

# Modelo e controle da operação de um sistema BRT com segmento de faixa exclusiva única bidirecional

Luiz Alberto Koehler<sup>1</sup>, Eduardo Camponogara<sup>2</sup> e Werner Kraus Jr.<sup>3</sup>

**Resumo:** Este trabalho apresenta o modelo e estratégia de controle de um sistema BRT (*Bus Rapid Transit*) que tem como principal característica a presença de segmento(s) de faixa exclusiva única para ambos os sentidos de deslocamento dos ônibus (segmentos bidirecionais). Este diferencial, dadas as restrições associadas ao alto grau de adensamento das áreas urbanas, permite uma menor ocupação de espaço físico e menor ocupação das vias convencionais por parte dos ônibus, podendo muitas vezes representar a viabilidade ou não da implementação de sistemas BRT. São apresentados o modelo e uma estratégia de controle em tempo real para operação do sistema BRT proposto, aqui denominado CIRSO (Controle Integrado de Retenção e Sequenciamento dos Ônibus). O modelo matemático utilizado é determinístico, representado por uma função custo e restrições, sendo as variáveis de controle o tempo ótimo de retenção dos ônibus nos pontos e o controle do sequenciamento dos ônibus através do(s) segmento(s) bidirecional(ais). Resultados de simulação mostram a viabilidade e eficiência do modelo do sistema BRT e da estratégia de controle CIRSO aqui propostos.

*Palavras-chave:* faixa exclusiva para ônibus, faixa bidirecional para ônibus, BRT, controle do espaçamento.

**Abstract:** This paper presents a model and control strategy for a BRT (*Bus Rapid Transit*) system which has as its main distinguishing characteristic the presence of segments with only one exclusive lane for both directions of bus movement (bidirectional segments). This feature, given the constraints associated with high density urban areas, allows for a smaller physical footprint and lower occupancy of the conventional ways by buses and can often represent the only feasible alternative of the implementation of a BRT system. The model and a control strategy for real time operation of the proposed BRT system are presented, here called CIRSO (Integrated Control of Retention and Sequencing of the Buses). The mathematical model used is deterministic, represented by a cost function and constraints. The control variables are the optimum holding time of buses at stops and control of bus sequencing through the bidirectional segments. Simulation results show the feasibility and efficiency of the BRT system model and CIRSO control strategy here proposed.

*Keywords:* exclusive bus way, bidirectional bus lane, bus rapid transit, holding control.

## 1. INTRODUÇÃO

A implantação de um sistema de transporte público de massa e de qualidade é uma necessidade cada vez mais presente nas cidades de médio e grande porte, representando um serviço vital com enorme impacto e significado social. Uma alternativa cada vez mais utilizada é a implantação de sistemas do tipo BRT, que apresentam, além de alta qualidade, características de flexibilidade e baixo custo de implantação e manutenção, tornando-se muitas vezes a única opção economicamente viável.

Entretanto, a implantação de sistemas BRT geralmente encontra restrições associadas ao alto grau de adensamento das áreas urbanas, tornando em muitos casos, inviável a implantação de faixas exclusivas para os ônibus nos dois sentidos em todo o percurso. Assim, a utilização de segmentos de faixa exclusiva única para ambos os sentidos de deslocamento dos ônibus (segmentos bidirecionais), não simultâneos, em pontos críticos do percurso, pode representar a única solução técnica e economicamente viável.

Um problema típico relativo à operação de sistemas BRT é o desvio dos ônibus em relação ao plano de horários e ou espaçamento (*headway*), causado por variações probabilísticas no tempo de embarque e desembarque de passageiros nos pontos e ou velocidade dos ônibus ao longo da rota. Este desvio ou instabilidade faz com que os ônibus acabem se agrupando e formando pelotões (efeito *bunching*), o que implica num aumento do tempo de espera dos usuários do sistema de transporte público, além de custos adicionais aos prestadores do serviço.

Estes possíveis desvios podem e devem ser minimizados através de uma estratégia de controle em tempo real, de forma a otimizar o desempenho do sistema. Dentre as várias estratégias utilizadas, no caso de um serviço com alta frequência de ônibus, pode-se destacar a retenção ou *hold*, que consiste em reter o(s) ônibus no(s) ponto(s) por determinado tempo, buscando com isso reduzir a variação no espaçamento entre estes e diminuir o atraso dos usuários do sistema.

Como exemplo de um cenário real que utiliza segmentos bidirecionais pode-se citar o sistema BRT de Eugene-Springfield, Oregon (*Lane Transit Agency*), que opera num percurso de aproximadamente 6,4 km, sendo 4,8 km de segmento bidirecional de faixa exclusiva única, com espaçamento típico entre ônibus no horário de pico de aproximadamente 15 minutos. O controle do sequenciamento dos ônibus através do segmento bidirecional é feito através de semaforização convencional, com temporização fixa de 16 minutos de fase verde para os ônibus em cada sentido, alternadamente. Segundo análise, a principal causa dos atra-

<sup>1</sup> Luiz Alberto Koehler, Departamento de Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, SC, Brasil. (e-mail: luiz@furb.br).

<sup>2</sup> Eduardo Camponogara, Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. (e-mail: camponog@das.ufsc.br).

<sup>3</sup> Werner Kraus Jr., Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. (e-mail: werner@das.ufsc.br).

Manuscrito recebido em 29/4/2011 e aprovado para publicação em 7/7/2011. Este artigo é parte de TRANSPORTES v.19, n.3, 2011. ISSN: 2237-1346 (online).

os é função da falta de uma coordenação ou controle tempo-real da operação dos ônibus (Li *et al.*, 2009a), dada a ineficiência do sistema com temporização semafórica fixa.

Trabalhos anteriores relativos a sistemas BRT com segmentos bidirecionais são bastante escassos, podendo-se citar Li *et al.* (2009a), Li *et al.* (2009b) e Tsao *et al.* (2009). O trabalho de Li *et al.* (2009a,b) apresenta uma estratégia de controle tempo-real para operação de um sistema tipo BRT no cenário (potencial) Bay Area, Califórnia. O cenário (simulação) é constituído de 8 pontos, num percurso (não fechado) de aproximadamente 21 km com faixa exclusiva única bidirecional. As restrições associadas ao modelo permitem que somente um ônibus transite em cada segmento bidirecional entre pontos em determinado sentido e que o encontro entre ônibus em sentidos contrários se dá somente nos pontos. O modelo utilizado é apresentado na forma de um problema de otimização ou programação matemática inteira mista, com a função custo representando os atrasos associados ao tempo de viagem dos ônibus e tempo de permanência dos ônibus nos pontos. O algoritmo utilizado para solução do problema de otimização é do tipo *branch-and-bound*. A capacidade dos ônibus, o modelo de chegada dos passageiros aos pontos, o tempo de embarque e desembarque de passageiros e o número de passageiros nos pontos e embarcados não são considerados.

Os resultados apresentados por Li *et al.* (2009a,b), para o cenário Bay Area utilizado, mostram a eficiência da proposta de estratégia de controle tempo-real do sistema BRT com segmento bidirecional quando comparado com o mesmo cenário e utilização de duas faixas unidirecionais exclusivas, uma para cada sentido. Entretanto, à medida que o espaçamento entre os ônibus diminui, no caso apresentado para espaçamentos menores ou iguais a 20 minutos, a solução tempo-real mostra-se inviável em função do elevado tempo de CPU para obtenção da solução quase ótima.

Neste contexto, este trabalho propõe uma estratégia de controle tempo real para sistemas BRT que permita o controle simultâneo ou integrado da retenção dos ônibus nos pontos (*hold*) e do sequenciamento dos ônibus através do(s) segmento(s) bidirecional(ais), com uma série de diferenciais. O modelo e estratégia propostos, aqui denominado CIRSO (Controle Integrado de Retenção e Sequenciamento dos Ônibus), tem por objetivos a possibilidade de utilização de segmentos de faixa exclusiva única bidirecional e uma

maior eficiência na operação tempo-real de sistemas BRT.

Nas seções seguintes são apresentados:

- o modelo e estratégia de controle do sistema BRT proposto, ou CIRSO;
- um estudo de caso via simulação, da aplicação do CIRSO num cenário BRT com segmento bidirecional; e
- análise dos resultados e aplicabilidade do CIRSO.

## 2. MODELO DO SISTEMA CIRSO

O modelo aqui utilizado considera um sistema de transporte urbano tipo BRT, constituído de dois circuitos de faixa exclusiva única unidirecional (sentido único para os ônibus) ligados por um segmento de faixa exclusiva única bidirecional (duplo sentido para os ônibus), conforme indicado na Figura 1.

Assume-se a disponibilidade das seguintes informações do sistema BRT:

- o instante de partida dos ônibus do último ponto visitado (e anteriores se necessário);
- índice do último ponto visitado pelo ônibus (e anteriores se necessário); e
- número de passageiros embarcados nos ônibus na saída do último ponto visitado.

Consideram-se os seguintes dados históricos:

- taxa de chegada de passageiros nos pontos;
- fração de passageiros embarcados nos ônibus que desembarcam em cada ponto;
- parâmetros ou constantes de embarque e desembarque de passageiros nos pontos; e
- tempo nominal de viagem dos ônibus entre pontos.

O modelo é sujeito às seguintes aproximações e limitações:

- a capacidade dos ônibus não é considerada (não existe resíduo de fila de passageiros nos pontos);
- o tempo de viagem dos ônibus entre pontos é aproximado pelo valor nominal;
- o tempo de embarque e desembarque de passageiros é aproximado por uma função linear (Wilson e Lin, 1992), com o embarque e desembarque ocorrendo por portas distintas;
- a função objetivo considera um horizonte limitado de pontos a jusante de cada ônibus na avaliação do

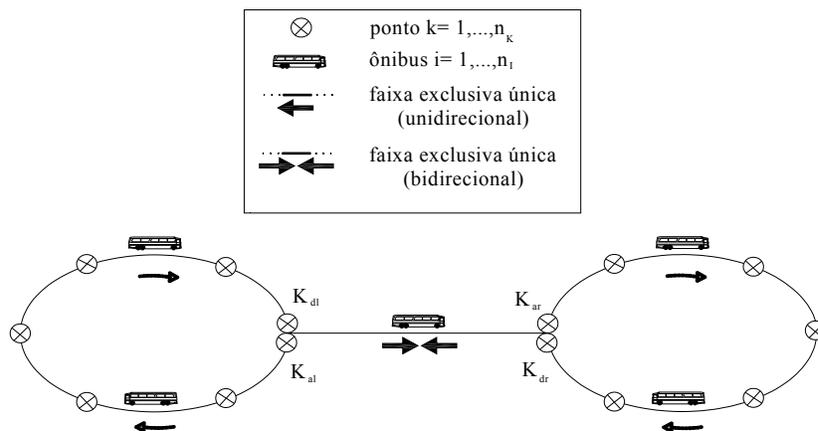


Figura 1. Esquema do sistema BRT (CIRSO) com segmento bidirecional

impacto da ação de controle; e

- a ordem dos ônibus é mantida, sem ultrapassagem entre os ônibus, ou seja, o ônibus  $i-1$  sempre precede o ônibus  $i$ .

Apesar do problema CIRSO em tempo real apresentar uma natureza eminentemente estocástica, este pode ser aproximado, dentro do horizonte de predição considerado, por um modelo determinístico (Eberlein *et al.*, 2001).

O problema CIRSO consiste em determinar quanto, em quais pontos e quais ônibus do sistema BRT devem ser retidos (*holding*) para se minimizar a função custo apresentada e ao mesmo tempo controlar o sequenciamento dos ônibus através do segmento bidirecional. Ou seja, minimizar o atraso dos usuários ou passageiros do sistema BRT para o horizonte de predição considerado. A função custo que representa o atraso do sistema BRT é dada por:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} \left[ \frac{\lambda_k}{2} (d_{i,k} - d_{i-1,k})^2 \right] \quad (1)$$

em que,

- $i$ : índice dos ônibus,  $i=1, \dots, n_i$ ;
- $i-1$ : ônibus anterior ao ônibus  $i$ ;
- $i+1$ : ônibus seguinte ao ônibus  $i$ ;
- $n_i$ : número de ônibus do sistema BRT;
- $I$ : conjunto de ônibus do sistema BRT,  $I=\{1, \dots, n_i\}$ ;
- $k$ : índice dos pontos,  $k=1, \dots, n_k$ ;
- $k-1$ : ponto anterior ao ponto  $k$ ;
- $k+1$ : ponto seguinte ao ponto  $k$ ;
- $n_k$ : número de pontos do sistema BRT;
- $N_i$ : conjunto de pontos pertencentes ao horizonte de predição do ônibus  $i$ ;
- $d_{i,k}$ : instante de partida do ônibus  $i$  do ponto  $k$  [s]; e
- $\lambda_k$ : taxa de chegada de passageiros ao ponto  $k$  [passageiros/s].

Por questão de simplificação de notação, considerar-se-á que o ônibus anterior ( $i-1$ ), o ônibus seguinte ( $i+1$ ), o ponto anterior ( $k-1$ ) e o ponto seguinte ( $k+1$ ) pertencem a mesma volta, dentro do circuito fechado BRT, do ônibus  $i$  e ponto  $k$  em questão. Maiores detalhes do modelo completo que considera a representação da volta podem ser encontrados em Koehler (2009) e Koehler *et al.* (2010).

No modelo determinístico da Equação (1), a função custo determina o atraso dos passageiros nos pontos, para cada um dos ônibus  $i$  do sistema BRT e pontos  $k$  dentro do horizonte de predição  $N_i$  de cada ônibus. O atraso ou tempo de espera do passageiro no ponto é definido como o intervalo de tempo entre a chegada do passageiro ao ponto e a partida deste ponto embarcado no ônibus. Como o tempo médio de espera dos passageiros nos pontos é tipicamente maior do que o tempo de espera dos passageiros embarcados durante a permanência dos ônibus nos pontos, desconsidera-se, por simplificação, o atraso dos passageiros embarcados nos ônibus.

As restrições associadas ao modelo CIRSO estão indicadas da forma seguinte:

$$a_{i,k} = d_{i,k-1} + r_k \quad i \in I, k \in N_i \quad (2)$$

$$s_{i,k}^{emb} = \frac{C_0 + C_1 \lambda_k (a_{i,k} - d_{i-1,k})}{(1 - C_1 \lambda_k)} \quad i \in I, k \in N_i \quad (3)$$

$$s_{i,k}^{des} = C_0 + C_2 q_k l_{i,k-1} \quad i \in I, k \in N_i \quad (4)$$

$$l_{i,k} = \lambda_k (d_{i,k} - d_{i-1,k}) + (1 - q_k) l_{i,k-1} \quad i \in I, k \in N_i \quad (5)$$

em que,

- $q_k$ : fração de passageiros embarcados que desembarcam dos ônibus no ponto  $k$ ;
- $r_k$ : tempo nominal de viagem dos ônibus entre os pontos  $k-1$  e  $k$  [s];
- $a_{i,k}$ : instante de chegada do ônibus  $i$  ao ponto  $k$  [s];
- $l_{i,k}$ : número de passageiros embarcados no ônibus  $i$  quando da partida do ponto  $k$ ;
- $s_{i,k}^{emb}$ : tempo de embarque dos passageiros no ônibus  $i$  no ponto  $k$  [s];
- $s_{i,k}^{des}$ : tempo de desembarque dos passageiros do ônibus  $i$  no ponto  $k$  [s];
- $C_0$ : tempo para o início do embarque e desembarque de passageiros a partir da chegada do ônibus ao ponto [s];
- $C_1$ : tempo gasto para o embarque de cada passageiro nos ônibus [s/passageiro]; e
- $C_2$ : tempo gasto para o desembarque de cada passageiro dos ônibus [s/passageiro].

As restrições das Equações (2) à (5) permitem expressar, para o ônibus  $i$  e ponto  $k$  o instante de chegada do ônibus ao ponto, os tempos de embarque e desembarque de passageiros no ponto e o número de passageiros embarcados no ônibus quando da partida do ponto.

O tempo de parada dos ônibus nos pontos deve ser suficiente para acomodar o embarque e desembarque de passageiros. Supõe-se que estes processos são independentes, com o embarque e desembarque ocorrendo por portas distintas, prevalecendo o processo mais lento. No modelo este comportamento é descrito por:

$$\left. \begin{array}{l} s_{i,k} \geq s_{i,k}^{emb} \\ s_{i,k} \geq s_{i,k}^{des} \\ s_{i,k} \leq s_{i,k}^{emb} + C_3(1 - y_{i,k}) \\ s_{i,k} \leq s_{i,k}^{des} + C_3 y_{i,k} \end{array} \right\} \quad i \in I, k \in N_i \quad (6)$$

$$y_{i,k} \in \{0,1\} \quad i \in I, k \in N_i \quad (7)$$

em que,

- $s_{i,k}$ : tempo máximo entre o processo de desembarque e embarque de passageiros do ônibus  $i$  no ponto  $k$  [s];
- $y_{i,k}$ : variável binária,  $y_{i,k} \in \{0,1\}$ ; e
- $C_3$ : constante positiva suficientemente grande.

As restrições (6) e (7) determinam a operação mais lenta dentre as operações de embarque e desembarque de passageiros, utilizando-se da variável binária  $y_{i,k}$ . Caso  $y_{i,k}$  igual a 1 o tempo de embarque é maior que o tempo de desembarque e caso  $y_{i,k}$  igual a 0 o tempo de desembarque é maior que o tempo de embarque.

O instante de partida dos ônibus dos pontos é dado pelas seguintes restrições:

$$d_{i,k} = a_{i,k} + s_{i,k} + h_{i,k} \quad i \in I, k \in N_i \quad (8)$$

$$d_{i,k} \leq d_{i+1,k-1} + r_k - e_{min} \quad i \in I, k \in N_i \quad (9)$$

$$h_{i,k} \leq h_{max} \quad i \in I, k \in N_i \quad (10)$$

em que,

- $h_{i,k}$ : tempo de retenção do ônibus  $i$  no ponto  $k$  [s];
- $e_{min}$ : espaçamento temporal mínimo permitido entre os ônibus [s]; e
- $h_{max}$ : tempo máximo de retenção dos ônibus nos pontos [s].

As restrições (8), (9) e (10) especificam o instante de partida do ônibus do ponto, o instante máximo de partida do ônibus do ponto para evitar ultrapassagem ou encontro com o ônibus seguinte e o limite máximo para retenção do ônibus no ponto.

Adicionalmente, o conflito de uso do segmento bidirecional é modelado pelo instante de partida dos pontos em cada uma das extremidades do segmento, conforme segue:

$$\left. \begin{aligned} d_{i,k_{dl}} &\geq a_{j,k_{dl}} - C_4 x_{i,j} \\ d_{j,k_{ar}} &\geq a_{i,k_{ar}} - C_4 (1 - x_{i,j}) \end{aligned} \right\} \quad i, j \in I (i \neq j), \text{ tal que} \quad (11)$$

$$k_{dl}, k_{ar} \in N_i, k_{dr}, k_{al} \in N_j$$

$$x_{i,j} \in \{0,1\} \quad i, j \in I \quad (12)$$

em que,

- $k_{dl}$ : ponto de partida dos ônibus à esquerda do segmento bidirecional;
- $k_{dr}$ : ponto de partida dos ônibus à direita do segmento bidirecional;
- $k_{ar}$ : ponto de chegada dos ônibus à direita do segmento bidirecional;
- $k_{al}$ : ponto de chegada dos ônibus à esquerda do segmento bidirecional;
- $x_{i,j}$ : variável binária,  $x_{i,j} \in \{0,1\}$ ; e
- $C_4$ : constante positiva suficientemente grande.

As restrições das Equações (11) e (12) restringem o uso da faixa exclusiva única bidirecional a um determinado sentido por vez, sem limitação da passagem de vários ônibus seguidos num determinado sentido. A variável binária  $x_{i,j}$  é igual a 1 se o ônibus  $i$  atravessa o segmento bidirecional no sentido  $k_{dl}$  em direção a  $k_{ar}$  antes que o ônibus  $j$  atravessasse o segmento bidirecional no sentido  $k_{dr}$  em direção a  $k_{al}$ . Caso contrário a variável binária  $x_{i,j}$  é igual a 0.

Por último especifica-se a natureza positiva das variáveis:

$$a_{i,k}, d_{i,k}, l_{i,k}, s_{i,k}, h_{i,k}, r_{i,k} \geq 0 \quad i \in I, k \in N_i \quad (13)$$

Conforme verificado, as restrições apresentadas são lineares. Alguns diferenciais presentes no modelo apresentado em relação a outros trabalhos são:

- possibilidade do controle de retenção em todos os pontos do horizonte de predição considerado, Equações (1) e (8);

ções (1) e (8);

- utilização de restrição de ultrapassagem entre ônibus e espaçamento mínimo, Equação (9);
- utilização de restrição de retenção máxima dos ônibus nos pontos, Equação (10);
- utilização de segmentos de faixa exclusiva única bidirecionais com controle integrado de retenção e sequenciamento dos ônibus, Equações (11) e (12).

## 2.1. Características do CIRSO

Conforme indicado na Equação (1), a função custo é convexa e as restrições são lineares com a presença de variáveis binárias. Portanto, o problema caracteriza-se como um problema de programação matemática linear inteira mista. Vários outros trabalhos que abordam o tema controle de retenção, como por exemplo Eberlein *et al.* (2001), Hickman (2001) e Zolfaghari *et al.* (2004), também não consideram o atraso dos passageiros embarcados no ônibus na função custo, o que garante a convexidade. Além disto, do ponto de vista prático, existem uma série de dificuldades associadas à medição do número de passageiros embarcados. Outros, como Sun e Hickman (2004), consideram somente o processo de embarque de passageiros nos ônibus, o que elimina o conjunto de inequações lineares associada à escolha do processo mais lento, embarque ou desembarque. Entende-se neste trabalho que para um modelo realista do sistema BRT, a possibilidade de escolha entre o processo de embarque e desembarque de passageiros não deve ser desprezada.

## 2.2. Ação de controle de retenção $h_{i,k}$

As ações de controle de retenção  $h_{i,k}$  realmente implementadas estão relacionadas com o primeiro ponto  $k$  de cada ônibus  $i$  dentro do horizonte de predição, ou  $N_i^{N=1}$ . As demais ações de controle de retenção  $h_{i,k}$  relativas a pontos  $N_i^{N>1}$ , apesar de consideradas na função custo, não são implementadas, visto que são uma projeção futura da ação de controle. Uma vez implementada as ações de controle de retenção para  $N_i^{N=1}$ , os valores iniciais de  $d_{i,k}$  e  $l_{i,k}$  relativos aos últimos pontos visitados pelos ônibus são atualizados e novas ações de controle são calculadas para o novo horizonte de predição  $N_i$  considerado. E assim sucessivamente. Isto é, considera-se um horizonte de predição rolando com atualização dos valores iniciais de  $d_{i,k}$  e  $l_{i,k}$  e novo cálculo das ações de controle de retenção  $h_{i,k}$ .

## 2.3. Sequenciamento dos ônibus

O sequenciamento dos ônibus através do segmento de faixa exclusiva única bidirecional, ou seja, a garantia de não ocupação simultânea do segmento bidirecional com ônibus em sentidos contrários, é garantida pelas restrições das Equações (11) e (12). Como pode ser observado, não há restrições quanto a passagem de mais de um ônibus seguido em determinado sentido através do segmento bidirecional. O cruzamento dos ônibus em sentidos contrários, se for o caso, se dá nos pontos nas extremidades do segmento bidirecional. Importante destacar que deve-se definir e nomear

os pontos associados ao segmento bidirecional,  $k_{dl}$ ,  $k_{dr}$ ,  $k_{al}$  e  $k_{ar}$ .

### 3. ESTUDO DE CASO

Com o objetivo de analisar a eficiência da estratégia CIRSO aqui proposta, estuda-se o exemplo apresentado a seguir. O cenário é constituído de um sistema BRT em circuito fechado de faixa exclusiva e presença de segmento bidirecional, semelhante ao circuito da Figura 1, mas com 30 pontos e 8 ônibus. O objetivo é o cálculo simultâneo e integrado da ação de controle de retenção  $h_{i,k}$  e do sequenciamento dos ônibus através do segmento bidirecional, considerando-se um horizonte  $n_N$  de 14 pontos de previsão a jusante de cada ônibus. A solução ótima implica no menor custo (mínimo global) da operação do sistema BRT, conforme Equação (1). Os dados do sistema BRT utilizados para a simulação são:  $n_I=8$ ,  $n_K=30$ ,  $n_N=14$ ,  $C_0=12$ ,  $C_1=0,48$ ,  $C_2=0,42$ ,  $e_{min}=0$  [s],  $h_{max}=\infty$  [s],  $\lambda(k)=0,1$  para todos os pontos  $k$ ,  $r(k)=60$  para todos os pontos  $k$  com exceção de  $r(13)=r(30)=120$  (cenário 1) e 240 (cenário 2),  $q(k)=0,3$  para todos os pontos  $k$ . Para o circuito considerado, o ponto de partida do lado esquerdo do segmento bidirecional é o ponto  $k_{dl}=12$ , o ponto de chegada do lado direito é  $k_{ar}=13$ , o ponto de partida do lado direito é  $k_{dr}=29$  e o de chegada do lado esquerdo é  $k_{al}=30$ . Os pontos 1 até 11 pertencem

ao circuito unidirecional esquerdo e os pontos 14 até 28 ao circuito unidirecional direito. As matrizes  $D_{i,k}^*$  [s] e  $L_{i,k}^*$  [s] (Figura 2) contém os valores iniciais de  $d_{i,k}$  e  $l_{i,k}$  (valores não especificados = “-”), onde as linhas representam os ônibus  $i$  e as colunas os pontos  $k$  dentro do circuito fechado do sistema BRT.

Conforme observado a partir da matriz  $D_{i,k}^*$  e de  $r(k)$  o espaçamento típico entre os ônibus é de aproximadamente 6 minutos. A utilização do CIRSO na solução do problema de controle em tempo real da operação do sistema BRT com segmento bidirecional aqui apresentado, leva aos resultados para a variável controle de retenção  $h_{i,k}$  conforme indicado na Tabela 1. São apresentados os resultados para dois cenários distintos relativos ao tempo de percurso do segmento bidirecional (entre os pontos 12–13 e 29–30) ou unidirecionais equivalentes (caso usual).

A Tabela 2 apresenta um comparativo entre as estratégias CIRSO (caso segmento bidirecional) e caso usual (segmentos unidirecionais) para o custo ou atraso total dos usuários do sistema BRT, conforme Equação (1), para um horizonte de previsão  $n_N$  de 14 pontos para cada ônibus. São apresentados os resultados para os cenários 120 e 240 s.

Como pode ser observado na Tabela 2, a utilização de segmento bidirecional conjuntamente com a estratégia

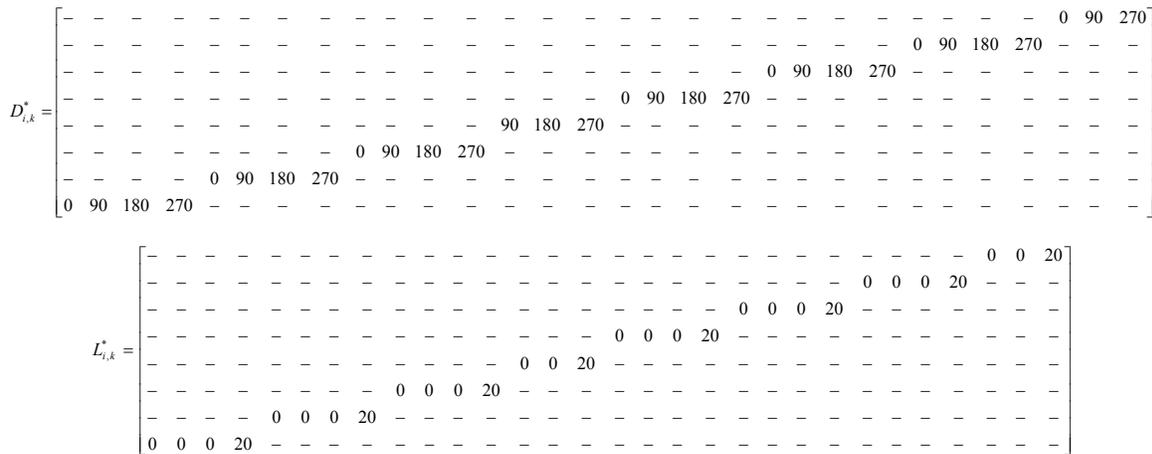


Figura 2. Matrizes  $D_{i,k}$  e  $L_{i,k}$

Tabela 1. Ações de controle de retenção para o caso bidirecional (CIRSO) e dois segmentos unidirecionais equivalentes (caso usual) considerando dois cenários

Tempo de percurso do segmento bidirecional ou unidirecional [s](cenário)	Ação de controle de retenção $h_{i,k}$ (volta) [s]	
	Caso bidirecional CIRSO	Caso unidirecional
120	$h_{i,k}$ (volta)=0	$h_{i,k}$ (volta)=0
	$h_{1,1}$ (volta2)=102,1	
	$h_{1,2}$ (volta2)=1,5	
	$h_{1,5}$ (volta2)=5,3	
	$h_{2,28}$ (volta1)=58,6	
	$h_{3,24}$ (volta1)=96,5	
	$h_{3,29}$ (volta1)=67,9	
	$h_{5,16}$ (volta1)=21,0	
	$h_{7,9}$ (volta1)=46,9	
	$h_{7,12}$ (volta1)=68,9	
	$h_{8,5}$ (volta1)=63,4	
	$h_{8,9}$ (volta1)=24,6	$h_{1,1}$ (volta2)=25,8
240	$h_{8,12}$ (volta1)=277,4	$h_{5,16}$ (volta1)=30,4

**Tabela 2.** Atraso total dos usuários do sistema BRT (para  $n_N = 14$ )

Cenário [s]	Atraso total BRT [s]	
	Caso bidirecional CIRSO	Caso unidirecional
120	683.195	683.195
240	1.045.320 (+25,4%)	833.749

CIRSO permitiu, para o horizonte considerado, uma operação do sistema BRT com custo igual ou 25,4% superior, cenários 120 e 240 s respectivamente. Vale ressaltar que no CIRSO o controle de retenção implica também no controle do sequenciamento dos ônibus através do segmento bidirecional de faixa única e duplo sentido.

#### 4. CONCLUSÕES

A utilização de segmento(s) bidirecional(ais) em sistemas BRT pode representar, em muitos casos, considerando-se a importância da utilização de faixas exclusivas, a viabilidade ou não da implantação do sistema. Neste contexto a estratégia CIRSO aqui apresentada, baseada no controle simultâneo integrado do espaçamento e sequenciamento dos ônibus através de segmento(s) bidirecional(ais), permite a implantação de sistemas BRT com menor custo em termos de ocupação urbana e de infraestrutura.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, para o cenário proposto, a viabilidade de utilização da estratégia CIRSO está diretamente associada à relação entre o espaçamento nominal dos ônibus e o tempo de percurso do segmento bidirecional. Ou seja, quanto maior a relação entre o espaçamento nominal e o tempo de percurso do segmento bidirecional, menor o impacto da utilização de segmentos bidirecionais em relação a dois segmentos unidirecionais. Nos cenários apresentados, para um espaçamento típico de 360 s entre ônibus, o tempo de percurso do segmento bidirecional de 120 s resultou em aumento de custo zero, enquanto o tempo de percurso de 240 s aumentou o custo em 25,4%. Tempos de percurso ainda maiores levam a uma solução infactível. Importante ressaltar que os resultados apresentados valem para o exemplo e cenários utilizados e variam para cenários distintos. Entretanto, para outros cenários testados a solução via CIRSO também apresentou resultados tão positivos quanto os aqui apresentados.

O tempo de processamento da estratégia de controle CIRSO, com programa escrito em AMPL e executado via NEOS, foi de poucos segundos, compatível com aplicações tempo real. Em casos críticos uma solução poderia ser a diminuição do tempo de processamento através da redução do número de variáveis binárias via limitação do horizonte de predição dos ônibus e a utilização de software de otimização mais eficiente, como o IBM ILOG-CPLEX para programação linear inteira-mista.

A utilização de segmentos bidirecionais e estratégia CIRSO parece perfeitamente viável para aplicação em cenários reais, tendo como principal parâmetro a ser analisado em termos de viabilidade de implantação, a relação entre o espaçamento nominal dos ônibus e o tempo de percurso do(s) segmento(s) bidirecional(ais).

Como trabalhos futuros, sugere-se a inclusão do atraso

dos passageiros embarcados na função custo e utilização do procedimento conforme descrito em Koehler (2009) para solução do problema não convexo.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Eberlein, X. J.; N. Wilson e D. Bernstein (2001) The Holding Problem with Real-Time Information Available. *Transportation Science*, v. 35, n. 1, p. 1–18.
- Hickman, M. (2001) An Analytic Stochastic Model for the Transit Vehicle Holding Problem. *Transportation Science*, v. 35, n. 3, p. 215–237.
- Li, J. Q.; M. K. Song; M. Li e W. B. Zhang (2009a) Planning for Bus Rapid Transit in Single Dedicated Bus Lane. *Transportation Research Record*, n. 2111, p. 76–82.
- Li, J. Q.; M. K. Song; M. Li; W. B. Zhang e M. Miller (2009b) *Evaluation of Cost-Effective Planning and Design Options for Bus Rapid Transit in Dedicated Bus Lanes*. California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2009-14.
- Koehler, L. A. (2009) *Controle Integrado de Prioridade e Retenção para Operação de Sistemas de Transporte Público*. Tese (doutorado), PGEEL, UFSC, Florianópolis, Brasil.
- Koehler, L. A.; E. Camponogara e W. Kraus Jr. (2010) Operação Tempo Real de um Sistema BRT via Controle Integrado do Espaçamento e Velocidade dos Ônibus. *XVI PANAM Book of Abstracts*, XVI PANAM, Lisboa, Portugal.
- Sun, A. e M. Hickman (2004) The Holding Problem at Multiple Holding Stations. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, San Diego, California, USA.
- Tsao, H-S. J.; W. Wei e A. Pratama (2009) Operational Feasibility of One-Dedicated-Lane Bus Rapid Transit/Light Rail Systems. *Transportation Planning and Technology*, v. 32, n. 3, p. 239–260.
- Wilson, N. H. M. e T. Lin (1992) Dwell Time Relationships for Light Rail Systems. *Transportation Research Record*, n. 1361, p. 287–295.
- Zolfaghari, S., N. Azizi e M. Y. Jaber (2004) A Model for Holding Strategy in Public Transit Systems with Real-Time Information. *International Journal of Transport Management*, v. 2, n. 2, p. 99–110.