

CONTROLE DE RETENÇÃO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO

Luiz Alberto Koehler

Universidade Regional de Blumenau
Depto. de Eng. Elétrica e de Telecomunicações

Werner Kraus Jr.

Eduardo Camponogara

Universidade Federal de Santa Catarina
Depto. de Automação e Sistemas

RESUMO

Este trabalho apresenta uma estratégia de controle de retenção para um sistema de transporte urbano tipo expresso ou BRT. O modelo utilizado é determinístico e pressupõe informações em tempo real e dados históricos do sistema. A partir destes dados calcula-se o tempo de retenção ótimo de cada ônibus para os pontos dentro do horizonte considerado. O objetivo é a minimização do atraso total dos passageiros, representado por uma função custo quadrática com uma parcela linear. O modelo utilizado e a heurística adotada na instanciação do problema de otimização apresentam várias vantagens em relação a outros trabalhos da literatura, tais como a complexidade computacional reduzida e a convexidade da função custo. Um exemplo numérico ilustra a aplicação do método.

ABSTRACT

A holding strategy for the control of a BRT urban transportation system is presented. The model developed is deterministic and assumes availability of real-time information and historical data of the system. From these data the optimal holding time for each vehicle in different stops is evaluated for a given time horizon. The objective is to minimize total passenger delay which is represented by a quadratic cost function combined with a linear term. Both the model and the heuristic used in the instantiation of the optimization problem present advantages when compared to other approaches in the literature such as reduced computational complexity and convexity of the cost function. A numerical example illustrates the application of the method.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transporte público representa, atualmente, um serviço vital, com grande número de usuários e considerável significado social. Este serviço permite uma redução significativa dos congestionamentos de veículos além de outros benefícios associados, tornando-se essencial para a preservação e revitalização das áreas urbanas. No caso do modal ônibus, podem-se citar ainda as características de alta flexibilidade e baixo custo de implantação e manutenção quando comparado com o transporte sobre trilhos.

Na prática verifica-se com frequência uma operação inadequada do serviço de transporte público, caracterizada através do agrupamento dos VTP (veículos de transporte público) e desvios no plano de horários e intervalo entre VTP. Estes fatores implicam num aumento do tempo de espera e viagem dos passageiros. Uma solução para os problemas citados é a utilização de uma política baseada em estratégias de controle da operação do sistema de transporte público.

Enquanto o planejamento operacional é responsável por solucionar problemas de natureza persistente e contínua através da reestruturação de rotas e planos de horário, a operação tempo real têm por objetivo responder de forma imediata a possíveis e esporádicas perturbações no serviço, de forma a otimizar o desempenho do sistema (Turnquist e Blume, 1980). Desvios no serviço impõem custos aos prestadores do serviço na forma de queda de produtividade e aos usuários na forma de aumento do tempo de viagem, aumento no tempo de espera nos pontos e incertezas nos horários.

Neste trabalho propõe-se uma estratégia de controle tempo real do intervalo ou espaçamento

(“headway”) entre VTP para um sistema de transporte tipo expresso ou BRT (“Bus Rapid Transit”). O objetivo é a minimização do atraso dos usuários do sistema. Como diferencial em relação a trabalhos anteriores (Eberlein *et al.*, 1999; O’ Dell e Wilson, 1999; Eberlein *et al.*, 2001; Sun e Hickman, 2004; Zolfaghari *et al.*, 2004), este trabalho apresenta várias particularidades em relação ao modelo utilizado e à heurística adotada para solução do problema.

2. OPERAÇÃO EM TEMPO REAL DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

As principais estratégias de controle em tempo real aplicadas a sistemas de transporte urbano são: retenção ou “holding”; salto de pontos ou “stop skipping”; retorno antecipado ou “short-turning”; sempre avante ou “dead-heading”; expresso e VTP extra.

Na prática, a utilização de estratégias do tipo salto de ponto, sempre avante e retorno antecipado não são bem vistas pelas agências de trânsito, isto em virtude da reação negativa dos passageiros em relação ao salto de pontos e necessidade de desembarque “forçado” do VTP (Strathman *et al.*, 2001). Para um serviço normal sujeito a pequenos desvios e pequenas perturbações no plano de horários ou espaçamento entre VTP, as estratégias mais empregadas são a prioridade para VTP nas sinalizações e retenção nos pontos (Zolfaghari *et al.*, 2004; Koehler e Kraus, 2006a; Koehler e Kraus, 2006b). Este trabalho está focado na estratégia de retenção, descrita a seguir.

2.1. Estratégia de Controle Tipo Retenção

A necessidade de controlar o movimento dos VTP ao longo das rotas e pontos deve-se a instabilidade natural do intervalo ou espaçamento entre estes. Esta instabilidade é causada por variações probabilísticas no tempo de embarque/desembarque dos passageiros nos pontos (devido a variações no número de passageiros) e ou velocidades ao longo da rota (devido a variações no volume de tráfego) (Lin *et al.*, 1995). Esta instabilidade faz com que os VTP acabem se agrupando e formando pelotões (efeito “bunching”).

A estratégia de controle tipo retenção consiste em reter o VTP por determinado tempo nos pontos, buscando com isso reduzir a variação no espaçamento (ou intervalo) entre estes. Osuna e Newell (apud Bukkapatnam *et al.*, 2003) concluíram que o tempo de espera dos passageiros nos pontos diminui com o aumento da regularidade do espaçamento e que o valor é mínimo para variação zero em relação ao espaçamento nominal. Estas duas conclusões são a base para as estratégias de retenção.

O controle do espaçamento via retenção dos VTP nos pontos é mais indicado para rotas operando com espaçamentos pequenos e uniformes. Neste caso os passageiros não estão preocupados com o horário de chegada dos VTP aos pontos. (Abkowitz e Engelstein, 1984; Lin *et al.*, 1995). Esta característica implica na utilização de um modelo de chegada dos passageiros nos pontos representado por uma taxa constante.

2.2. Classificação das Estratégias de Controle Tipo Retenção

As estratégias de retenção podem ser classificadas em dois grupos (Zolfaghari *et al.*, 2004):

- controle baseado no valor limite: manutenção de um espaçamento entre VTP constante, onde o VTP, após o embarque e desembarque de passageiros, é retido no ponto se o espaçamento está abaixo do tempo especificado. Neste caso o VTP é retido

até o espaçamento ser restaurado e então despachado. Se após o embarque e desembarque de passageiros o espaçamento está acima do tempo especificado o VTP é despachado imediatamente;

- modelo de programação matemática: utiliza como variável de decisão o tempo de retenção dos VTP nos pontos e, como função custo a ser minimizada, o tempo de atraso dos passageiros. Estes modelos geralmente incluem dados da operação do transporte público como tempo de parada dos VTP nos pontos, processos de embarque e desembarque dos passageiros, limites de espaçamento e restrições de capacidade (Desaulniers e Hickman, 2003).

Conforme citado por Eberlein *et al.* (2001), vários estudos anteriores a partir de 1972 abordaram a estratégia de retenção baseada no valor limite. A maioria destes não considera informações em tempo real, ignora os efeitos do tempo de embarque/desembarque de passageiros na variação do espaçamento entre VTP e desconsidera várias restrições relacionadas ao tempo de partida e ultrapassagem dos VTP. Devido à complexidade do problema de retenção, somente modelos analíticos bastante simplificados foram utilizados. De forma geral, os resultados apresentados concluem que estes modelos utilizados para controle da retenção não são muito eficientes.

Nos sistemas de controle de tráfego e de transporte público modernos, com a utilização de tecnologias do tipo “AVL” (localização automática de veículos), “AVI” (identificação automática de veículos), “APC” (contagem automática de passageiros) e outras, uma abordagem em tempo-real se faz possível e desejável.

O primeiro trabalho neste sentido foi apresentado por Eberlein *et al.* (1999), podendo-se citar ainda os trabalhos de O’ Dell e Wilson (1999), Eberlein *et al.* (2001), Sun e Hickman (2004) e Zolfaghari *et al.* (2004), dentre outros.

No trabalho apresentado por Eberlein *et al.* (2001), as informações são baseadas em dados tempo-real, como o instante de partida de cada VTP do último ponto visitado e dados históricos como taxa de chegada de passageiros nos pontos, tempo de viagem entre pontos, percentual de passageiros que desembarcam em cada ponto, etc. O modelo, baseado nas características de um sistema de transporte sobre trilhos, é completamente determinístico e inclui o efeito do tempo de embarque/desembarque de passageiros e um modelo analítico para descrever o movimento dos VTP. O controle de retenção só é exercido num ponto, escolhido dentro do conjunto de pontos da rota, para um conjunto de veículos dentro de um horizonte (rolante) considerado. Considera-se ainda um conjunto de pontos de impacto, que vai do ponto de controle até o próximo ponto ou terminal com controle do plano de horários. A variável de decisão é o instante de partida dos VTP, pertencentes ao horizonte, no ponto de controle. Como pode ser constatado, existe uma limitação no número de veículos considerados (horizonte) e um único ponto de controle. O modelo não considera o atraso dos passageiros embarcados nos VTP e apresenta limitações na descrição do tempo de embarque/desembarque de passageiros.

O trabalho apresentado por Zolfaghari *et al.* (2004), incorpora ainda alguns aspectos específicos do sistema de transporte de ônibus urbano, como por exemplo, a capacidade dos VTP. As informações também são baseadas em dados tempo-real e dados históricos do

sistema. O tempo de retenção, para cada intervalo de controle, é calculado para todos os VTP no primeiro ponto de embarque/desembarque encontrado. Considera-se também um conjunto de pontos de impacto, seguintes ao ponto de controle. O modelo utiliza variáveis do tipo inteira para o instante de partida dos VTP dos pontos, o que leva facilmente a uma explosão combinatória, inviabilizando uma solução em tempo real. O exemplo apresentado pelos autores não traduz esta possibilidade, limitando-se a solução de um problema bastante simples e restrito.

Neste contexto, este trabalho propõe um modelo de estratégia de controle tipo retenção, para um sistema de transporte urbano tipo expresso ou “BRT”. A utilização de um sistema BRT se justifica pela facilidade de estimativa do tempo de viagem dos VTP entre pontos. Nada impede a utilização do modelo num sistema de transporte público que não BRT, bastando para isso, dadas as particularidades e características de cada cenário, as estimativas atualizadas do tempo de viagem dos VTP entre pontos.

O modelo aqui proposto apresenta soluções para várias limitações de modelos anteriores, conforme descrito a seguir.

3. MODELO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE RETENÇÃO PARA BRT

O modelo aqui utilizado considera um sistema de transporte urbano tipo BRT com canaleta exclusiva para os VTP, sistema este adotado em várias cidades brasileiras. Considera-se ainda, conforme indicado na Figura 1, uma rota fechada com uma pista de mão única, com vários VTP operando ao longo de vários pontos.

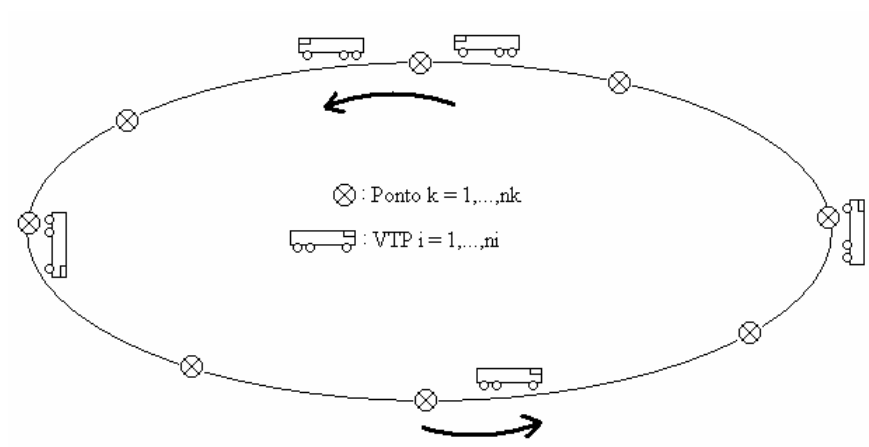


Figura 1: Esquema do modelo BRT utilizado

Assume-se a disponibilidade das seguintes informações através de sistemas “AVL” e “APC”:

- o instante de partida de cada VTP do último ponto visitado;
- índice do último ponto visitado;
- número de passageiros embarcados na saída do último ponto visitado.

Consideram-se ainda os seguintes dados históricos:

- taxa de chegada dos passageiros nos pontos;
- percentual de passageiros embarcados que desembarcam nos pontos;

- parâmetros/constantes de embarque e desembarque de passageiros nos pontos;
- tempo de viagem dos VTP entre pontos.

O modelo é sujeito as seguintes aproximações e limitações:

- a capacidade dos VTP não é considerada (não existe resíduo de fila de passageiros nos pontos);
- o tempo de viagem dos VTP entre pontos é aproximado pelo valor esperado, incluindo o possível atraso provocado por semáforos;
- o tempo de embarque e desembarque é aproximado por uma função linear;
- o impacto do controle do instante de partida de cada VTP dos pontos é considerado para um horizonte limitado de pontos a jusante;
- o número de passageiros embarcados é representado por uma variável contínua;
- utilização de estimativas para determinação do número de passageiros embarcados e do maior tempo (“dwell time”) entre embarque ou desembarque.

3.1. Modelo Matemático

No modelo proposto a função objetivo considera o tempo de espera dos passageiros nos pontos, ao longo da rota, mais o tempo de espera dos passageiros embarcados. Consideram-se todos os VTP do sistema e um horizonte de pontos a jusante para cada um destes. O tempo de espera dos passageiros embarcados é definido como o tempo que o VTP fica retido no ponto (retenção) além do tempo de embarque e desembarque dos passageiros (“dwell time”). O tempo total de atraso de passageiros, nos pontos e embarcados é dado por:

$$f = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{k=l^i+1}^{l^i+N^i} G_p \frac{\lambda_k}{2} (d_{i,k} - d_{i-1,k})^2 + G_e (1 - q_k) l_{i,k-1}^{est} h_{i,k} \quad (1)$$

- onde
- i : índice dos VTP, $i=1, \dots, n_i$;
 - k : índice dos pontos, $k=1, \dots, n_k$;
 - l^i : vetor contendo o último ponto de parada dos VTP i ;
 - N^i : horizonte do número de pontos a jusante a serem considerados no cálculo dos atrasos;
 - G_p : peso dos passageiros nos pontos;
 - G_e : peso dos passageiros embarcados nos VTP;
 - λ_k : taxa de chegada de passageiros no ponto k [passag./s];
 - $d_{i,k}$: instante de partida do VTP i do ponto k [s];
 - q_k : percentual de passageiros embarcados que desembarcam no ponto k ;
 - $l_{i,k}^{est}$: estimativa do número de passageiros embarcados no VTP i quando parte do ponto k ;
 - $h_{i,k}$: tempo de retenção do VTP i no ponto k [s];

A primeira parcela da Equação 1 representa o atraso dos passageiros nos pontos e a segunda parcela o atraso dos passageiros embarcados nos VTP.

A questão a ser respondida consiste em determinar quanto, em quais pontos e quais VTP devem ser retidos para se minimizar a função custo apresentada, ou seja, minimizar o atraso total dos passageiros.

As restrições associadas ao modelo são discutidas a seguir. Inicialmente, o instante de

chegada do VTP i ao ponto k é dado por:

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

com $a_{i,k}$ sendo o instante de chegada do VTP i no ponto k [s], r_k o tempo de viagem entre os pontos $k-1$ e k [s] e $d_{i,k}$ conforme definido anteriormente. O modelo utilizado para descrever o tempo de embarque de passageiros e o instante de partida do VTP do ponto está indicado no gráfico da Figura 2.

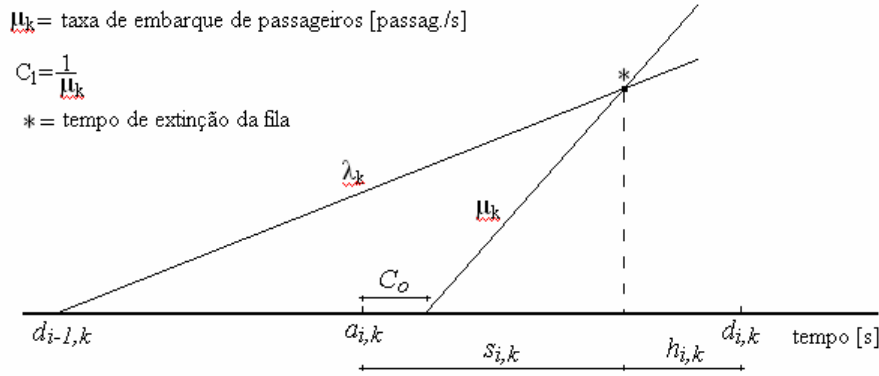


Figura 2: Gráfico do modelo de embarque de passageiros e do instante de partida do VTP

O tempo de embarque representa o tempo a partir da chegada do VTP no ponto k até a extinção da fila de passageiros:

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

onde C_0 e C_1 (tempo de embarque por passageiro) são constantes do modelo. O tempo de desembarque é dado por:

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

com C_2 (tempo de desembarque por passageiro) constante e o número de passageiros que desembarcam no ponto k sendo um percentual dos passageiros embarcados. Apesar dos tempos de embarque e desembarque reais não serem uma função linear, vários estudos mostram que para um serviço com espaçamentos pequenos entre VTP, estes podem ser aproximados por uma função linear (Wilson e Lin, 1992). A restrição de escolha do maior dentre os tempos é:

$$s_{i,k} = \max(s_{i,k}^{emb}, s_{i,k}^{des}) \quad (5)$$

que implica numa restrição não linear. O instante de partida do VTP i do ponto k é dado por:

$$d_{i,k} = a_{i,k} + s_{i,k} + h_{i,k} \quad (6)$$

onde $h_{i,k}$ é o valor de retenção que se deseja otimizar. Para garantir um intervalo mínimo entre dois VTPs sucessivos, define-se:

$$d_{i,k} \leq d_{i+1,k-1} + r_k - e_{\min} \quad (7)$$

isto é, o instante de partida do VTP i do ponto k pode ser no máximo igual ao instante de chegada do VTP $i+1$ ao ponto k menos o intervalo mínimo e_{\min} permitido [s]. A retenção também é limitada a um valor máximo,

$$h_{i,k} \leq h_{\max} \quad (8)$$

para evitar-se esperas muito longas nos pontos. O número de passageiros transportados pelo

VTP i ao partir do ponto k é dado por:

$$l_{i,k} = \lambda_k (d_{i,k} - d_{i-1,k}) + (1 - q_k) l_{i,k-1} \quad (9)$$

Por fim, define-se a natureza não-negativa das variáveis:

$$a_{i,k}, d_{i,k}, s_{i,k}, h_{i,k}, l_{i,k} \geq 0 \quad (10)$$

Como se depreende, com exceção da Equação 5, as demais restrições apresentadas são lineares.

3.2. Características do Modelo e da Solução Proposta

Para um modelo realista e uma solução ou otimização eficiente, em tempo real, foram feitas as seguintes considerações:

i) Utilização de um modelo determinístico: apesar do problema de controle de retenção em tempo real ter uma natureza eminentemente estocástica, este pode ser analisado como um caso limite onde a variância dos elementos estocásticos envolvidos, durante o intervalo de decisão de controle, é muito pequena e, portanto, aproximado por um modelo determinístico (Eberlein *et al.*, 2001).

ii) Formulação do custo como uma função convexa: a utilização de uma função objetivo convexa implica num mínimo global, ou seja, numa solução ótima única. Entretanto, a inserção na função objetivo da parcela que representa o atraso dos passageiros embarcados nos VTP, implica numa não convexidade em função da dependência de $l_{i,k}$ em relação aos valores calculados para $d_{i,k}$ (ou $h_{i,k}$). Para contornar este problema, utiliza-se uma estimativa dos passageiros embarcados nos VTP ($l_{i,k}^{est}$), calculada considerando-se uma retenção igual a zero nos pontos dentro do horizonte e portanto, não dependente de $h_{i,k}$.

iii) Utilização de restrições lineares: a não linearidade imposta pela Equação 5 na escolha entre o tempo de embarque ou desembarque é contornada através de uma estimativa de $s_{i,k}^{emb}$ e $s_{i,k}^{des}$ para cada ponto k antes de resolver o problema de otimização. Tal estimativa considera uma retenção igual a zero nos pontos dentro do horizonte. Através da estimativa, determina-se o maior dos dois valores e, então, resolve-se uma instância particular do modelo que considera, para cada ponto k , somente a restrição que corresponde ao maior dos dois tempos. Deste modo, evita-se a não linearidade imposta pela Equação 5.

iv) Representação do modelo através de variáveis contínuas: a representação de $a_{i,k}$, $d_{i,k}$, $s_{i,k}$, $h_{i,k}$ e $l_{i,k}$ na forma de variáveis contínuas permite a utilização de técnicas de otimização de complexidade polinomial, evitando-se assim uma explosão combinatória. A possibilidade de representação do número de passageiros embarcados por um número não inteiro tem impacto insignificante face às aproximações utilizadas no modelo.

v) Utilização de restrição de agrupamento (“bunching”) ou ultrapassagem (“overtaking”): um modelo que busque representar um sistema real deve considerar o problema de agrupamento e ultrapassagem de VTP. No modelo aqui utilizado tal problema é evitado através da utilização da Equação 7. Tal restrição não aparece, por exemplo, no trabalho de Zolfaghari *et al.* (2004).

vi) Possibilidade de retenção em todos os pontos do horizonte N^i : nos trabalhos apresentados por Eberlein *et al.* (2001), Zolfaghari *et al.* (2004) e outros, o controle de retenção só é possível num único ponto dentre os pontos da rota ou no primeiro ponto dentro do horizonte

de pontos de cada VTP, respectivamente. Tal fato implica numa ação de retenção concentrada neste(s) ponto(s) e portanto, num possível tempo de retenção excessivo sob o ponto de vista dos passageiros embarcados. Outro aspecto a ser considerado é a limitação do valor máximo de retenção indicado na Equação 8. Caso a retenção seja limitada por h_{max} , a diferença não pode ser compensada nos pontos seguintes dentro do horizonte se apenas um ponto de controle é utilizado. Com a possibilidade de retenção em todos os pontos do horizonte, estes possíveis problemas são minimizados.

Em suma, quando comparados com outros métodos na literatura, o presente modelo e a técnica de solução têm as seguintes vantagens: acréscimo da parcela do atraso dos passageiros embarcados na função custo mantendo-se a convexidade, conforme discutido no item ii acima; eliminação da restrição não-linear de escolha entre $s_{i,k}^{emb}$ ou $s_{i,k}^{des}$ através do procedimento descrito no item iii; na utilização de variáveis contínuas em oposição as variáveis discretas adotadas por Zolfaghari *et al.* (2004); restrição de ultrapassagem, ausente em Zolfaghari *et al.* (2004); e cálculo do controle ótimo com retenção em todos os pontos do horizonte considerado.

As simplificações, aproximações e características resultantes da heurística utilizada permitem uma solução eficiente face à complexidade do modelo proposto, mantendo-se ainda o aspecto realista deste.

4. ESTUDO DE CASO

O cenário utilizado para testar a estratégia aqui proposta, via simulação MatLab, é baseado no modelo apresentado na Figura 1 e constituído de um sistema BRT em rota fechada, com 3 VTP e 3 pontos. A utilização de um cenário reduzido visa tornar mais clara a análise e o entendimento da dinâmica envolvida.

Como citado, deve-se conhecer o instante de partida $d_{i,k}$ de todos os VTP i do último ponto k visitado, o número de passageiros $l_{i,k}$ embarcados, os dados históricos ou esperados do tempo de viagem r_k entre pontos, taxa de chegada λ_k de passageiros nos pontos, percentual de passageiros embarcados q_k que desembarcam em cada ponto, horizonte de pontos N^i considerado, retenção máxima h_{max} permitida e outros. Os valores utilizados no exemplo aqui descrito são: $d_{1,3} = 70$ [s], $d_{2,1} = 50$ [s], $d_{3,1} = 20$ [s], $l_{1,3} = 0$, $l_{2,1} = 0$, $l_{3,1} = 0$, $r_k = [60 \ 60 \ 60]$, $q_k = [0,2 \ 0,2 \ 0,2]$, $\lambda_k = [0,05 \ 0,05 \ 0,05]$, $N^i = 3$, $h_{max} = \text{infinito}$, $e_{min} = 0$, $G_p = 1$ e $G_e = 1$. A simulação abrange duas voltas no circuito fechado proposto, com um tempo de percurso de aproximadamente 8 minutos. Ao final da simulação é calculado o atraso total dos passageiros, nos pontos e embarcados, para o período considerado. Vale relembrar que, conforme indicado na Equação 1, a função custo considera o atraso dos passageiros nos pontos e embarcados nos VTP. Portanto, uma possível retenção de um VTP em determinado ponto, que a princípio reduziria o atraso dos passageiros nos pontos, pode vir a aumentar o atraso dos passageiros embarcados. Ou seja, o modelo utilizado considera ambos os atrasos no cálculo da solução ótima.

São simulados dois casos, com e sem o controle de retenção. As trajetórias dos VTP com e sem controle de retenção são apresentadas nas Figuras 3 e 4 respectivamente. Aparece nos gráficos a trajetória do BRT ou VTP “0”, que representa o BRT anterior ao BRT 1. Tal trajetória está presente a fim de se observar o intervalo ou espaçamento entre o BRT 1 e o BRT anterior. Com a presença do controle, o VTP 3 é retido no ponto $k = 2$, primeira volta,

percurso de 1000 [m], durante 22,6 [s]. A retenção, como pode ser verificado, implica numa alteração da trajetória do VTP 3. Para o exemplo apresentado as retenções ótimas calculadas são: $h_{3,2} = 22,6$ [s] (volta 1), com o restante das retenções iguais a zero.

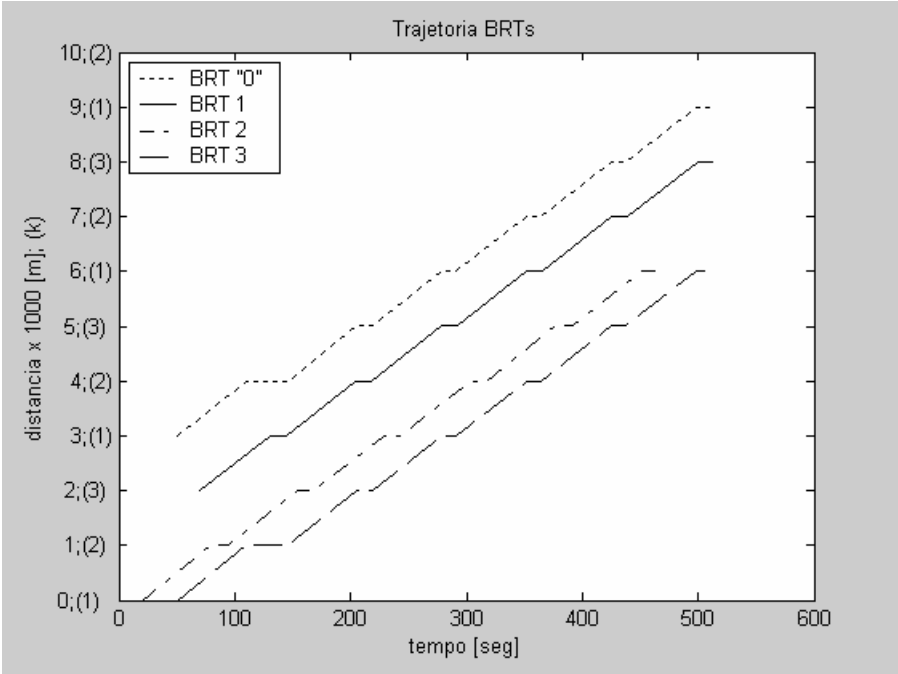


Figura 3: Trajetórias dos BRT (ou VTP) com o controle de retenção

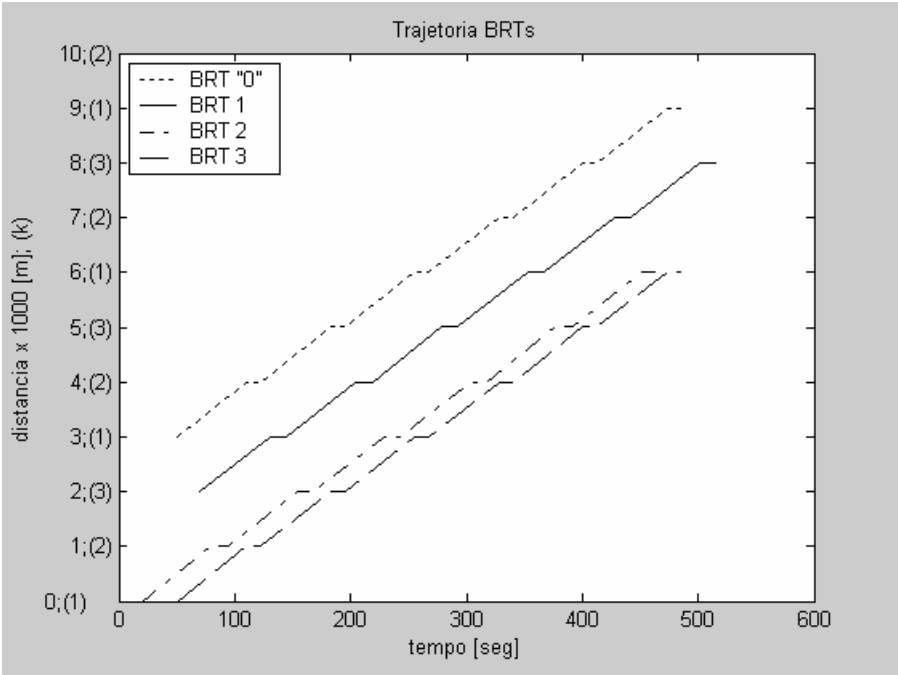


Figura 4: Trajetórias dos BRT (ou VTP) sem o controle de retenção

A Tabela 1 apresenta o atraso total dos passageiros, no período considerado, para os dois casos, com e sem controle de retenção. Como pode ser observado, o controle de retenção permitiu uma redução de 277,86 [s] ou 9,3% no atraso total dos passageiros.

Tabela 1: Comparativo do atraso total dos passageiros com e sem controle de retenção

Controle de Retenção	Atraso total dos passageiros [s]
Sim	2710.61
Não	2988.47

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta um modelo de controle de retenção para um sistema de transporte urbano tipo BRT. O modelo utilizado é completamente determinístico e pressupõe informações em tempo real e dados históricos do sistema. A partir destes dados calcula-se o tempo de retenção ótimo de cada VTP para os pontos dentro do horizonte considerado. O objetivo é a minimização do atraso total dos passageiros, nos pontos e embarcados, representado por uma função custo quadrática mais uma parcela linear.

O modelo utilizado e a heurística adotada para solução do problema apresentam várias particularidades e vantagens em relação a outros trabalhos anteriormente apresentados. Pode-se citar como diferencial a inclusão do atraso dos passageiros embarcados na função custo, mantendo-se a convexidade; a utilização de estimativas para escolha entre $s_{i,k}^{emb}$ ou $s_{i,k}^{des}$, evitando-se a não linearidade; a utilização de variáveis contínuas, evitando-se a explosão combinatória; utilização de restrição de ultrapassagem e possibilidade de retenção para todos os VTP em todos os pontos do horizonte considerado.

As simplificações, aproximações e características resultantes da heurística utilizada permitem uma solução eficiente face à complexidade do modelo proposto, mantendo-se ainda o aspecto realista deste. O modelo é testado, via simulação, num cenário reduzido, visando tornar mais clara a análise e o entendimento da dinâmica envolvida. Os resultados apresentados mostram a eficiência do modelo de controle de retenção para o exemplo proposto.

A utilização do modelo de controle de retenção aqui apresentado num cenário maior e ou real é perfeitamente viável e possível. Espera-se para estes casos resultados similares ou tão positivos quanto os obtidos no exemplo aqui apresentado. Num cenário maior recomenda-se a utilização de um algoritmo de otimização mais eficiente do que o aqui utilizado, o que não representa maiores problemas. A especificação do peso dos passageiros nos pontos e embarcados, G_p e G_e respectivamente, na função custo, fica a cargo do operador do sistema, devendo refletir os objetivos desejados.

Sugere-se para trabalhos futuros o teste do modelo aqui apresentado num sistema BRT real, com controle em tempo real do instante de partida (ou retenção) dos VTP. De forma similar a simulação aqui apresentada, seriam necessárias as informações em tempo real do instante de partida de cada VTP do último ponto visitado e do número de passageiros embarcados e, dados históricos ou esperados do tempo de viagem entre pontos, taxa de chegada de passageiros nos pontos e percentual de passageiros embarcados que desembarcam em cada ponto, além de alguns parâmetros constantes.

Conforme já citado, nada impede a utilização do modelo aqui apresentado num sistema de

transporte público que não BRT, bastando para isso, dadas as particularidades e características de cada cenário, as estimativas atualizadas do tempo de viagem dos VTP entre pontos. Uma próxima etapa deste trabalho prevê a inclusão de semáforos no modelo com possibilidade de prioridade para BRT, o que implica em restrições adicionais para $d_{i,k}$ e ou nova formulação para r_k .

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abkowitz, M. e I. Engelstein (1984) Methods for Maintaining Transit Service Regularity. *Transportation Research Record* 961, p. 1-8.
- Bukkapatnam, S.; M. Dessouky e J. Zhao (2003) *Distributed Architecture for Real-Time Coordination in Transit Networks*. Final Report, Metrans Project 00-13.
- Desaulniers, G. e Hickman, M. D. (2003) *Public Transit*. Les Cahiers du GERAD, G-2003-77.
- Eberlein, X. J.; N. H. M. Wilson e D. Bernstein (1999) Modeling Real-Time Control Strategies in Public Transit Operations. *Wilson, N.H.M. (Ed.), Lecture Note in Economics and Mathematical Systems*, No. 471: Computer Aided Transit Scheduling. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 325-346.
- 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.
- Koehler, L. A. e W. Kraus Jr. (2006a) A Controlled Departure Method for Bus Priority Operation. *11th IFAC (International Federation of Automatic Control) Symposium on Control in Transportation Systems*, v. 1 p. 7-13.
- Koehler, L. A. e W. Kraus Jr. (2006b) Sistema de Prioridade para Ônibus com Controle da Partida do Ponto. *XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Brasília. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2006, Rio de Janeiro, ANPET, 2006, v. II p. 162-173.
- Lin, G. S.; P. Liang; P. Schonfeld *et al.* (1995) *Adaptive Control of Transit Operations*. Report No. MD-26-7002. U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration. 15 de novembro 1995.
- O' Dell, S. W. e N. H. M. Wilson (1999) Optimal Real-Time Control Strategies for Rail Transit Operations During Disruptions. *Wilson, N.H.M. (Ed.), Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, No. 471: Computer-aided Scheduling. Springer-Verlag, p. 299-323.
- Strathman, J. G.; T. J. Kimpel; K. J. Duecker; *et al.* (2001) Bus Transit Operation Control: Review and an Experiment Involving TriMet's Automated Bus Dispatching System. *Journal of Public Transportation*, v. 4, n. 1, p. 1-26.
- Sun, A. e M. Hickman (2004) The Holding Problem at Multiple Holding Stations. *9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, agosto de 2004.
- Turnquist, M. A. e S. W. Blume (1980) Evaluating Potential Effectiveness of Headway Control Strategies for Transit Systems. *Transportation Research Record*, n. 746, p. 25-29.
- Wilson, N. H. M. e T. Lin (1992) Dwell Time Relationships for Light Rail Systems. *Transportation Research Record*, n. 1361, p. 287-295.
- Zolfghari, 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* 2, p. 99-110.