O. Peixoto (2003) Simulação da Operação de Sistema Prioritário para Ônibus: O Caso de uma Estação de Transferência. *Anais do 14^o Congresso da Associação Nacional de Transportes Públicos*, ANTP, Vitória, v. 1. p. 1–12.
- Liu, R. (2003) *DRACULA Traffic Model User Manual, Version 2.0*. ITS, University of Leeds, Reino Unido.
- Mercedes-Benz do Brasil (1987) *Sistemas de Transporte Coletivo Urbano por Ônibus: Planejamento e Operação*. São Bernardo do Campo, SP, Brasil.
- Pereira, B. M. (2011) *Avaliação do Desempenho de Configurações Físicas e Operacionais de Sistemas BRT*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Pereira, B. M.; L. A. Lindau e R. A. Castilho (2010) A Importância de Simular Sistemas Bus Rapid Transit. *Anais do XVI Congresso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano*, CLATPU, Ciudad de México, México, v. 1, . p. 1-11.
- Sirivadidurage, S. P. K.; N. Hounsell, e T. Cherrett (2007) Evaluating Bus Priority and Queue Relocation Techniques of Presignals. *Anais do 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D. C., USA, CD-ROM, Paper n.07-0495.
- Vuchic, V. (2005) *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. ISBN: 978-0-471-63265-8
- Vuchic, V. (2007) *Urban Transit: Systems and Technology*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. DOI:10.1002/9780470168066.
- Wilson, R. E. (2001) An Analysis of Gipps' Car-Following Model of Highway Traffic. *IMA Journal on Applied Mathematics*. v. 66, n. 5, p. 509–537. DOI:10.1093/imamat/66.5.509.
- Wright, L. e W. Hook (2007) *Bus Rapid Transit Planning Guide* (3^a ed.). Institute for Transport and Development Policy, New York, NY, USA.