

CONTROLADOR REALIMENTADO DE INTERVALO ENTRE ÔNIBUS COM GANHO VARIÁVEL DE ACORDO COM O CARREGAMENTO

Lucas Franco Lima
Werner Kraus Junior
Rodrigo Castelan Carlson
Lucas Zimmermann

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas

RESUMO

A regularidade no cronograma de ônibus em linhas de baixa frequência ou a manutenção de intervalos em linhas de alta frequência são desejados por usuários e operadores de transporte coletivo. O controle dos tempos de partida dos ônibus através de retenção é uma técnica com esta finalidade, porém a aplicação de retenção pode incorrer em atraso para os usuários que estão embarcados. Com base em resultados obtidos anteriormente por uma técnica de controle preditivo, este trabalho propõe um controlador realimentado de intervalo à frente com ganho variável que aplica retenções quando o ônibus tem um baixo carregamento de maneira a reduzir a espera na estação sem penalizar os usuários embarcados. Resultados de simulação microscópica para uma linha de alta frequência hipotética com demanda concentrada mostram que o controlador proposto se aproxima ao resultado do controle preditivo.

ABSTRACT

Public transport users and operators seek regular schedules in low frequency lines or headway maintenance in high frequency lines. Holding-based control methods are known techniques with that goal, but their application could incur in on board delays. According to results previously obtained by a predictive control technique, this paper proposes a feedback control method based on the forward headway control in order to apply longer holding to the emptier buses so to decrease the station delay without penalising the passengers on board. Results of a microsimulation environment for a scenario where the passenger loads vary widely along the route show that the proposed method draws near to the predictive control technique.

1. INTRODUÇÃO

Em um serviço de transporte público, existe considerável dificuldade no cumprimento dos horários estipulados e na manutenção de intervalos entre ônibus. Esta dificuldade deve-se a variações na própria velocidade dos veículos e nos tempos de embarque e desembarque de passageiros, entre outros fatores. Essas variações acabam resultando em uma tendência de pareamento de veículos quando nenhuma ferramenta de controle é aplicada. De fato, um ônibus atrasado acaba por encontrar mais passageiros à frente, o que aumenta os tempos de embarque, aumentando também o seu atraso; enquanto o oposto ocorre com um ônibus que se adianta, atendendo menos passageiros e se adiantando ainda mais (Newell e Potts, 1964). Para que o serviço seja oferecido de maneira eficiente e satisfatória para os usuários é importante que existam maneiras de diminuir essas irregularidades.

Uma das formas para diminuir a instabilidade operacional nos sistemas de transporte público é o uso de ferramentas de controle em tempo real. Uma dessas ferramentas consiste na aplicação de retenções em determinadas estações aos ônibus que estejam adiantados no seu percurso (Ibarra-Rojas *et al.*, 2015). A aplicação da retenção atua com o objetivo de melhorar o cumprimento do plano de horários em linhas de baixa frequência (geralmente com intervalos acima de 10 minutos) ou de forma a aumentar a regularidade entre os intervalos de ônibus em linhas de alta frequência (Barnett, 1974). Essa ferramenta provoca um aumento na confiabilidade do sistema e vem acompanhada de uma redução no tempo de espera dos passageiros nas estações, assim como uma distribuição mais equilibrada de passageiros entre os ônibus. No entanto, a retenção

inserida em um sistema implica em um maior tempo de espera sofrido pelos passageiros que já estão embarcados no ônibus nos seus trajetos (Zimmermann *et al.*, 2015).

Existem diferentes métodos disponíveis na literatura com o objetivo de exercer controle nos sistemas de transporte coletivo através da aplicação de retenções nos ônibus. Berrebi *et al.* (2018) comparou diferentes métodos de retenção utilizados na prática com métodos recomendados pela literatura e analisou seus desempenhos em termos de estabilidade de intervalos e de média de tempo de retenção aplicada. Os autores concluíram que métodos de controle de intervalo conseguem diminuir a variação dos mesmos com o custo de altos tempos de retenções aplicadas, enquanto métodos de controle preditivo encontram melhores pontos de equilíbrio para os indicadores utilizados.

Zimmermann (2016) comparou, por microsimulação de tráfego, métodos de controle realimentado proporcional com um método de controle preditivo para um corredor BRT. Os métodos realimentados, a saber, controle do intervalo à frente (Cats *et al.*, 2011), controle condicional do intervalo à frente e controle do intervalo à frente e atrás (Turnquist, 1982), controlam os intervalos entre ônibus a fim de manter a regularidade. Já o método preditivo é baseado em um modelo que define os valores de retenção a serem aplicados através de uma função objetivo que minimiza o tempo de espera tanto dos usuários que aguardam na estação quanto dos passageiros já embarcados (Koehler *et al.*, 2011). Foram simulados diferentes tipos de padrões de demanda e empregados cada um dos tipos de controle mencionados. Nos resultados, observou-se que os usuários do sistema se beneficiam mais do controle quando as retenções são aplicadas nos trechos de carregamento mais baixo dos ônibus, permitindo uma variação maior dos intervalos nos trechos em que a lotação dos ônibus é maior. Assim, o controle preditivo baseado em modelo desempenhou melhor em relação aos tempos de espera dos usuários quando comparado aos demais métodos por ser o único a aplicar as retenções levando em conta o carregamento dos ônibus. Esses resultados são coerentes com Strathman *et al.* (2001) que também afirmam que a retenção é mais eficaz se aplicada quando o carregamento do ônibus é baixo e a demanda imediatamente após este ponto é alta.

O objetivo deste trabalho é replicar o desempenho do controle preditivo de Zimmermann (2016) por meio de uma estrutura de controle realimentado proporcional, mais simples matemática e computacionalmente, beneficiando-se do aprendizado oriundo da aplicação do controle preditivo. Isso pode ser feito pela inserção da variação do carregamento dos ônibus nos cálculos de retenção como um fator que multiplica o ganho nominal do controlador, tipicamente fixo, fazendo com que uma parcela menor seja aplicada em estações em que os ônibus estejam com mais passageiros a bordo.

A necessidade de se propor um ganho variável para os métodos de controle realimentado proporcional surge, portanto, da percepção de que existem outros fatores que devem ser levados em conta para definição dos melhores pontos e magnitudes de aplicação de retenção além do desvio do intervalo entre ônibus ou do cronograma estipulado.

Na proposta para variação desse ganho nominal, o carregamento atual do ônibus no instante do cálculo da retenção é comparado com o maior carregamento esperado para uma determinada linha, dado obtido através do histórico de operação do sistema. O novo método é testado no

mesmo cenário de microssimulação de Zimmermann (2016) e os resultados obtidos mostram que ele se aproxima do método de controle preditivo.

Na Seção 2 é apresentado o método proposto, assim como os outros dois métodos que servem como referência para a análise realizada no trabalho. A Seção 3 é dedicada à apresentação dos indicadores de desempenho utilizados para comparar os resultados obtidos na Seção 4. Por fim, na Seção 5 as conclusões do trabalho são apresentadas.

2. MÉTODO DE CONTROLE COM GANHO VARIÁVEL

O controle escolhido como base para o método proposto foi o Controle do Intervalo à Frente (FH). Esta escolha se deu pelo fato de o FH exercer um controle rígido do intervalo, mas também por apresentar maior simplicidade computacional que outros encontrados na literatura. A seguir, apresenta-se o controle original e a adaptação para implementar o ganho variável. Na Subseção 2.3, descreve-se brevemente o controle preditivo baseado em modelo cujo comportamento se deseja alcançar.

2.1. Controle do intervalo à frente

O controle do intervalo à frente (FH) consiste em determinar valores de retenção quando um ônibus opera com intervalo em relação ao ônibus da frente inferior ao planejado, corrigindo imediatamente esses desvios, dado por:

$$r_{i,k} = K_P [H - \hat{h}_{i,k}]^+, \quad (1)$$

em que $r_{i,k}$ é a retenção do ônibus i na estação k , K_P é o ganho proporcional a ser ajustado pelo operador, H é o intervalo planejado, $\hat{h}_{i,k}$ é o intervalo do ônibus i em relação ao ônibus $i - 1$ à frente no instante do cálculo de retenção na estação k e $[u]^+ = \max\{0, u\}$.

Assim, sempre que um ônibus finaliza o processo de embarque e desembarque em uma estação, o FH compara o intervalo no instante do cálculo da retenção com o planejado e, caso o primeiro seja menor, aplica a retenção necessária para restabelecer o intervalo planejado. A retenção fica sujeita ao ganho K_P que define a rigidez do controle. Quanto mais próximo a 1, mais estrita a aderência ao intervalo planejado, porém Cats *et al.* (2011) sugere que sejam usados valores de $K_P < 1$ para que não sejam designados tempos de espera exagerados aos passageiros embarcados.

A Figura 1 busca representar o efeito dos métodos realimentados do trabalho comparados ao caso sem controle utilizando o cenário descrito em Newell e Potts (1964) em seu modelo de transporte público. O cenário em questão é constituído por uma linha de operação em que os ônibus saem com intervalos regulares de uma estação inicial e conseguem respeitar o plano de horários para as estações seguintes desde que o valor de intervalo seja mantido constante para todos os ônibus da linha. Nesse cenário, a ultrapassagem de ônibus não é permitida e considera-se que, a partir do momento em que dois ônibus se encontram, seus instantes de partida de estações seguintes são os mesmos. Além disso, a capacidade de carregamento dos ônibus não é levada em conta, de modo que, todos os usuários que chegam às estações conseguem embarcar no primeiro ônibus que passar e, também, os tempos de viagem entre estações consecutivas (v_k) são considerados iguais para todo o sistema.

Um atraso α é inserido na passagem do ônibus 1 pela estação 1 e a demanda do cenário foi implementada de modo em que ficassem intercaladas estações em que apenas existe o embarque de usuários e estações em que só acontece o desembarque para que houvesse uma variação no carregamento dos ônibus. Considera-se ainda que o desembarque acontece simultaneamente ao embarque de usuários e que o tempo que leva para acontecer é desprezível, não influenciando os instantes de partida dos ônibus, apenas a quantidade de passageiros que sai de cada estação.

Na Figura 1(a), percebe-se a tendência de pareamento dos ônibus descrita na Seção 1 a medida em que o atraso do ônibus 1 aumenta ao longo do itinerário e também acaba causando o adiantamento do ônibus 2 seguinte.

Já na Figura 1(b), pode-se observar o efeito prático do FH sobre o caso sem controle no cenário de Newell e Potts (1964). O efeito de pareamento é evitado quando retenções são aplicadas a todos os ônibus seguintes ao que sofre o atraso inicial. Pode-se perceber que os intervalos são mais regulares que no caso sem controle, porém o esforço de controle é considerável ao promover o atraso intencional em todos os ônibus, o que acaba causando um aumento no tempo de espera dos passageiros embarcados.

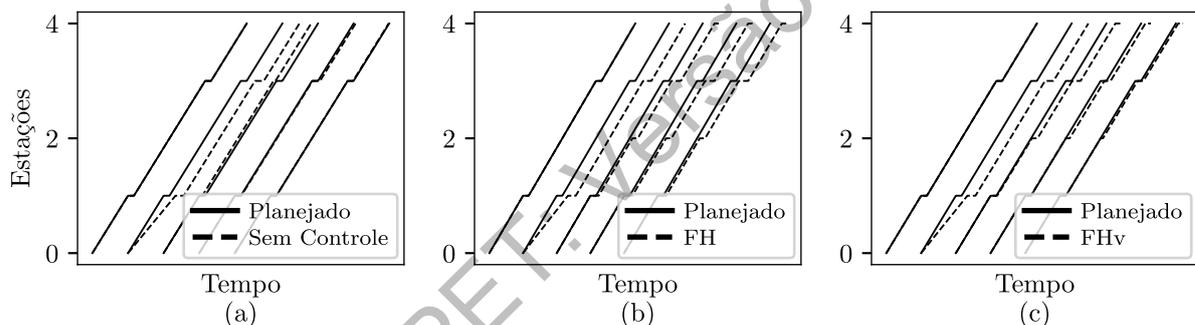


Figura 1: Gráfico de marcha para o cenário proposto por Newell e Potts (1964): (a) sem controle; (b) controle FH; (c) controle FHv.

2.2. Controle do intervalo à frente com ganho variável

O controle do intervalo à frente com ganho variável (FHv) proposto neste trabalho compara os carregamentos atuais dos ônibus com dados históricos do maior carregamento (l_{max}) da linha durante o período em que se pretende controlar o sistema. Para o funcionamento do método, assume-se a disponibilidade de dados como o número de usuários embarcados, instante de partida da última estação visitada e instante de partida do último ônibus que visitou a estação atual.

O carregamento atual do ônibus a ser comparado com o carregamento máximo da linha é obtido por:

$$\hat{l}_{i,k} = (1 - q_k)l_{i,k-1} + \lambda_k(a_{i,k} + w_{i,k} - d_{i-1,k}), \quad (2)$$

em que $\hat{l}_{i,k}$ representa o carregamento do ônibus i no instante de cálculo da retenção na estação k , depois do fim do período de embarque e desembarque de usuários. Ainda, λ_k e q_k representam, respectivamente a taxa de chegada de usuários e a porcentagem de passageiros a bordo que desembarcam em k , enquanto $l_{i,k-1}$ é a quantidade de passageiros a bordo no ônibus i que saíram

da estação anterior $k - 1$; $a_{i,k}$ representa o instante de chegada do ônibus i à estação k , $w_{i,k}$ é o período para embarque e desembarque e $d_{i-1,k}$ é o instante de partida do último ônibus que passou pela estação k . O primeiro termo do lado direito da equação representa os passageiros que saíram da estação anterior e não desembarcaram na atual e o segundo termo representa aqueles passageiros que embarcaram até o instante de cálculo da retenção.

A aplicação do método proposto de variação do ganho em relação ao método FH descrito na seção anterior, resulta em:

$$r_{i,k} = K_{Vi,k} K_P (H - \hat{h}_{i,k}), \quad (3)$$

em que o ganho nominal K_P é multiplicado pelo ganho variável $K_{Vi,k}$, que deve assumir um valor entre 0 e 1.

Para determinar a variação de $K_{Vi,k}$ de acordo com o carregamento atual dos ônibus, foi escolhida uma forma não linear que possibilita a definição da sensibilidade do método ao carregamento. Para isso, existe um parâmetro β que representa a porcentagem do carregamento máximo l_{\max} que o operador considera como insignificante e pode ser aproximada para zero. O ganho variável foi definido como:

$$K_{Vi,k} = \begin{cases} 0, & \hat{l}_{i,k} \geq l_{\max} \\ \beta(l_{\max}/\hat{l}_{i,k}), & \beta l_{\max} < \hat{l}_{i,k} < l_{\max} \\ 1, & \hat{l}_{i,k} \leq \beta l_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

Como a divisão $l_{\max}/\hat{l}_{i,k}$ tende a infinito quando $\hat{l}_{i,k} = 0$, é necessário estabelecer um limite que leve o ganho variável $K_{Vi,k}$ a 1 quando o carregamento atual do ônibus for considerado insignificante perante o maior carregamento usado como referência. O parâmetro β é ajustado pelo operador, assumindo sempre um valor entre 0 e 1.

As variações de $K_{Vi,k}$ em função do carregamento para três valores diferentes de β são mostradas na Figura 2. Percebe-se que o método proposto influencia a sensibilidade da variável $K_{Vi,k}$. Por exemplo, quanto maior o valor de β , menos sensível o ganho a variações no carregamento do ônibus. Se $\beta = 1$, a aplicação de retenção fica equivalente a um controle *on/off*, isto é, aplica-se a retenção sempre que o carregamento do ônibus for menor que l_{\max} ; senão, a retenção é nula. Desse modo, quanto mais próximo a zero for β , maior a variação causada no ganho pelas mudanças no carregamento dos ônibus.

A Figura 1(c) mostra o controle proposto sendo aplicado no mesmo cenário anterior. Percebe-se que, com uma liberdade maior para que o controle de intervalos não seja tão rigoroso quando o carregamento dos ônibus for mais alto, espera-se que o seu desvio padrão aumente, já que o carregamento dos ônibus também influencia no cálculo da retenção. Por esse motivo, menos retenção aplicada deve levar também a um tempo de espera de passageiros embarcados menor.

2.3. Controle preditivo

O método de controle preditivo (opt.H) implementado é baseado no modelo apresentado por Koehler *et al.* (2011), em que a capacidade dos ônibus não é considerada e a ultrapassagem não

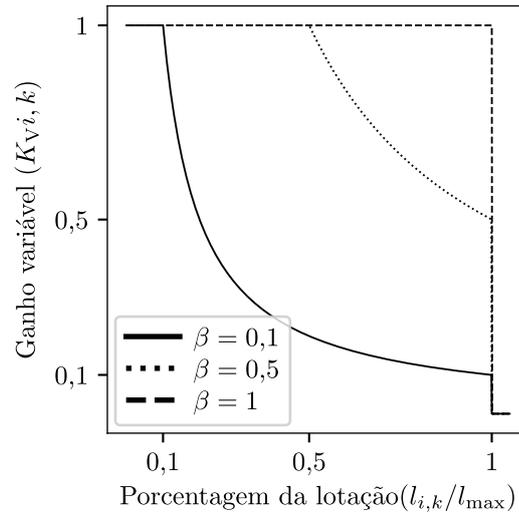


Figura 2: Variações de K_V de acordo com porcentagem do carregamento para diferentes β .

é permitida. No modelo de otimização proposto pelos autores, a função objetivo minimiza o tempo de espera dos usuários na estação e embarcados de acordo com a função para todos os ônibus (I) em todas as estações (K):

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \left[\frac{\lambda_k}{2} (d_{i,k} - d_{i-1,k})^2 + (1 - q_k) l_{i,k-1} (r_{i,k} + w_{i,k}) \right], \quad (5)$$

em que o primeiro termo no somatório representa o tempo de espera dos usuários na estação considerando que estes chegam à estação com uma taxa constante entre a partida do ônibus da frente $i - 1$ até o instante de partida do ônibus i atual. O segundo termo representa o tempo de espera dos usuários embarcados enquanto o ônibus está parado na estação em que o termo $(1 - q_k) l_{i,k-1}$ é a quantidade de usuários que continuam embarcados depois do desembarque na estação k .

As principais restrições do problema são dadas por:

$$a_{i,k} = d_{i,k-1} + v_k \quad (6)$$

$$w_{i,k} = \frac{nC_0 + C_1 \lambda_k [(a_{i,k} - d_{i-1,k}) + C_2 q_k l_{i,k-1}]}{(n - C_1 \lambda_k)} \quad (7)$$

$$d_{i,k} = a_{i,k} + w_{i,k} + r_{i,k}, \quad (8)$$

em que o instante de chegada dos ônibus em cada estação $a_{i,k}$ é dado pelo seu tempo de partida da última estação visitada ($d_{i,k-1}$) somado pelo tempo de viagem entre elas (v_k). O intervalo de tempo para embarque e desembarque de passageiros $w_{i,k}$ é aproximado pela expressão linear determinística da Equação 7, com C_0 representando o atraso de tempo para início do processo de embarque e desembarque, C_1 sendo o tempo de embarque por usuário, C_2 , o tempo de desembarque por usuário e onde n é o número de portas do veículo.

Como esse método de controle não busca a regularização dos intervalos entre ônibus, mas a minimização dos tempos de espera para os usuários embarcados e na estação, seu esforço de controle é distribuído de maneira diferente dos outros métodos para o caso de demanda concentrada e esse é o comportamento que pretende-se replicar para o método de controle realimentado com ganho variável explicado na Subseção 2.2.

3. INDICADORES DE DESEMPENHO

Alguns indicadores de desempenho são usados para comparar os métodos de controle apresentados neste artigo. A média aritmética entre todos os intervalos observados constitui o indicador de intervalo médio. O seu coeficiente de variação é um fator importante a ser observado, já que os métodos realimentados buscam exatamente a diminuição desse índice. Como a variação no ganho do método proposto nesse trabalho tem o objetivo de dar uma “folga” maior à variação do intervalo quando os ônibus estão mais cheios e aplicar maiores retenções quando os mesmos estão mais vazios, é esperado que esse coeficiente de variação seja maior, quando comparado aos demais métodos realimentados proporcionais com ganho fixo, se aproximando ao valor encontrado pelo opt.H.

O valor de retenção total aplicada em cada método representa o esforço necessário para cada ferramenta de controle diferente e quantifica o atraso adicionado à operação. O caso sem controle possui, portanto, a velocidade operacional mais alta e, quanto maior o valor de retenção total necessário para manter os intervalos regularizados, mais esse indicador é prejudicado (Eberlein *et al.*, 2001).

O tempo de espera dos usuários na estação e embarcados são os indicadores que motivaram o trabalho atual. Continua-se buscando uma diminuição da espera nas estações, mas sem um custo tão alto à espera dos passageiros embarcados, o que acontece aos outros métodos de controle realimentado proporcional, como mostra Zimmermann (2016).

3.1. Espera dos usuários na estação

O tempo de espera E_{est} de um passageiro em uma estação é dado pelo intervalo de tempo desde a chegada do usuário à estação até o instante em que o ônibus finaliza a operação de embarque e desembarque. O cálculo do tempo médio de espera dos passageiros que aguardam para embarcar em um ônibus i em uma estação k pode ser calculado através da área do gráfico da Figura 3(a).

Assume-se que os usuários chegam a uma taxa constante λ_k à estação e embarcam entre a chegada do ônibus atual, $a_{i,k}$, e o final da aplicação da retenção $r_{i,k}$. Considera-se porém, que aqueles usuários que chegam à estação depois de finalizado o tempo de embarque $w_{i,k}$ conseguem embarcar sem sofrer espera alguma na estação, já que a chegada de usuários à estação é sempre mais lenta que o seu embarque no ônibus.

O indicador utilizado é resultado de uma média aritmética entre os tempos médios de espera dos passageiros que embarcaram em todos os ônibus em todas as estações para todos os usuários do sistema, inclusive os que conseguiram embarcar durante a aplicação das retenções:

$$E_{est} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \frac{\lambda_k (a_{i,k} + w_{i,k} - d_{i-1,k})^2}{\lambda_k (d_{i,k} - d_{i-1,k})}, \quad (9)$$

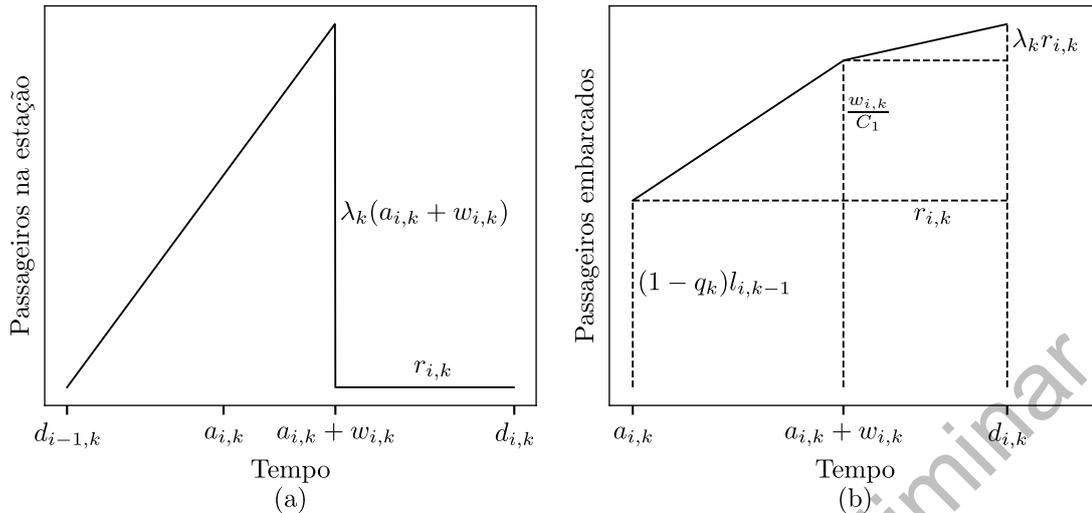


Figura 3: Cálculo dos indicadores de tempo de espera.(a) na estação; (b) embarcado.

que tem o seu numerador calculado igualmente ao primeiro termo a ser minimizado pela Equação 5.

3.2. Espera dos usuários embarcados

Já o indicador de tempo de espera dos passageiros a bordo E_{emb} considerado neste trabalho se diferencia daquele segundo termo apresentado na Equação (5). Além do intervalo de tempo entre a chegada e partida de um ônibus em uma estação para os usuários que saíram da estação anterior e não desembarcaram na estação atual, é considerado também o intervalo entre a entrada de um passageiro no ônibus e a sua partida da estação para os passageiros que embarcam na estação atual. O cálculo do termo de tempo médio de espera a bordo para os passageiros que embarcaram no ônibus i na estação k pode ser calculado através da área do gráfico da figura 3(b).

Os passageiros que vieram da estação anterior e não desembarcaram na atual $(1 - q_k)l_{i,k-1}$ aguardam durante todo o tempo de embarque $w_{i,k}$ e de retenção aplicada $r_{i,k}$ na estação atual, único termo considerado na Equação (5). Além disso, os passageiros que chegam antes do final do tempo de embarque, sobem a bordo com uma taxa de embarque de $1/C_1$ e aguardam enquanto os demais passageiros embarcam e também durante todo o tempo de retenção aplicado. Por fim, os passageiros que chegam à estação já no período de aplicação de retenção com taxa de chegada λ_k e não sofriam E_{est} , como descrito na Subseção 3.1, precisam aguardar o final do tempo de aplicação de controle.

O indicador utilizado é resultado da média aritmética entre as somas de todos os termos apresentados em todos os ônibus e todas estações para todos os usuários do sistema:

$$E_{emb} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \frac{(1 - q_k)l_{i,k-1}(w_{i,k} + r_{i,k}) + \frac{w_{i,k}^2}{2C_1} + \frac{r_{i,k}w_{i,k}}{C_1} + \frac{\lambda_k r_{i,k}^2}{2}}{\lambda_k(d_{i,k} - d_{i-1,k})} \quad (10)$$

Dessa forma, o intervalo médio e seu coeficiente de variação, a retenção total aplicada e os tempos de espera na estação e embarcado são os indicadores que serão usados na próxima seção

a fim de comparar os resultados dos métodos de controle testados.

4. RESULTADOS

Com o objetivo de testar o novo método de controle, foi utilizado um modelo de transporte público baseado em Koehler *et al.* (2011), porém que busca ser mais realista através da possibilidade de consideração de incertezas na quantidade de usuários que embarcam e desembarcam de cada estação. O modelo foi implementado em um ambiente de microssimulação utilizando o simulador de tráfego Aimsun (TSS, 2012). Sua interface de programação de aplicações (API) permite a definição dos tempos de parada para embarque e desembarque e as estratégias de aplicação de controle. Mais detalhes de sua implementação podem ser encontrados em Zimmermann (2016).

4.1. Cenário de aplicação

O cenário utilizado nesse ambiente, também implementado em Zimmermann (2016), consiste em uma linha de 31 km e 30 estações baseada em uma proposta de sistema BRT para o centro da área metropolitana de Florianópolis/SC (PLAMUS, 2015). Assume-se que os ônibus possuem prioridade semaforica total e trafegam em faixa exclusiva, portanto os ônibus da linha iniciam uma nova volta depois da parada na estação final. A ultrapassagem de ônibus não é permitida e existe espaço para que dois ônibus parem em cada estação.

Foi utilizado um padrão de demanda concentrada para verificar a utilidade do controlador nesse tipo de cenário, em que os resultados do método de controle preditivo mais se destacavam daqueles obtidos pelos controladores realimentados proporcionais em Zimmermann (2016). Nesse itinerário, é considerado um trecho com forte característica de origem de viagens com muitos usuários embarcando e sem desembarque algum, e outro trecho com fortes características de destino, apenas com usuários desembarcando, como pode ser observado na Figura 4.

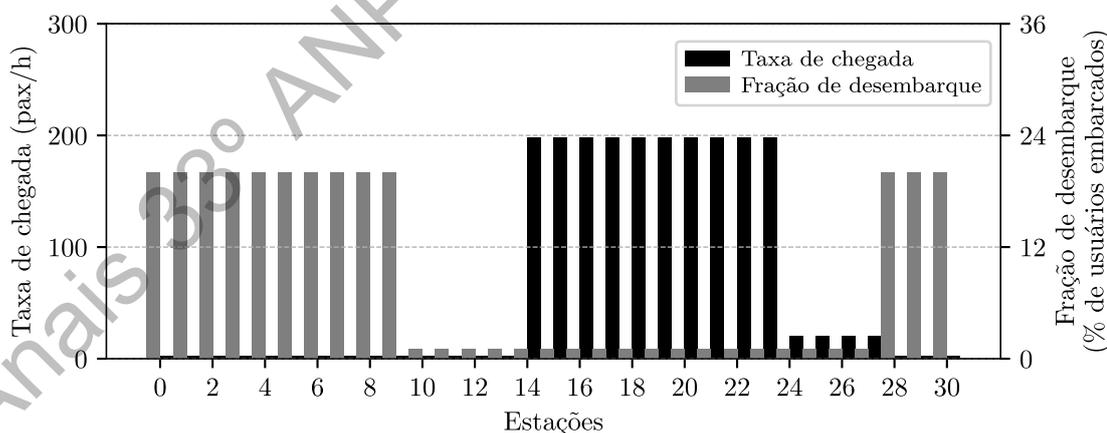


Figura 4: Padrão de demanda concentrada de usuários para teste dos métodos de controle.

Nessa simulação, os métodos de controle realimentado são aplicados com o mesmo ganho nominal $K_p = 0,7$ e o método opt.H, com horizonte de predição de 20 estações. Além disso, para o método FHv o β escolhido foi de 0,1 e l_{max} foi estimado considerando o carregamento em um cenário sem perturbações e seu valor foi de 102 passageiros.

Os resultados da aplicação dos controladores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Desempenho dos métodos testados.

Métodos	h_{med} (min)	h_{var}	r_{tot} (min)	E_{est} (min)	E_{emb} (min)
Sem controle	2,96	0,72	-	3,55	1,51
FH	3,13	0,13	90,45	2,36	2,49
FHv	3,11	0,24	78,13	2,60	1,86
opt.H	3,05	0,37	43,68	2,55	1,49

4.2. Intervalo médio e coeficiente de variação

Com a análise dos dados da Tabela 1, pode-se perceber que o coeficiente de variação dos intervalos foi menor para os casos controlados se comparados ao caso sem controle. Entre os primeiros, percebe-se que o método proposto teve valores intermediários, abaixo do controle preditivo, mas acima do método com ganho fixo.

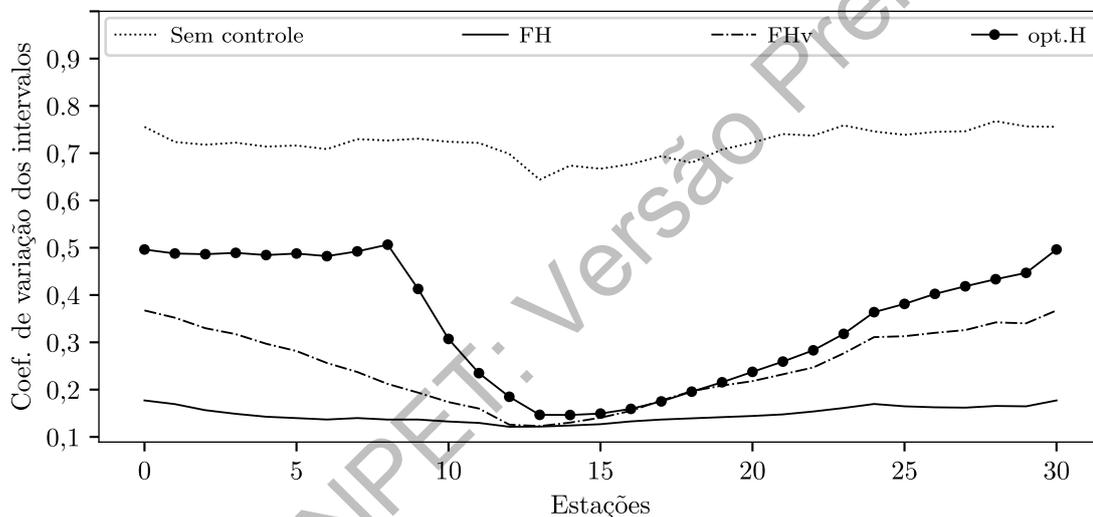


Figura 5: Variação dos intervalos ao longo do itinerário para diferentes métodos de controle.

A Figura 5 mostra a variação dos intervalos ao longo do itinerário e pode-se perceber que, enquanto o FH tradicional manteve o intervalo mais regular durante todo o trajeto, o método opt.H permitiu uma variação maior nas estações em que os ônibus se encontravam mais cheios. O método proposto, por sua vez, teve comportamento similar ao do controle preditivo de manter os intervalos mais regulares nas estações com menos passageiros a bordo, porém ainda chegou a aplicar algum esforço de controle em estações em que o opt.H preferiu não atuar.

4.3. Retenção total aplicada

Ao se observar o tempo total de retenção aplicado, nota-se que o novo método FHv conseguiu uma melhora considerável quando comparado ao caso de intervalo à frente tradicional, mesmo ficando atrás do opt.H de controle preditivo.

Na Figura 6, o carregamento médio dos ônibus é estimado através da média aritmética entre os diferentes métodos aplicados. Além disso são apresentados os valores referentes ao esforço de controle dos três métodos testados. Nota-se uma grande diferença no perfil de esforço de controle dos métodos que levam em consideração a quantidade de passageiros embarcados nos ônibus. Tanto o método FHv, quanto o opt.H concentram a aplicação de retenção em estações

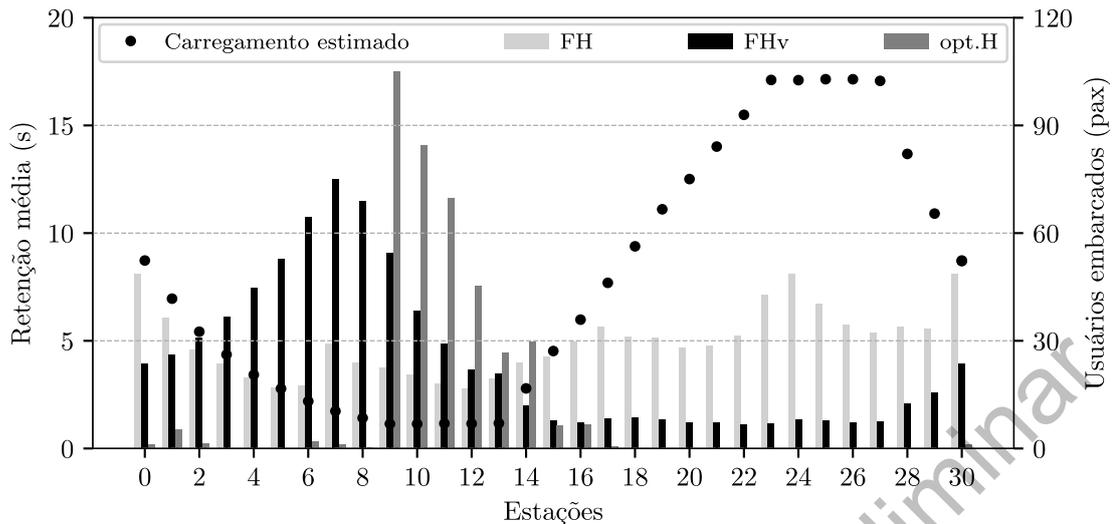


Figura 6: Ação de controle dos métodos testados e carregamento médio ao longo do itinerário.

onde os ônibus se encontram mais vazios, enquanto o FH distribui a retenção aplicada ao longo do itinerário.

4.4. Tempos de espera de usuários na estação e embarcados

Finalmente, com relação ao tempo de espera dos usuários na estação, percebe-se um aumento para os métodos que permitem uma variação maior para o intervalo entre os ônibus, como esperado. Deve-se lembrar que houve espera dos usuários apenas nas estações com taxa de chegada de passageiros de acordo com a Figura 4, e que o E_{est} é menor, quanto mais regulares forem os intervalos.

Na análise dos tempos de espera na estação, percebe-se uma diminuição considerável no valor do indicador para o método FHv, quando comparado ao FH tradicional, o que mostra que, mesmo sem a complexidade do método de controle preditivo, é possível diminuir a espera dos passageiros na estação sem penalizar tanto os passageiros embarcados.

Com este resultado conclui-se que a variação do ganho com o carregamento dos ônibus em métodos de controle realimentado traz como benefício a diminuição no tempo de espera dos passageiros embarcados. A consideração do carregamento atual, além da manutenção de intervalos regulares, nos métodos de controle realimentado mais simples os aproxima ao comportamento do preditivo.

5. CONCLUSÃO

Foi definido um novo método de controle realimentado FHv que apresenta as características do método de controle de intervalo a frente, porém com o seu ganho variando em função do carregamento atual de cada ônibus. A ideia de se incluir o carregamento dos ônibus no cálculo de aplicação de retenção surgiu com os resultados encontrados em Zimmermann (2016) através de testes realizados com um método de controle preditivo opt.H em um cenário com demanda concentrada. O novo método foi implementado juntamente com o FH e com o opt.H no mesmo cenário, utilizando o software de simulação de tráfego Aimsun.

Os resultados de simulação apresentados mostram que o comportamento do opt.H foi, de certa

forma, replicado no FHv, que trouxe melhora significativa ao tempo de espera dos passageiros embarcados. Foi possível concluir que é possível diminuir a espera dos passageiros na estação utilizando um método simples de controle realimentado proporcional sem causar um aumento tão grande na espera dos passageiros a bordo através da variação do ganho do controlador.

Para trabalhos futuros, propõe-se novas formas de variação para o ganho dos controladores proporcionais considerando outros aspectos, como o horizonte de predição do método preditivo. Dados do histórico podem fornecer aos métodos mais simples outros indicativos para definição dos melhores lugares para se aplicar retenção. Além disso, o método proposto pode ser testado com outros tipos de controle realimentado da literatura além do FH que podem se aproximar ainda mais do opt.H.

Agradecimentos

Os autores agradecem as sugestões recebidas de Renan Eccel e Sergio Prolo, que permitiram aprimorar o texto e eliminar diversas inconsistências. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barnett, A. (1974) On controlling randomness in transit operations. *Transportation Science*, v. 8, n. 2, p. 102–116.
- Berrebi, S. J.; E. Hans; N. Chiabaut; J. A. Laval; L. Leclercq e K. E. Watkins (2018) Comparing bus holding methods with and without real-time predictions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 87, p. 197–211.
- Cats, O.; A. Larijani; H. Koutsopoulos e W. Burghout (2011) Impacts of holding control strategies on transit performance. *Transportation Research Record*, v. 2216, p. 51–58.
- Eberlein, X. J.; N. H. M. Wilson e D. Bernstein (2001) The holding problem with real-time information available. *Transportation Science*, v. 35, n. 1, p. 1–18.
- Ibarra-Rojas, O.; F. Delgado; R. Giesen e J. Muñoz (2015) Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 77, p. 38–75.
- Koehler, L.; W. Kraus e E. Camponogara (2011) Iterative quadratic optimization for the bus holding control problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 12, n. 4, p. 1568–1575.
- Newell, G. F. e R. B. Potts (1964) Maintaining a bus schedule. *2nd Australian Road Research Board Conference*, v. 2, n. 1. Australian Road Research Board (ARRB), Melbourne, p. 388–93.
- PLAMUS (2015) *Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis*. URL: plamus.com.br/plamus.html.
- Strathman, J. G.; T. J. Kimpel; K. J. Dueker; R. L. Gerhart; K. Turner; D. Griffin e S. Callas (2001) Bus transit operations control: review and an experiment involving Tri-Met's automated bus dispatching system. *Journal of Public Transportation*, v. 4, n. 1, p. 1–26.
- TSS (2012) *AIMSUN Dynamic Simulator Users Manual v. 7*. Barcelona.
- Turnquist, M. (1982) *Strategies for Improving Bus Transit Service Reliability*. Rel. téc. Transportation Research Record 818. Evanston, IL: Northwestern University.
- Zimmermann, L. (2016) «Controle de intervalos entre ônibus: comparação entre métodos realimentados clássicos e controle preditivo baseado em modelo». Tese de mestrado. Florianópolis, Brasil: Universidade Federal de Santa Catarina, p. 83.
- Zimmermann, L.; W. Kraus e L. A. Koehler (2015) Análise de estratégias realimentadas para controle por retenção do intervalo entre ônibus. *XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da Anpet*.

Lucas Franco Lima (lucasfranco@ufsc.br)

Werner Kraus Junior (werner.kraus@ufsc.br)

Rodrigo Castelan Carlson (rodrigo.carlson@ufsc.br)

Lucas Zimmermann (zim.lucas@gmail.com)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, 88040-900, Brasil