



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Lucas Franco Lima

**CONTROLE REALIMENTADO DE INTERVALO ENTRE ÔNIBUS COM  
GANHO VARIÁVEL DE ACORDO COM O CARREGAMENTO**

Florianópolis

2020

Lucas Franco Lima

**CONTROLE REALIMENTADO DE INTERVALO ENTRE ÔNIBUS COM  
GANHO VARIÁVEL DE ACORDO COM O CARREGAMENTO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas.  
Orientador: Prof. Werner Kraus Junior, Dr.  
Coorientador: Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lima, Lucas Franco

Controle realimentado de intervalo entre ônibus com  
ganho variável de acordo com o carregamento / Lucas Franco  
Lima ; orientador, Werner Kraus Junior, coorientador,  
Rodrigo Castelan Carlson, 2020.

76 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. Transporte  
público. 3. Controle de intervalos. 4. Controle por  
retenção. 5. Controle realimentado com ganho variável. I.  
Kraus Junior, Werner . II. Carlson, Rodrigo Castelan .  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas. IV.  
Título.

Lucas Franco Lima

**CONTROLE REALIMENTADO DE INTERVALO ENTRE ÔNIBUS COM  
GANHO VARIÁVEL DE ACORDO COM O CARREGAMENTO**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Werner Kraus Junior, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Alexandre Hering Coelho, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Alberto Koehler, Dr.  
Universidade Regional de Blumenau

Prof. Daniel Ferreira Coutinho, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em automação e sistemas.

---

Prof. Werner Kraus Junior, Dr.  
Coordenador do Programa

---

Prof. Werner Kraus Junior, Dr.  
Orientador

Florianópolis, 14 de outubro 2020.

Este trabalho é dedicado à construção de um sistema de transporte público de qualidade e acessível, fundamental para o desenvolvimento de um mundo mais igualitário e sustentável.

## AGRADECIMENTOS

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração, pela oportunidade de realizar o curso. Aos professores Werner Kraus Jr. e Rodrigo Castelan Carlson, por promoverem um ambiente de trabalho saudável com todo o suporte técnico, mas também com o apoio psicológico necessário. Ao colega de trabalho Lucas Zimmermann, pela colaboração e companhia desde o início do desenvolvimento do projeto. Aos meus pais e irmãos, pelo suporte e respeito em cada tomada de decisão. À querida tia Célia, pela preocupação e presença durante mais esse ciclo. Aos demais familiares e amigos, que tornam qualquer jornada mais interessante e agradável. A todos que direta e indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Contra o pessimismo da razão, o otimismo da prática.  
(Antonio Gramsci)

## 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 instantes de partida dos ônibus por meio de retenção é uma técnica usada com esta finalidade, porém a sua aplicação pode incorrer em atraso para os usuários que estão embarcados. ZIMMERMANN et al. (2016) comparou diferentes métodos da literatura com um método de controle preditivo e identificou, com o último, melhoria considerável com uma ação de controle concentrada em estações ao longo do itinerário nas quais os ônibus estavam mais vazios. Com base nesses resultados, propõe-se duas técnicas de controle realimentado mais simples matemática e computacionalmente do que o controle preditivo que mantenham a característica de retenção em locais de menor carregamento dos ônibus. As novas técnicas baseiam-se na definição de um ganho variável para métodos de retenção por controle realimentado que faz com que retenções sejam aplicadas quando o ônibus tem um baixo carregamento, de maneira a reduzir a espera na estação sem penalizar muitos usuários embarcados. A primeira técnica proposta utiliza apenas dados do histórico do carregamento para redistribuir o ganho nominal ao longo do itinerário. A segunda, consiste em um controlador adaptativo com ganhos internos definidos pelo carregamento histórico, mas que usa a informação de carregamento em tempo real para definir o valor do ganho variável para um ônibus em uma determinada estação no instante de cálculo de retenção. As técnicas são combinadas aos métodos da literatura de controle de intervalo à frente (FH) e de controle de intervalo à frente e atrás (TWH), ambos do tipo realimentado. Esses dois controladores com ganho variável são comparados com os controladores correspondentes com ganho fixo, com um método que aplica apenas regulagem no terminal de origem, e com o próprio método de controle preditivo que inspirou seu desenvolvimento. O cenário dos testes é um corredor BRT modelado em ambiente de microssimulação com dois padrões de demanda diferentes. Resultados mostram que o método de controle preditivo continua apresentando os melhores resultados entre aqueles comparados. No entanto, as técnicas de variação do ganho propostas melhoram significativamente o desempenho do sistema em relação ao uso de um ganho fixo e aproximam seu comportamento seletivo ao carregamento àquele do controle preditivo.

**Palavras-chave:** Transporte público, controle de intervalos, controle por retenção, controle preditivo, controle realimentado com ganho variável.



## 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 delays for on-board passengers. ZIMMERMANN et al. (2016) compared different control methods from the literature with a predictive controller and identified an improvement in performance when the latter focused its holding at those stations along the itinerary for which the bus was emptier. Based on those results, this work proposes two feedback control techniques, both mathematically and computationally simpler than the predictive controller, but able to emulate its behaviour. The techniques define a variable gain throughout the route in order to apply longer holding times to the emptier buses so as to decrease the station delay without penalising the passengers on board. The first technique is based only on historic data of the bus loading to redistribute the nominal gain along the route. The second one consists of an adaptive controller with internal gains also based on the historic data, but that uses in real-time information from the bus loading to regulate the holding gain in the instant of its calculation. The techniques are combined with the traditional forward headway (FH) and two-way headway (TWH) holding feedback control methods. Both proposed techniques are compared with the traditional methods with fixed gain through the itinerary, with a method that applies some slack time only in the terminal station, and with the predictive control method that inspired the suggested solutions. The microsimulation environment used for the tests uses a scenario of a BRT corridor and two different demand patterns. Results show that the predictive control continues to provide the best results, but the proposed techniques improve significantly the traditional methods and are able to approximate the predictive control method's behaviour.

**Keywords:** Public Transport, headway control, holding control, predictive control, feedback control, variable gain.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama esquemático do sistema sob operação utilizada pelos métodos de controle apresentados. Fonte: adaptado de ZIMMERMANN (2016).....	30
Figura 2	Desvios-padrão dos tempos de viagem entre estações e médio global para cenário de simulação sem controle.....	32
Figura 3	Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com regulagem em terminal de origem.....	35
Figura 4	Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com controle FH.....	36
Figura 5	Diagrama esquemático do sistema sob operação com lei de controle do método TWH. Fonte: adaptado de ZIMMERMANN (2016).....	38
Figura 6	Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com controle TWH.....	39
Figura 7	Diagrama esquemático do sistema sob operação com lei de controle do método OPT.H. Fonte: ZIMMERMANN (2016).....	40
Figura 8	Comparação entre as distribuições dos tempos de regulagem ao longo do itinerário.....	44
Figura 9	Comportamento desejável do ganho com variações que (i) acompanham as tendências do carregamento e (ii) restauram ganho nominal se o carregamento for constante.....	46
Figura 10	Diagrama de blocos que representa o funcionamento do ganho adaptativo baseado na variação em tempo real do carregamento; o bloco $z^{-1}$ representa o atraso amostral.....	47
Figura 11	Variação dos ganhos propostos ao longo do itinerário.....	48
Figura 12	Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com método proposto FHv genérico, que foca a aplicação de retenção nas estações em que os ônibus se encontram mais vazios.....	49
Figura 13	Linha de ônibus utilizada no ambiente de simulação. Fonte: ZIMMERMANN (2016).....	51

Figura 14	Padrões de demanda concentrada (a) e distribuída (b) de usuários ao longo do itinerário para teste dos métodos de controle.....	52
Figura 15	Cálculo dos indicadores de tempo de espera.(a) na estação; (b) embarcado.	55
Figura 16	Variação dos intervalos ao longo do itinerário para diferentes métodos de controle em comparação com FH no cenário de simulação com demanda concentrada. ....	61
Figura 17	Tempo médio de espera dos usuários nas estações ao longo do itinerário em comparação com FH no cenário de simulação com demanda concentrada.	62
Figura 18	Tempo médio de espera dos usuários embarcados ao longo do itinerário em comparação com FH no cenário de simulação com demanda concentrada.	62
Figura 19	Ação de controle do método FHvh e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com FH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda concentrada. ....	63
Figura 20	Variação dos intervalos ao longo do itinerário para diferentes métodos de controle em comparação com TWH no cenário de simulação com demanda concentrada. ....	65
Figura 21	Ação de controle do método TWHvr e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com TWH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda concentrada.....	66
Figura 22	Variação dos intervalos ao longo do itinerário para diferentes métodos de controle em comparação com FH no cenário de simulação com demanda distribuída.....	68
Figura 23	Ação de controle do método FHvh e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com FH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda distribuída. ....	69
Figura 24	Ação de controle do método FHvh e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com FH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda concentrada com erro no carregamento esperado ao longo do itinerário. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Estudos sobre padrão de chegada. ....	28
Tabela 2	Parâmetros de simulação. ....	53
Tabela 3	Desempenho dos métodos FH com ganho variável para cenário com demanda concentrada. Comparação com métodos FH tradicional, RTO e opt.H, o último sem tempo de regulagem e, portanto, com intervalo médio menor. ....	59
Tabela 4	Desempenho dos métodos TWH com ganho variável para cenário com demanda concentrada. Comparação com métodos TWH tradicional, RTO e opt.H, o último sem tempo de regulagem e, portanto, com intervalo médio menor. ....	64
Tabela 5	Desempenho dos métodos FH com ganho variável para cenário com demanda distribuída. Comparação com métodos FH tradicional, RTO e opt.H, o último sem tempo de regulagem e, portanto, com intervalo médio menor. ....	67
Tabela 6	Desempenho dos métodos FH com ganho variável para cenário com demanda concentrada, mas com ganhos configurados de acordo com demanda distribuída. Comparação com métodos FH tradicional e com os mesmos ganhos variáveis caso tivessem sido configurados corretamente. ....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BRT	Sistema rápido de ônibus ( <i>Bus Rapid Transit</i> )
Prefol	Método de controle proposto por TURNQUIST (1982)
RTO	Controle por regulação em terminal de origem
FH	Controle de intervalo à frente ( <i>Forward Headway</i> )
TWH	Controle de intervalo à frente e atrás ( <i>Two-way Headway</i> )
opt.H	Controle preditivo dos intervalos
vh	Técnica de variação de ganho baseada em dados do histórico
vr	Técnica de variação de ganho com dados em tempo real
API	Interface de programação de aplicações ( <i>Application Programming Interface</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$i$	Índice de ônibus
$N_I$	Quantidade de ônibus em operação na linha
$I$	Conjunto de todos os ônibus em operação na linha
$k$	Índice de estação
$N_K$	Quantidade de estações na linha
$K$	Conjunto de todas as estações da linha
$h_{i,k}$	Intervalo de tempo entre partidas dos ônibus $i - 1$ e $i$ da estação $k$
$\hat{h}_{i,k}$	Intervalo de tempo esperado entre partidas dos ônibus $i - 1$ e $i$ da estação $k$
$d_{i,k}$	Instante de partida do ônibus $i$ da estação $k$
$\hat{d}_{i,k}$	Instante de partida esperado do ônibus $i$ da estação $k$
$a_{i,k}$	Instante de chegada do ônibus $i$ na estação $k$
$w_{i,k}$	Intervalo de tempo para processo de embarque e desembarque do ônibus $i$ na estação $k$
$r_{i,k}$	Tempo de retenção aplicado no ônibus $i$ na estação $k$
$r_{\max}$	Tempo máximo de retenção a ser aplicado
$s_k$	Tempo de regulagem aplicado para cada ônibus na estação $k$
$S_{\text{tot}}$	Tempo de regulagem total a ser aplicado em um tempo de ciclo
$v_{\text{med}k}$	Tempo de viagem médio dos ônibus entre estações $k$ e $k + 1$
$v_{i,k}$	Tempo de viagem do ônibus $i$ entre as estações $k$ e $k + 1$
$\sigma_v$	Desvio padrão do tempo de viagem
$\sigma_{\text{med}v}$	Desvio padrão médio dos tempos de viagens entre todas as estações
$T_c$	Tempo de ciclo
$H$	Intervalo de tempo planejado entre dois ônibus
$K_N$	Ganho nominal dos métodos de controle realimentado

$K_{Hk}$	Ganho variável baseado em dados do histórico
$K_{Ri,k}$	Ganho adaptativo em tempo real
$K_P$	Primeiro ganho interno do controlador que define o ganho adaptativo
$K_V$	Segundo ganho interno do controlador que define o ganho adaptativo
$\lambda_k$	Taxa de chegada de usuários à estação $k$
$q_k$	Porcentagem de usuários embarcados que desembarcam na estação $k$
$l_{i,k}$	Quantidade de usuários embarcados no ônibus $i$ que partem da estação $k$
$l_{\max}$	Carregamento crítico da linha
$l_{\text{med}k}$	Média de passageiros embarcados que partem da estação $k$
$n$	Número de portas para embarque e desembarque de cada ônibus
$C_0$	Tempo desde a chegada do ônibus na estação até o início do processo de embarque e desembarque
$C_1$	Tempo de embarque por usuário
$C_2$	Tempo de desembarque por usuário
$E_{\text{est}}$	Tempo de espera dos usuários na estação
$E_{\text{emb}}$	Tempo de espera dos usuários embarcados

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	MOTIVAÇÃO .....	16
1.2	OBJETIVO.....	17
1.3	PRODUÇÃO .....	17
1.4	ORGANIZAÇÃO.....	18
<b>2</b>	<b>CONTROLE DA OPERAÇÃO DE ÔNIBUS</b> .....	19
2.1	PRIMEIRA GERAÇÃO DE ESTUDOS SOBRE CONTROLE DE INTERVALOS ENTRE ÔNIBUS .....	22
2.2	SEGUNDA GERAÇÃO DE CONTROLE DA OPERAÇÃO.....	24
2.3	CONTROLE EM TEMPO REAL .....	25
2.4	PADRÕES DE DEMANDA.....	27
<b>3</b>	<b>MÉTODOS DE CONTROLE ESTUDADOS</b> .....	29
3.1	REGULAGEM EM TERMINAL DE ORIGEM (RTO) .....	32
3.2	CONTROLE DE INTERVALO À FRENTE (FH) .....	35
3.3	CONTROLE DO INTERVALO À FRENTE E ATRÁS (TWH).....	37
3.4	CONTROLE PREDITIVO (OPT.H) .....	38
<b>4</b>	<b>CONTROLE DE INTERVALO COM GANHO VARIÁVEL</b> .....	42
4.1	DISTRIBUIÇÃO DA REGULAGEM AO LONGO DO ITINERÁRIO .....	42
4.2	GANHO VARIÁVEL BASEADO EM DADOS DO HISTÓRICO ( $K_{Hk}$ ).....	44
4.3	GANHO ADAPTATIVO EM TEMPO REAL ( $K_{Ri,k}$ ) .....	45
4.4	ANÁLISE PRELIMINAR DOS MÉTODOS PROPOSTOS.....	47
<b>5</b>	<b>CENÁRIO E INDICADORES DE DESEMPENHO</b> .....	50
5.1	CENÁRIO DE APLICAÇÃO .....	50
5.2	INDICADORES DE DESEMPENHO .....	54
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	58
6.1	MÉTODO FH EM CENÁRIO COM DEMANDA CONCENTRADA .....	58
6.2	MÉTODO TWH EM CENÁRIO COM DEMANDA CONCENTRADA ....	64
6.3	MÉTODO FH EM CENÁRIO COM DEMANDA DISTRIBUÍDA.....	66
6.4	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MÉTODOS PROPOSTOS.....	69
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	72
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	74



## 1 INTRODUÇÃO

Em um serviço de transporte público, existe considerável dificuldade no cumprimento dos horários estipulados e na manutenção de intervalos entre ônibus. Essa dificuldade é acentuada em cenários com maiores demandas e deve-se a variações na própria velocidade dos veículos e nos tempos de embarque e desembarque de passageiros, entre outros fatores. A consequência dessas variações é uma tendência de pareamento de veículos quando nenhuma ferramenta de controle é aplicada para evitar esse comportamento. De fato, um ônibus que está atrasado acaba por encontrar mais passageiros à frente, o que aumenta os tempos de embarque, aumentando ainda mais o seu atraso; enquanto o oposto ocorre com um ônibus que se adianta, atendendo menos passageiros e se adiantando ainda mais (NEWELL; POTTS, 1964). Ocorre, portanto, uma irregularidade nos horários e intervalos dos ônibus. Para que o serviço seja oferecido de maneira eficiente e satisfatória para os usuários é importante que existam maneiras de diminuir essas irregularidades.

Esse fenômeno ocorre mesmo em sistemas em que os ônibus contam com corredores exclusivos e plataformas de pré-embarque na sua operação, os chamados sistemas do tipo Sistema Rápido de Ônibus (BRT, do inglês *Bus Rapid Transit*). Mesmo com os equipamentos de suporte ao pré-embarque, que tornam os tempos de embarque e desembarque mais previsíveis, os veículos continuam sujeitos à instabilidade causada por diferentes velocidades de condução, semáforos encontrados no caminho, além de sofrerem agravamento de qualquer perturbação por operarem em alta frequência (WRIGHT; HOOK, 2007).

Uma das formas para diminuir a instabilidade operacional nos sistemas de transporte público é a aplicação de retenções nos veículos que estejam adiantados no seu percurso (IBARRA-ROJAS et al., 2015) com objetivo de melhorar o cumprimento de um 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). Para isso, podem ser usados métodos de controle em tempo real que utilizam informações do próprio sistema em operação (EBERLEIN; WILSON; BERNSTEIN, 2001).

O emprego de retenção por métodos de controle em tempo real provoca um aumento na confiabilidade do sistema e vem acompanhado de uma redução no tempo de espera dos passageiros nas estações, assim como uma distribuição mais equilibrada do carregamento 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; KRAUS; KOEHLER, 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. 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 afim de manter a regularidade. Já o método preditivo é baseado em um modelo que define os valores de retenção a serem aplicados através da minimização de uma função objetivo que representa o tempo de espera tanto dos usuários que aguardam na estação quanto dos passageiros já embarcados (KOEHLER; KRAUS; CAMPONOGARA, 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 dos instantes de partida dos ônibus de cada estação nos trechos em que a lotação dos ônibus é maior. Assim, o controle preditivo baseado no modelo que descreve a dinâmica do sistema 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.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Apesar de produzir os melhores tempos de espera aos usuários do sistema, o método de controle preditivo faz uso de uma quantidade significativamente maior de informações que devem estar disponíveis para o seu funcionamento. Além disso, seus melhores resultados são alcançados com um horizonte de predição alto, o que significa que dependem da predição correta de variáveis relacionadas à uma quantidade maior de estações à frente no futuro. Esses fatores fazem com que o método de controle preditivo necessite de maiores tempos de cálculo devido à complexidade computacional de sua implementação.

Por outro lado, a aplicação do controle preditivo indicou ser preferível atuar por meio de retenções em trechos com carregamento menor de passageiros, o que é razoável: menos pessoas a bordo são submetidas ao atraso adicional causado pela ação de controle. Assim, parece ser promissor combinar o uso de controles simples, de tipo realimentado, com atuações mais intensas em situações de baixo carregamento dos ônibus. Uma possibilidade de realizar essa combinação é usar controladores realimentados com ganho variável de acordo com o carregamento.

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 como feito usualmente.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é replicar o desempenho do controle preditivo baseado em modelo de ZIMMERMANN (2016) por meio de uma estrutura de controle realimentado proporcional com o uso de um ganho variável no controlador que é dependente do carregamento do ônibus. O ganho de um controlador proporcional de intervalos entre ônibus, tipicamente fixo, é utilizado para definir a rigidez da aplicação de controle de acordo com a variação observada. Com a variação do ganho espera-se encontrar métodos de controle mais simples matematicamente e que requeiram menos esforço computacional que o controle preditivo, mas que se beneficiem do aprendizado oriundo de sua aplicação.

Uma das propostas para variação do ganho nominal dos métodos de controle realimentado tradicionais consiste na análise dos dados do histórico de carregamento da linha em operação. Ainda na etapa de planejamento, esses dados são utilizados para a definição de uma nova distribuição do ganho nominal de acordo com a quantidade de usuários que se espera encontrar em cada estação.

A segunda proposta também faz uso dos dados do histórico para configuração de ganhos internos de um controlador com ganho adaptativo que define o fator de multiplicação do ganho nominal dos métodos tradicionais. Esse controlador também busca concentrar maiores valores de ganho em estações menos carregadas, mas faz uso da informação de carregamento em tempo real.

Os novos métodos são testados no mesmo cenário de microsimulação de ZIMMERMANN (2016) e os resultados de dez replicações para cada um dos métodos são comparados.

## 1.3 PRODUÇÃO

Artigo publicado em congresso:

- LIMA, L. et al. Controlador realimentado de intervalo entre ônibus com ganho variável de acordo com o carregamento. **33º Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2019.

Artigo aceito para publicação:

- LIMA, L. et al. Redução da espera a bordo por controle de intervalo entre ônibus adaptado ao carregamento. **34<sup>o</sup> Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2020.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

- O Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica sobre o tema, apresentando a evolução desde os primeiros trabalhos até as contribuições mais recentes.
- O Capítulo 3 apresenta as leis de controle dos métodos da literatura utilizados no trabalho.
- No Capítulo 4, as estratégias de controle propostas são apresentadas.
- No Capítulo 5, são apresentados o cenário de simulação, os padrões de demanda e os indicadores de desempenho utilizados.
- No Capítulo 6, os resultados são analisados e discutidos.
- O Capítulo 7 conclui a dissertação incluindo um resumo dos resultados e propostas para futuros estudos.

## 2 CONTROLE DA OPERAÇÃO DE ÔNIBUS

Pode-se notar um crescimento da preocupação dos políticos e administradores no sentido de aumentar a atratividade do transporte público para os usuários de carros privados. Uma mudança significativa da população para o modo de transporte público resultaria em diminuição de congestionamento, melhoria do fluxo e operação de todos os modos de transporte que continuariam utilizando as vias, além de consideráveis benefícios ao meio ambiente decorrentes de uma menor circulação de veículos (BALCOMBE et al., 2004).

De acordo com BALCOMBE et al. (2004), algumas das principais manifestações de insatisfação por parte dos usuários do transporte público são relacionadas à falta de confiabilidade no serviço. Esse problema geralmente é caracterizado por tempos de espera e tempos totais de viagem excessivos. Os primeiros são causados por atrasos nas chegadas dos ônibus e os segundos, geralmente, por problemas no tráfego.

Condições gerais de tráfego podem causar problemas na confiabilidade do serviço de transporte público devido a acidentes, mau funcionamento de veículos, movimentos de viradas e trocas de faixa, carros estacionados ilegalmente, condições do tempo, interseções semaforizadas, variações na demanda de usuários e até pelas próprias características do motorista. Além disso, um maior volume do tráfego leva a maiores variações nos tempos de viagem dos ônibus, estabelecendo uma relação entre densidade de tráfego e confiabilidade do sistema (ABKOWITZ, 1978).

A baixa qualidade de serviço prestado e melhores possibilidades de traslado oferecidas por outros meios dificultam a adesão ao transporte público por parte dos potenciais usuários. Novas ruas, túneis e pontes servem muito bem o transporte por carros privados, enquanto investimentos em melhoramento no transporte público são bem menos frequentes; por outro lado, o transporte público por ônibus tem índices de segurança muito melhores, assim como efeitos de melhora no fluxo do tráfego, diminuindo congestionamentos, e também de diminuição na emissão de gases tóxicos para preservação do meio ambiente (CEDER, 2007).

De acordo com CEDER (2007), existem três fatores mais determinantes para a preferência do transporte público pelos usuários: (a) falta de alternativa, (b) oferta de um sistema mais confortável que o carro privado e (c) oferta de um sistema de transporte público confiável.

Um sistema de transporte confortável (b) pode ser identificado ao apresentar: comunicação inteligente com os usuários, através de disponibilização de dados em tempo

real em aplicativos, sinalização efetiva; transferências coordenadas entre linhas sem perda de tempo; atratividade do *design* no interior do veículo, com ar condicionado e cadeiras confortáveis; e oferecimento de serviços de bordo, como jornais, televisão, Wi-Fi, entre outros (CEDER, 2007).

A definição de CEDER (2007) para um transporte público confiável (c) compreende fatores como tempos de viagem razoáveis, baixa distância de caminhada para (e a partir de) as estações, tempos de espera baixos, tarifas acessíveis, transferências executáveis, cumprimento dos horários estipulados, assim como disponibilidade de assentos e credibilidade das informações fornecidas. No entanto, esses indicadores são qualitativos e dependem da percepção de cada usuário do sistema, o que caracteriza essa definição de confiabilidade como abstrata. Torna-se necessário, portanto, a descrição destes fatores em termos matemáticos.

O controle da operação de transporte público, conforme apresentado no Capítulo 1, influencia diretamente o cumprimento dos horários estipulados; a disponibilidade de assentos, com maior regularização e distribuição de passageiros; e os tempos de espera dos usuários, tanto embarcados quanto à bordo. Dessa forma, percebe-se a relevância da manutenção de horários regulares para a confiabilidade do sistema de transporte público.

Mudanças no nível de confiabilidade de um sistema já estável podem servir aos interesses dos operadores de ônibus para beneficiar economicamente o seu sistema de atuação influenciando tanto custos quanto receitas (ABKOWITZ, 1978). Mesmo com todos os benefícios citados relacionados a um sistema de transporte público confiável, os operadores podem ter objetivos diferentes ao oferecerem esse serviço. Dessa forma, uma alteração na frota disponível para uma determinada rota pode transformar os benefícios de confiabilidade existentes em outros tipos de ganhos aos operadores. A diminuição da frota pode levar à economia de gastos, enquanto um aumento na frota pode fazer com que mais usuários usem o sistema e causar um aumento na receita.

O trabalho realizado por NEWELL; POTTS (1964) traz a primeira demonstração por meio de formulação analítica do efeito de pareamento causado por uma pequena perturbação no sistema de transporte público sem utilização de ferramentas de controle. Considera-se um pequeno atraso sofrido por um ônibus em uma estação específica. Na estação seguinte, o mesmo ônibus acabará encontrando mais passageiros para embarcar, já que mais passageiros puderam chegar antes do ônibus atrasado. Mais passageiros esperando na estação resulta em um intervalo de embarque de usuários também maior, o que aumenta ainda mais o atraso do ônibus para a estação seguinte em que o ciclo se repete. Por outro lado, o ônibus que vem atrás acaba encontrando menos passageiros para embarcar, já que alguns dos que haviam sido designados a esse ônibus na etapa de

planejamento conseguiram embarcar no veículo que se atrasou. Menos passageiros para entrar no ônibus em cada estação causam menores tempos de embarque que o planejado e o ônibus acaba por se adiantar mesmo sem receber influência direta para isso. Da mesma forma, o ônibus seguinte acaba se atrasando e o próximo se atrasa, replicando o efeito.

Como consequência do efeito de pareamento, os ônibus atrasados têm tendência a ficarem mais carregados de usuários, que acabam tendo que enfrentar maiores tempos de viagem em situação desconfortável de superlotação já depois de terem sofrido um tempo de espera na estação maior que o planejado. Enquanto isso, os ônibus adiantados acabam pegando menos usuários e tendem a circular com assentos vazios. A regularização do sistema promove, portanto, carregamentos mais uniformes e uma experiência mais confortável para os usuários, além de um transporte mais confiável em termos de cumprimento de horário.

É evidente que as decisões tomadas durante a operação do sistema influenciam a confiabilidade do sistema de transporte público. No entanto, essas decisões envolvem, implicitamente, uma troca entre fatores como tempos de viagem e seus componentes e fatores de variabilidade experienciados pelos usuários do sistema. Quando as decisões são tomadas de forma a maximizar a adesão ao cronograma estipulado ou ao intervalo planejado, elas acabam ignorando preferências dos usuários como resultado. A aplicação de retenções durante o itinerário, por exemplo, diminui a variabilidade experienciada por futuros usuários do sistema penalizando os usuários que já estão fazendo uso e que acabam tendo que esperar nos veículos durante a atuação desse método de controle. Conceitualmente, estratégias de melhoria da operação resultam em comparar as preferências de usuários reais com a de potenciais usuários em um sistema com ferramentas de controle (ABKOWITZ, 1978).

ABKOWITZ (1978) usa duas classificações diferentes para distinguir estratégias de controle com o objetivo de melhorar a confiabilidade de um sistema de transporte público. Primeiramente, com relação à forma com que a técnica é aplicada, o autor divide as estratégias entre métodos de prioridade, que envolvem tratamento especial aos veículos de transporte público; métodos operacionais, que trabalham com mudanças de rotas, cronograma e alocação de recursos, e; estratégias de controle, em que ocorrem mudanças dinâmicas durante a operação do sistema alterando o planejamento original.

A segunda classe de ABKOWITZ (1978) divide as estratégias com relação ao estágio em que são aplicadas como preventivas e corretivas. Enquanto as estratégias preventivas tentam reduzir a possibilidade de desvios no cronograma ainda na etapa de planejamento do sistema, as corretivas atuam no sentido de corrigir os desvios que já ocorreram durante a operação.

A utilização de um tempo de regulação na etapa de planejamento dos intervalos e tempos de partida do sistema, pode ser classificada como uma estratégia operacional e preventiva. Por outro lado, a aplicação da retenção e a variação desse tempo de regulação durante a operação do sistema como forma de manutenção dos intervalos entre ônibus sem prejudicar o tempo de espera dos passageiros é uma estratégia de controle corretiva.

As próximas seções são dedicadas a apresentar o histórico da evolução do controle de intervalos entre ônibus ao longo da história. A classificação de STRATHMAN et al. (2001) é utilizada para separar os trabalhos desenvolvidos em três gerações principais. Por fim, serão apresentados alguns estudos que mostram a relação dos padrões de demanda com o planejamento, controle e confiabilidade de uma linha.

## 2.1 PRIMEIRA GERAÇÃO DE ESTUDOS SOBRE CONTROLE DE INTERVALOS ENTRE ÔNIBUS

Como apresentado anteriormente, o deslocamento dos veículos de transporte público está frequentemente sujeito a atrasos e incertezas que não podem ser antecipadas nas etapas de planejamento. Uma das ações de controle mais comumente empregadas como resposta a essas perturbações é a aplicação de retenções aos ônibus adiantados em relação ao intervalo para o ônibus à frente ou ao quadro de horários (LEVINSON, 1991). O objetivo dessa estratégia é o de aumentar a regularidade e confiabilidade do sistema.

A aplicação de retenção influencia diversas condições de operação em um sistema de transporte público como a quantidade de passageiros embarcados pelos ônibus ao longo da linha, a frequência do serviço prestado, a variação dos intervalos entre ônibus, entre outros. Mesmo assim, a técnica é utilizada por motoristas e supervisores na prática, mesmo em linhas que não possuam estratégias de controle bem definidas, através de suas experiências e julgamento (HICKMAN, 2001).

As formas mais simples e comuns para aplicação de retenção são a retenção por tempo limite (*threshold-based holding*) ou a retenção por quadro de horários (*schedule-based holding*). No primeiro caso, os ônibus são retidos quando chegam a uma determinada estação com intervalo menor que o limite estabelecido para o ônibus da frente e aguardam até que esse valor seja estabelecido antes de partir. A retenção por quadro de horários, por sua vez, retém os veículos até o instante de partida planejado para uma determinada estação ou são despachados imediatamente, se chegam depois desse horário (ABKOWITZ; TOZZI, 1986).

Os primeiros trabalhos desenvolvidos nessa área se utilizaram da estratégia de retenção por tempo limite. Esses trabalhos faziam uso de modelos analíticos de linhas



simples, número limitado de veículos (um ou dois) e linhas com poucas paradas em circuitos, em que os ônibus reiniciavam uma nova volta quando retornavam à estação de origem. Devido a essas limitações estruturais dos modelos, seus resultados não eram diretamente aplicáveis a linhas de um sistema real (HICKMAN, 2001).

O modelo de OSUNA; NEWELL (1972) tinha como objetivo encontrar o valor limite que minimizasse o tempo médio de espera dos usuários na única estação para embarque do sistema. BARNETT; KLEITMAN (1973) inseriram mais estações de parada no modelo anterior e passaram a permitir a aplicação de retenção em dois pontos possíveis. Com isso, puderam concluir que a localização do ponto de aplicação era crucial para a minimização do tempo de espera na estação dos usuários. BARNETT (1974) inseriu na função objetivo o tempo de espera dos usuários a bordo além da espera dos usuários nas estações, mantendo como variável de decisão o valor limite e intervalo para aplicação da retenção.

KOFFMAN (1978) comparou diferentes valores limites para aplicação de retenção em um mesmo cenário de simulação e concluiu que, quanto maior o valor limite definido, menor o tempo de espera dos usuários na estação e maior o tempo de viagem dos usuários embarcados.

TURNQUIST; BLUME (1980) examinam as condições sob as quais o controle por retenção baseado no valor limite pode beneficiar os tempos de espera tanto dos usuários nas estações quanto dos embarcados. Os autores mostraram que os benefícios da retenção são maiores quando o coeficiente de variação dos intervalos também é alto e/ou quando a relação passageiros embarcados e passageiros aguardando para embarcar nas estações subsequentes é baixa. Além disso, os autores também concluíram sobre a importância de se aplicar a retenção o quanto antes no itinerário, para evitar a propagação de desvios de intervalo.

As principais contribuições dessa primeira geração de controle para transporte coletivo urbano foram resumidas por STRATHMAN et al. (2001) como:

- A retenção impõe custos aos usuários já embarcados na forma de aumento de tempo de viagem.
- A retenção impõe custos aos operadores do sistema na forma de aumento de tempo de circulação dos ônibus.
- A definição de pontos de controle apropriados é crucial para a minimização dos tempos de espera agregados.
- O controle de intervalos é mais eficaz se aplicado quando o carregamento dos ônibus é baixo e a demanda de passageiros a embarcar nas estações subsequentes é alta.

- A retenção é mais eficaz para reduzir os tempos de espera nas estações imediatamente à frente do ponto de aplicação.
- A variação dos intervalos volta a crescer depois da aplicação da ação de controle.
- A retenção pode se mostrar prejudicial à operação em determinadas situações, por aumentar os intervalos médios e tempo de espera dos passageiros embarcados.

## 2.2 SEGUNDA GERAÇÃO DE CONTROLE DA OPERAÇÃO

A principal diferença entre os métodos estudados da segunda geração de controle de operação é o fato de estes terem sido validados empiricamente com os dados reais de sistemas de transporte público.

TURNQUIST; BOWMAN (1980) usaram dados de Evanston, Illinois, EUA, para provar que o controle por quadro de horários é mais apropriado para sistemas de transporte em que o intervalo entre os ônibus é maior.

ABKOWITZ; ENGELSTEIN (1984) usaram um algoritmo com dados de Cincinnati, Ohio, EUA, para identificar os locais com maior diminuição de tempo de espera dos usuários para uma aplicação específica de controle por limite de intervalo. Os autores confirmaram que a definição do ponto ótimo de aplicação para a retenção depende da relação entre passageiros embarcados e usuários a embarcar nas estações subsequentes e também que os maiores beneficiários da ação de controle seriam os usuários imediatamente a jusante do ponto de controle.

O estudo de ABKOWITZ; TOZZI (1986) mostrou que a variação do intervalo não aumenta linearmente ao longo do itinerário depois de uma perturbação no sistema. Em vez disso, ela aumenta acentuadamente com baixos valores de variação nos tempos de cada ônibus em específico, até voltar a diminuir quando o efeito de pareamento acontece.

TURNQUIST (1982) também utilizou dados da cidade de Evanston para comparar a estratégia de controle para regularização de intervalos por tempo limite com uma nova proposta. O novo método chamado “Prefol” se diferencia do anterior por comparar o intervalo para o ônibus da frente com o intervalo para o ônibus de trás ao invés de usar o intervalo planejado como referência. A estratégia consiste em aplicar a retenção em um determinado ônibus até que o seu intervalo para o ônibus da frente seja o mais próximo possível ao intervalo para o ônibus de trás. O autor concluiu que os dois métodos apresentam resultados similares quando os intervalos dos ônibus em operação são altamente correlacionados, isto é, o atraso de um veículo é a causa do adiantamento do próximo, como no modelo de NEWELL; POTTS (1964). No entanto, quando a correlação dos inter-

valos é menor, devido a existência de perturbações frequentes no sistema, o novo método apresenta melhor desempenho.

Priorização semafórica também pode ser um mecanismo para redução no atraso de alguns ônibus em interseções sinalizadas e contribuir para a regularização da operação (ABKOWITZ; ENGELSTEIN, 1983). Essa estratégia envolve a prorrogação da fase de verde ou a troca para a mesma com a aproximação de um ônibus atrasado a uma determinada interseção. Ao contrário da aplicação de retenção, essa alternativa pode reduzir tanto tempos de viagem quanto tempo de espera nas estações para os passageiros. No entanto, esses ganhos são obtidos a custo de disrupções no tráfego de uma via para os demais usuários, além de afetar negativamente linhas que possam atravessar aquela que está sendo controlada.

Para STRATHMAN et al. (2001), as principais contribuições dos trabalhos da segunda geração de estudos para controle de operação do transporte coletivo são:

- A aplicação da retenção tende a ser mais efetiva quanto antes for aplicada depois de sofrida alguma perturbação.
- Fatores humanos influenciam consideravelmente o sucesso ou a falha de estratégias de aplicação de controle.
- Devem haver regras estabelecidas para auxiliar os supervisores de campo na decisão de aplicação ou não de ações de controle.
- Ações de controle devem ser validadas com a utilização de dados reais de operações do transporte público.
- Priorização semafórica pode trazer benefícios aos usuários e operadores de uma determinada linha, mas impõe um custo no tráfego geral de veículos, podendo impactar negativamente em linhas que a atravessem.

### 2.3 CONTROLE EM TEMPO REAL

Com o avanço de tecnologias relacionadas à localização automática de veículos, contagem automática de passageiros e até com o aumento da capacidade de processamento e transmissão de dados foi possível o desenvolvimento de sistemas de controle da operação em tempo real. Esses sistemas permitem o acesso a informações como instantes de partida das estações, carregamento, velocidade e posição dos veículos de forma instantânea aos supervisores do sistema.

EBERLEIN; WILSON; BERNSTEIN (1999) examinaram diferentes estratégias de controle para transporte público através da formulação de modelos matemáticos que assumem a disponibilidade de informações sobre a localização dos veículos. Os autores também testam combinações de diferentes estratégias aplicadas em conjunto e chegaram a resultados melhores que aqueles dos métodos anteriores. EBERLEIN; WILSON; BERNSTEIN (2001) também utilizaram dados em tempo real em conjunto com dados do histórico no desenvolvimento de um modelo analítico e determinístico para um sistema de transporte sobre trilhos. O modelo apresenta como variável de decisão o tempo de retenção para os próximos veículos dentro de um horizonte de predição no ponto de controle definido.

DESSOUKY et al. (2003) compararam estratégias de controle que dependem de tecnologia moderna para aquisição de dados em tempo real e também para comunicação entre supervisores e motoristas com aqueles métodos que dependem apenas de informações locais (instantes de chegada e partida de ônibus de uma mesma estação, por exemplo). Os métodos que apresentaram melhores resultados também são os que fazem uso de tecnologias mais sofisticadas.

Os trabalhos de DAGANZO (2009) e DAGANZO; PILACHOWSKI (2011) incorporaram aos métodos de controle o tempo de regulação que os operadores adicionavam ao tempo de ciclo para garantir que os ônibus tivessem alguma folga para manter os instantes planejados no quadro de horários de uma determinada linha. DAGANZO (2009) propõe um método de controle que determina de forma dinâmica a retenção a ser aplicada nos pontos de controle selecionados utilizando informação em tempo real para regularizar seu intervalo em relação ao ônibus da frente. Ao adicionar a ferramenta de controle, o coeficiente de variação dos intervalos diminui consideravelmente, o que também reduz o tempo de regulação necessário. Dessa forma, o estudo mostra uma melhoria no indicador de velocidade comercial dos ônibus do sistema, mas perde eficiência com grandes perturbações.

DAGANZO; PILACHOWSKI (2011) têm o objetivo principal de impedir o efeito de “fuga” que ocorre pelo fato de os ônibus atrasados não conseguirem diminuir seus intervalos em relação aos ônibus da frente quando grandes perturbações aparecem no sistema. Os autores utilizam um método parecido ao Prefol desenvolvido por TURNQUIST (1982), porém sem aplicação de controle através de retenção. Ao invés disso, o método proposto faz o controle das velocidades dos veículos para obter a regularização dos intervalos.

KOEHLER; KRAUS; CAMPONOGARA (2011) utilizaram um modelo determinístico com o objetivo de calcular tempos de retenção para múltiplos pontos de controle ao longo de uma linha. O modelo assume a disponibilidade de informação em tempo real e de dados do histórico do sistema. Seu objetivo é de otimizar a soma dos tempos de espera dos usuários na estação ao tempo de espera dos usuários a bordo e tem como variável de

decisão a retenção a ser aplicada em cada estação. Para solucionar o problema em tempo real, os autores utilizaram um procedimento iterativo de programação quadrática com horizonte de predição deslizante e o seu resultado foi melhor que aqueles dos métodos de controle realimentados tradicionais.

ZIMMERMANN (2016) comparou, por microsimulação de tráfego, métodos de controle realimentado proporcional com o método de controle preditivo de KOEHLER; KRAUS; CAMPONOGARA (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 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 ao custo de menor regularidade.

BERREBI et al. (2018) compararam diferentes métodos de retenção utilizados na prática com métodos recomendados pela literatura e analisaram 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.

## 2.4 PADRÕES DE DEMANDA

Os padrões de chegada de usuários em estações é de extrema importância por duas razões principais. Primeiramente, eles determinam os tempos de espera na estação desses usuários, que é um fator muito importante para a atratividade do sistema de transporte público. Além disso, eles também influenciam a estabilidade do sistema de transporte; grandes variações na chegada de passageiro às estações pode acabar atrasando os ônibus e causar variações no comportamento planejado (LUETHI; WEIDMANN; NASH, 2007).

Diversas pesquisas indicam que o intervalo planejado entre os ônibus é o principal fator que influencia as taxas de chegadas de usuários nas estações de uma determinada linha. LUETHI; WEIDMANN; NASH (2007) analisam essa influência de forma empírica e conseguem estabelecer a seguinte relação entre os dois fatores: assumindo que os usuários têm o objetivo de minimizar seus tempos de espera nas estações, espera-se que, em linhas de baixa frequência, estes cheguem na estação em instantes mais próximos ao horário estabelecido de chegada dos ônibus. Por outro lado, em linhas de alta frequência, os

usuários se importam menos com os horários planejados e tendem a chegar em um padrão aleatório às estações.

Além disso, a confiabilidade do sistema de transporte também é de grande relevância para o padrão de demanda de seus usuários. Quando os instantes de chegada dos ônibus na estação são conhecidos pelos usuários regulares, seu processo de chegada nas estações se torna menos aleatório. Dessa forma, pode-se concluir que o uso de ferramentas de controle para manutenção dos intervalos ou quadros de horários de um sistema que o tornam mais confiável, acabam influenciando também no padrão de demanda de seus usuários (STRATHMAN; HOPPER, 1993).

Com essas considerações, diversos estudos sobre os padrões de demanda de usuários, tentam identificar o limite para a definição do intervalo entre ônibus que indica a transição de uma linha de alta frequência para uma linha de baixa frequência. Os estudos usam como fator de comparação entre os dois casos o padrão de demanda aleatório para o primeiro caso e padrão de demanda concentrado, próximo ao instante de chegada dos ônibus nas estações, para o segundo. Alguns dados desses estudos podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1 – Estudos sobre padrão de chegada.

Estudo	Cidade, País	Intervalo mínimo
LUETHI; WEIDMANN; NASH (2007)	Zurique, Suíça	6 minutos
BUKKAPATNAM; DESSOUKY; ZHAO (2003)	Illinois, EUA	12 minutos
JOLLIFFE; HUTCHINSON (1975)	Londres, Inglaterra	12 minutos
O'FLAHERTY; MANGAN (1970)	Leeds, Inglaterra	5 minutos
SEDDON; DAY (1974)	Manchester, Inglaterra	7,5 minutos
WEBER (1966)	Stuttgart, Alemanha	7 minutos

Percebe-se uma grande variação de intervalo mínimo para definição de uma linha de baixa frequência nos experimentos verificados pelos estudos da Tabela 1. Isso mostra a forte relação entre os fatores específicos de confiabilidade e de usuários regulares de cada cidade.

Neste trabalho, os instantes de chegada dos usuários são fundamentais para cálculo do indicador de desempenho de tempo de espera na estação. Por isso, a definição de um modelo de padrão de chegada que corresponda à realidade é importante. Para o cenário apresentado, são considerados intervalos de três minutos entre os ônibus, o que configura uma linha de alta frequência em todos os estudos citados, portanto, pode-se assumir que a chegada de usuários não depende do instante de chegada dos ônibus.

### 3 MÉTODOS DE CONTROLE ESTUDADOS

Quatro métodos de controle da literatura são apresentados neste capítulo. O primeiro é o método que serve como referência para menor aplicação possível de controle, apenas com regulagem sendo aplicada no terminal de origem. Outros dois são métodos de controle realimentado proporcional que aplicam retenções buscando o equilíbrio entre os intervalos de ônibus, enquanto o quarto é um método de controle preditivo com o objetivo de minimizar o tempo de espera de todos os usuários do sistema. Os quatro métodos foram selecionados para serem comparados aos métodos de controle realimentado com ganho variável propostos no Capítulo 4.

Os métodos de controle realimentado apresentados nas seções deste capítulo podem ser empregados com o ganho variável para a aplicação de retenção de acordo com a quantidade de passageiros a bordo. Portanto, o uso dos diferentes métodos permite melhor visualização das técnicas propostas no Capítulo 4 e sua comparação com os comportamentos do método com regulagem em terminal e com o controle preditivo.

O modelo utilizado para uma linha de ônibus é o mesmo em todos os métodos de controle comparados e é descrito em ZIMMERMANN (2016). Todos os ônibus (numerados em ordem de saída com índice  $i$  saem do terminal inicial com intervalo planejado de diferença entre si e percorrem o itinerário circular preestabelecido. Durante o mesmo, os ônibus passam por estações de embarque e desembarque numeradas em ordem crescente ao longo do itinerário (índice  $k$ ). Sempre que um ônibus finaliza o processo de embarque e desembarque em alguma estação o estado do sistema é atualizado e o tempo de retenção ( $r_{i,k}$ ) a ser aplicado para este ônibus nesta estação é calculado a partir do método de controle selecionado.

O intervalo  $h_{i,k}$  a ser calculado para cada ônibus em cada estação é definido por:

$$h_{i,k} = d_{i,k} - d_{i-1,k}, \quad (3.1)$$

em que  $d_{i,k}$  representa o instante de partida do ônibus  $i$  da estação  $k$ . Com as linhas circulares, existe mais um índice utilizado nas simulações referente à volta em que os ônibus se encontram. No entanto, como ele não é importante para os métodos de controle utilizados, as representações descritas no trabalho identificam apenas os índices dos ônibus e estações.

O problema dessa definição é que, no instante do cálculo da retenção, ainda não se conhece  $d_{i,k}$ , já que o mesmo depende do tempo de retenção que ainda será aplicado.

Calcula-se, portanto, o instante de partida esperado do ônibus  $i$  na estação  $k$ , através de:

$$\hat{d}_{i,k} = a_{i,k} + w_{i,k}, \quad (3.2)$$

em que  $a_{i,k}$  é o instante de chegada do ônibus  $i$  na estação  $k$  e  $w_{i,k}$  é o tempo para embarque e desembarque dos passageiros do mesmo evento. Dessa forma, utiliza-se o intervalo esperado, definido por:

$$\hat{h}_{i,k} = \hat{d}_{i,k} - d_{i-1,k}, \quad (3.3)$$

para que os métodos de controle realimentado possam determinar a quantidade de retenção a ser aplicada.

Uma vez calculado o tempo de retenção, o intervalo real entre os ônibus pode ser reescrito como:

$$h_{i,k} = \hat{h}_{i,k} + r_{i,k}, \quad (3.4)$$

em que  $h_{i,k} = \hat{h}_{i,k}$  caso nenhum método de controle seja aplicado, o que corresponde a definir todo  $r_{i,k}$  igual a zero.

A Figura 1 representa esquematicamente o sistema e a terminologia utilizada para o seu entendimento. Os intervalos entre ônibus sempre se referem à diferença temporal entre a passagem de dois veículos pelo mesmo ponto.

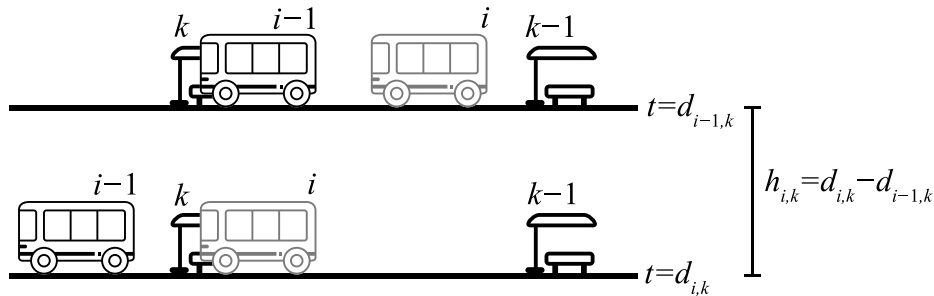


Figura 1 – Diagrama esquemático do sistema sob operação utilizada pelos métodos de controle apresentados. Fonte: adaptado de ZIMMERMANN (2016).

Em todos os métodos de controle realimentado apresentados, está presente um termo referente ao tempo de regulagem ( $s_k$ ) no cálculo de retenção. DAGANZO (2009) define esse tempo de regulagem como o tempo que os ônibus devem aguardar para partir de uma estação se o seu intervalo é exatamente igual ao intervalo planejado. Usualmente essa ferramenta é utilizada pelas empresas operadoras de transporte público para garantir confiabilidade aos instantes de partida ou intervalo planejado.

O tempo de regulagem é aplicado aos ônibus que se adiantam por distúrbios diversos



e não afeta os ônibus que estão atrasados, porém o sistema é planejado para que o segundo caso praticamente não aconteça (DAGANZO, 2010). O autor define o tempo de regulagem a partir do desvio-padrão dos tempos de viagem ( $v_k$ ) entre estações para o sistema não controlado de forma a garantir que a grande maioria dos ônibus da linha em questão estejam disponíveis para continuar a viagem depois da aplicação do tempo de regulagem.

Essa definição é baseada na ideia de que, em uma distribuição normal dos tempos de viagem entre estações, o tempo esperado adicionado de três vezes seu desvio-padrão ( $\sigma_v$ ) contemplaria o atraso de 99.7% dos ônibus do sistema. Como os autores consideravam um cenário, em condições ideais, com tempos de viagem iguais entre estações, o tempo total de regulagem a ser aplicado seria:

$$S_{\text{tot}} = N_K 3\sigma_v, \quad (3.5)$$

em que  $N_K$  corresponde à quantidade de estações da linha e  $\sigma_v$ , ao desvio-padrão dos tempos de viagem.

Na prática, DAGANZO (2010) admite que a experiência dos operadores com a linha em questão é de grande relevância para a definição de um tempo de regulagem que permita que a grande maioria dos ônibus esteja disponível para seguir viagem. Isso se deve ao fato de que espera-se também que a ação não penalize tanto o tempo de espera dos usuários do sistema de transporte, que terão que aguardar esse tempo adicional nos seus trajetos.

O tempo de regulagem por estação poderia ser somado e incorporado ao intervalo planejado entre os ônibus para os métodos de controle que utilizam esse intervalo como referência. Dessa forma, a formulação dos métodos tradicionais se manteria a mesma. No entanto, o método proposto no Capítulo 4 desse trabalho busca proporcionar uma variação na magnitude da retenção a ser aplicada de acordo com a quantidade de passageiros embarcados. Portanto, é interessante para a proposta que este termo seja identificado e separado para que também possa ser alterado ao longo das estações de forma que aquelas que possuem menos passageiros a bordo possam receber menos influência das ações de controle combinadas.

A seguir os métodos de controle utilizados neste trabalho são apresentados. Entre eles, o método de regulagem em terminal de origem que não aplica ação de controle durante o itinerário, mas faz uso do tempo de regulagem de DAGANZO (2010) para manter a confiabilidade dos instantes de saída dos ônibus do terminal de origem.

### 3.1 REGULAGEM EM TERMINAL DE ORIGEM (RTO)

Nos cenários de simulação utilizados neste trabalho, os tempos de viagem entre estações variam em torno de um valor médio estipulado. O objetivo dessa variação é de simular os diferentes distúrbios que ocorrem na operação real de uma linha de transporte coletivo urbano. A relação dos desvios-padrão de tempos de viagem entre estações ao longo do itinerário para um dos cenários de simulação sem qualquer tipo de controle é exibida na Figura 2.

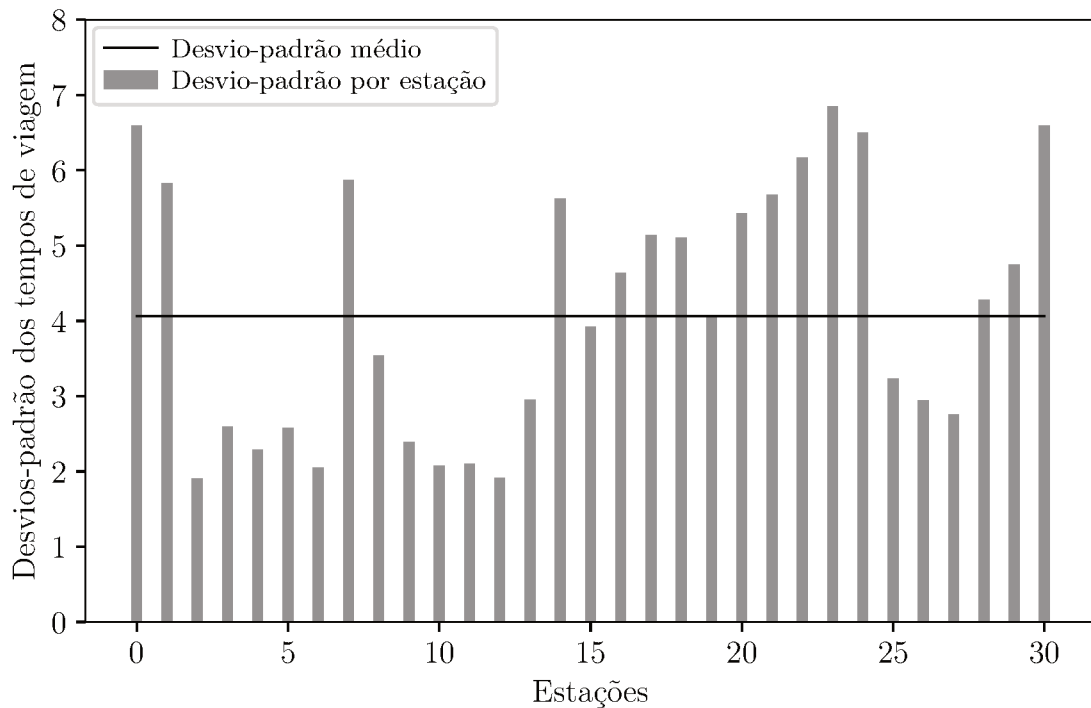


Figura 2 – Desvios-padrão dos tempos de viagem entre estações e médio global para cenário de simulação sem controle.

De acordo com DAGANZO (2010), esses valores auxiliam os supervisores do sistema a definirem a magnitude do tempo de regulagem a ser incorporado ao tempo de ciclo de cada veículo. Essa ação, tem o objetivo de manter os intervalos entre ônibus regulares na estação de origem, garantindo que todos os ônibus estejam livres para partida, mesmo aqueles que sofrerem eventuais atrasos ao longo de seu itinerário.

DAGANZO (2010) utilizou tempos de viagem iguais entre todas as estações. Como este não é o caso no presente trabalho, foi calculado o desvio-padrão médio dos tempos de viagem entre cada estação para todos os ônibus que dão voltas pelo itinerário durante o tempo de simulação definido. Pode-se perceber que, para o cenário em questão, o valor de duas vezes o desvio-padrão médio ( $\sigma_{medv}$ ) dos tempos de viagem adicionado ao tempo de

viagem esperado é suficiente para incorporar os tempos de viagem médios. Dessa forma, o tempo de regulagem total definido para todos os métodos de controle apresentados neste trabalho foi:

$$S_{\text{tot}} = N_{\text{K}} 2\sigma_{\text{med}v}. \quad (3.6)$$

Na prática, é comum que o tempo de regulagem seja aplicado ao final do ciclo de um determinado veículo para garantir o equilíbrio entre os intervalos de tempo entre partidas consecutivas de ônibus do terminal de origem. Além disso, pode-se supor que o nível de incômodo causado tanto aos usuários quanto aos motoristas de um ônibus é menor quando a retenção acontece no terminal de origem, quando comparado ao efeito da aplicação em outras estações do itinerário.

O método de controle por RTO representa exatamente essa ideia. O tempo esperado entre duas partidas do mesmo ônibus do terminal de origem, ou seja, o tempo de ciclo planejado, pode ser calculado através de:

$$T_c = \sum_{k=0}^{N_{\text{K}}} v_{\text{med}k} + S_{\text{tot}}, \quad (3.7)$$

em que  $v_{\text{med}k}$  é o tempo de viagem médio entre as estações  $k$  e  $k + 1$ .

Com o novo tempo de ciclo e a mesma quantidade de ônibus realizando o trajeto, deve ser calculado um novo intervalo planejado definido por:

$$H = \frac{T_c}{N_{\text{I}}}, \quad (3.8)$$

em que  $N_{\text{I}}$  representa a quantidade total de ônibus que atende a linha. Dessa forma, os ônibus partem do terminal de origem com o novo intervalo planejado ( $H$ ) de diferença e seguem pelo itinerário sujeitos às diversas perturbações do sistema.

Durante seus trajetos, os veículos não realizam nenhuma ação de controle no RTO, ou seja, a retenção ( $r_{i,k}$ ) é igual a zero para todos os ônibus em todas as estações a não ser no terminal de origem. Para a estação inicial, o cálculo de retenção é feito de acordo com:

$$r_{i,0} = [T_c - \sum_{k=0}^{N_{\text{K}}} (v_{i,k} + w_{i,k})]^+, \quad (3.9)$$

em que  $v_{i,k}$  representa o tempo de viagem real do ônibus  $i$  entre as estações  $k$  e  $k + 1$ , e  $w_{i,k}$  é o intervalo de tempo para embarque e desembarque de passageiros do ônibus  $i$  na estação  $k$ , no instante do cálculo de retenção no terminal de origem e  $[u]^+ = \max\{0, u\}$ .

Assim, sempre que um ônibus finaliza o processo de desembarque na estação de origem, o método compara o tempo de ciclo real com o planejado e, caso o primeiro seja

menor, aplica a retenção necessária para estabelecer o tempo de ciclo planejado. No caso do RTO, a retenção máxima a ser aplicada é o próprio tempo de regulação total:

$$r_{\max} = S_{\text{tot}}. \quad (3.10)$$

Para ilustrar o funcionamento do método a Figura 3 mostra o seu efeito utilizando o cenário descrito em NEWELL; POTTS (1964) em seu modelo simplificado 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  $\alpha$  é inserido na passagem do ônibus B pela estação 1 e a demanda do cenário foi implementada de modo que houvesse uma estação (3), em que nenhum embarque acontecesse para que fosse causada 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.

O formato de representação utilizado pela Figura 3 para retratar o cenário simplificado descrito é o gráfico de marcha. Esse tipo de visualização facilita o entendimento do comportamento dos diferentes ônibus que partem da estação de origem e seguem pelo itinerário ao longo do tempo. É importante ressaltar que as estações 0 e 1 aparecem duas vezes no eixo das estações para que seja possível visualizar o efeito do controle no terminal de origem.

Analisando a Figura 3, pode-se perceber que a aplicação de retenção é concentrada apenas quando os ônibus completam suas voltas no terminal de origem representado no gráfico duas vezes, pela estação 0. Percebe-se que o ônibus B, que sofreu o atraso na chegada da estação 1 em sua primeira volta, não consegue mais recuperar o intervalo com relação ao ônibus A à frente e se atrasa cada vez mais. Pelo fato de o ônibus B chegar à estação de origem 0 com o atraso acumulado da primeira volta, sua segunda volta já se inicia depois do instante de partida planejado e o método de regulação em terminal de origem não consegue corrigir esse desvio.

Ainda assim, percebe-se que, antes da aplicação de retenção já aparece o fenômeno

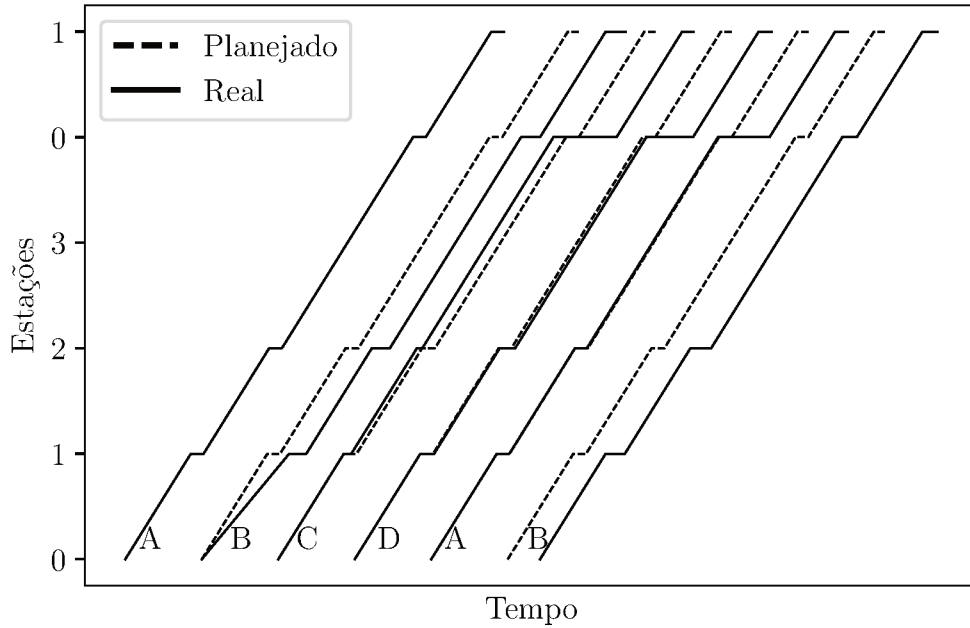


Figura 3 – Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com regulagem em terminal de origem.

de pareamento entre o ônibus que sofreu o atraso inserido e o seguinte, que acaba por encontrar menos usuários nas suas estações. É importante ressaltar também que isso ocorre mesmo em um sistema com uma única perturbação inserida, caso distante da realidade com diversos tipos de distúrbios ao longo de uma determinada rota.

Os demais métodos de controle apresentados neste capítulo permitem a aplicação de ações de controle em todas as estações do itinerário. Nesses casos, o tempo total de regulagem foi dividido para que pudesse ser utilizado em todos os pontos de controle conforme:

$$s_k = \frac{S_{\text{tot}}}{N_K}. \quad (3.11)$$

### 3.2 CONTROLE DE INTERVALO À FRENTE (FH)

O controle do intervalo à frente, ou *Forward Headway Control* (FH), consiste em determinar valores de retenção quando um ônibus opera com intervalo em relação ao ônibus da frente menor que o intervalo planejado, corrigindo imediatamente esse desvio através de:

$$r_{i,k} = [s_k + K_N(H - \hat{h}_{i,k})]^+, \quad (3.12)$$

em que  $K_N$  é o ganho proporcional a ser ajustado pelo operador e  $\hat{h}_{i,k}$  é o intervalo do ônibus  $i$  em relação ao ônibus  $i - 1$  à frente.

Dessa forma, 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  $K_N$  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  $K_N < 1$  para que não sejam designados tempos de espera exagerados aos passageiros embarcados.

O FH tem a desvantagem de atrasar todos os ônibus do sistema que venham atrás de um veículo que seja naturalmente mais lento que os outros, já que o método determina a aplicação de retenção a todos eles com o objetivo de manter os intervalos regulares, mesmo com um atraso fora do padrão esperado do primeiro.

Além disso, o ônibus à frente do ônibus lento se distancia cada vez mais, já que o intervalo a montante não é relevante ao seu cálculo de retenção. Este efeito é atenuado com a aplicação do tempo de regulagem ao longo do itinerário que permite aos ônibus atrasados com  $\hat{h}_{i,k} > H$  aplicar um valor retenção menor que  $s_k$ .

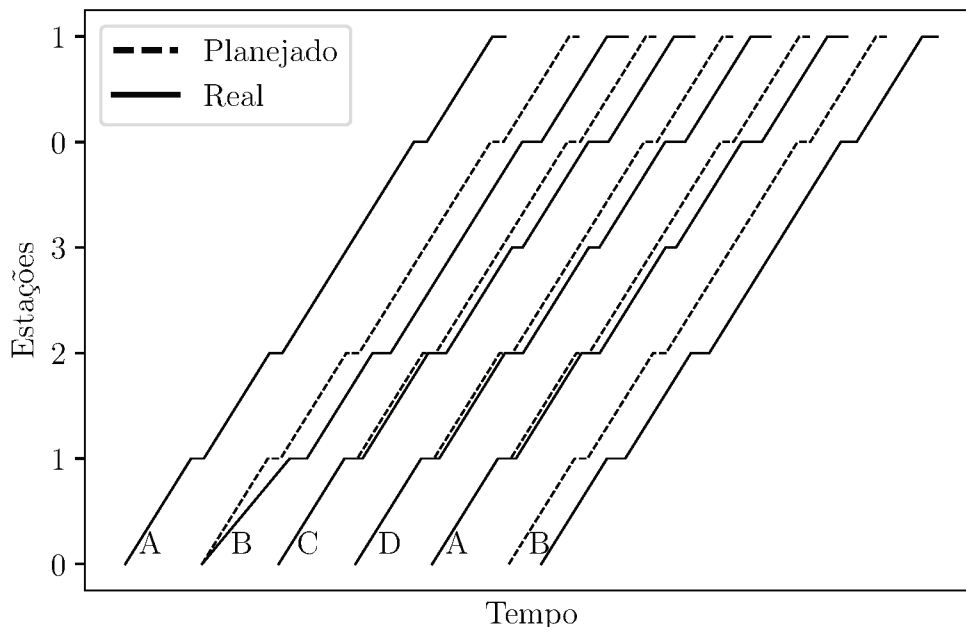


Figura 4 – Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com controle FH.

Na Figura 4 pode-se observar o efeito prático do FH no cenário de NEWELL; 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 anterior com regulagem apenas na estação inicial (RTO), 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. Quando o ônibus A passa pela estação 1 em sua segunda volta, ele começa a sentir os efeitos do atraso sofrido pelo ônibus B na volta anterior e, como todos os outros ônibus, recebe o controle do FH com intuito de manter seu intervalo com relação ao ônibus D à frente constante. O método FH tampouco consegue atuar na diminuição do intervalo do ônibus B, que continua chegando na estação de origem com o atraso acumulado da primeira volta e depois do instante planejado para início da segunda.

### 3.3 CONTROLE DO INTERVALO À FRENTE E ATRÁS (TWH)

Outro método de controle realimentado proporcional comparado neste trabalho é o controle do intervalo à frente e atrás, ou *Two-way Headway Control* (TWH), baseado em TURNQUIST (1982). Diferentemente do FH já apresentado, o TWH não utiliza a informação de intervalo planejado para o sistema. Ao invés de comparar o intervalo atual de determinado ônibus com o intervalo planejado, o TWH busca equilibrar os intervalos entre o ônibus da frente e o ônibus de trás para cada veículo.

O cálculo do tempo de retenção a ser aplicado em cada ônibus é dado por:

$$r_{i,k} = [s_k + \frac{K_N}{2}(h_{i+1,k'} - \hat{h}_{i,k})]^+, \quad (3.13)$$

em que  $k'$  representa a última estação visitada pelo ônibus  $i + 1$  que vem atrás, portanto  $h_{i+1,k'}$  se refere ao último intervalo observado entre os ônibus  $i + 1$  e  $i$ . A divisão por dois é necessária para que ocorra a correção do intervalo de  $i$  para um valor médio entre  $i - 1$  e  $i + 1$ . Pode-se observar a terminologia e o funcionamento do método descrito na Figura 5.

O efeito do método no cenário simplificado de NEWELL; POTTS (1964) pode ser observado na Figura 6. É importante notar a tendência de que os ônibus encontrem um intervalo natural do sistema igual para todos, já que a ação de controle é aplicada de forma encadeada. Percebe-se também que a variação dos intervalos é maior que no FH, no entanto, menos retenção é aplicada no sistema, o que beneficia a velocidade de operação dos ônibus.

Este efeito também beneficia o método com a possibilidade de controlar as possíveis fugas, já que leva em consideração tanto o intervalo com relação ao ônibus da frente

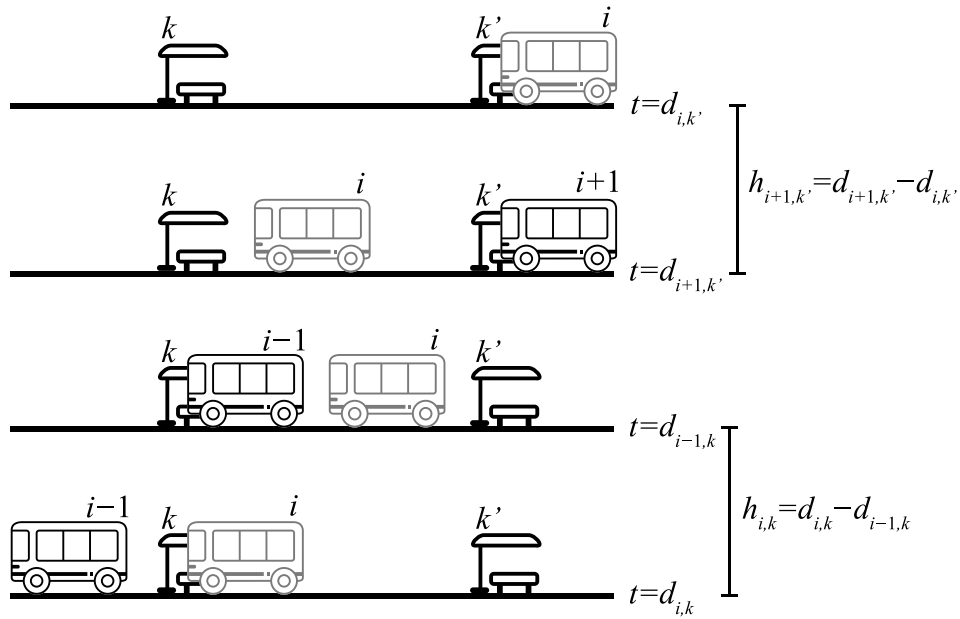


Figura 5 – Diagrama esquemático do sistema sob operação com lei de controle do método TWH. Fonte: adaptado de ZIMMERMANN (2016).

quanto o do ônibus que vem atrás. Com a Figura 6, é possível perceber que o método consegue aplicar retenção na segunda volta do ônibus A com o objetivo de diminuir o intervalo do ônibus B.

### 3.4 CONTROLE PREDITIVO (OPT.H)

O método de controle preditivo (opt.H) implementado é baseado no modelo apresentado por KOEHLER; KRAUS; CAMPOGARA (2011), que assume a disponibilidade das seguintes informações do sistema:

- taxa de chegada de usuários nas estações;
- fração de desembarque de usuários nas estações;
- tempos de embarque e desembarque por usuário;
- tempo nominal de viagem dos ônibus entre estações;
- instante de partida da última estação visitada;
- número de usuários embarcados depois de cada partida de estação.



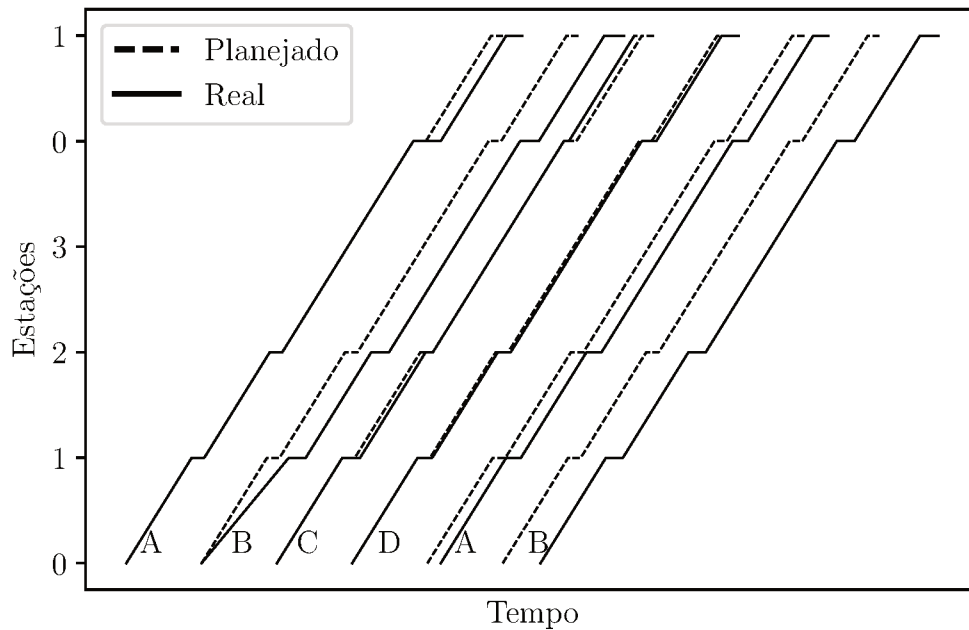


Figura 6 – Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com controle TWH.

Os quatro primeiros dados listados necessários para implementação do modelo são provenientes do histórico de funcionamento do sistema, enquanto os dois últimos itens são dados em tempo real do momento em que o controle está de fato em operação.

O modelo dos autores leva em conta as seguintes premissas de forma a garantir uma maior simplicidade matemática:

- a capacidade dos ônibus não é considerada;
- o tempo de viagem dos ônibus entre estações é aproximado pelo valor nominal;
- o tempo de embarque e desembarque de passageiros é aproximado por uma função linear determinística, com as duas operações ocorrendo consecutivamente nas mesmas portas dos ônibus;
- não é permitida ultrapassagem entre ônibus e a ordem dos veículos que saíram do terminal é mantida;
- a função objetivo considera um horizonte limitado de pontos a jusante de cada ônibus na avaliação do impacto da ação de controle.

No problema de otimização proposto pelos autores, o objetivo é minimizar o tempo de espera dos usuários na estação e embarcados de acordo com a função:

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \left[ \frac{\lambda_k}{2} (d_{i,k} - d_{i-1,k})^2 + (1 - q_k) l_{i,k-1} (r_{i,k} + w_{i,k}) \right], \quad (3.14)$$

em que  $I$  e  $K$  representam os conjuntos de todos os ônibus e todas as estações,  $\lambda_k$  e  $q_k$  são, respectivamente a taxa de chegada de passageiros e a porcentagem de passageiros a bordo que desembarcam na estação  $k$ . Além disso,  $l_{i,k-1}$  representa a quantidade de passageiros que partiram embarcados no ônibus  $i$  da estação  $k - 1$  e  $w_{i,k}$  é o intervalo de tempo para embarque e desembarque de passageiros.

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 atual ( $i$ ). O segundo termo representa o tempo de espera dos usuários embarcados enquanto o ônibus está parado na estação, já que  $(1 - q_k) l_{i,k-1}$  se refere à quantidade de usuários que continuam embarcados depois do desembarque na estação  $k$ .

Na Figura 7, pode-se observar um caso em que o ônibus  $i$  está prestes a sair da estação  $k$  e o horizonte de previsão é exemplificado com 5 estações.

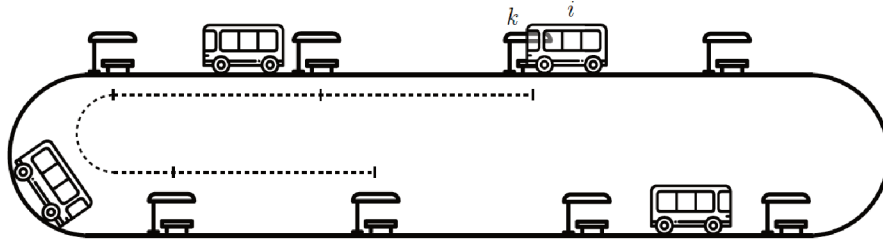


Figura 7 – Diagrama esquemático do sistema sob operação com lei de controle do método OPT.H. Fonte: ZIMMERMANN (2016).

As principais restrições de movimento do modelo são dadas por:

$$a_{i,k} = d_{i,k-1} + v_k, \quad (3.15)$$

$$w_{i,k} = \frac{nC_0 + C_1\lambda_k[(a_{i,k} - d_{i-1,k}) + C_2q_k l_{i,k-1}]}{(n - C_1\lambda_k)} e \quad (3.16)$$

$$d_{i,k} = a_{i,k} + w_{i,k} + r_{i,k}, \quad (3.17)$$

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 ao 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 de (3.16), em que  $C_0$  representa o atraso de tempo para início do processo de embarque e desembarque,  $C_1$  é o tempo de embarque por usuário,  $C_2$  o tempo de desembarque por usuário e  $n$  é o número de portas do veículo.

Por fim, em (3.17) o instante de partida ( $d_{i,k}$ ) de cada ônibus  $i$  de cada estação  $k$  é dado pelo instante de chegada do ônibus somado aos tempos de embarque e desembarque e ao tempo de retenção a ser aplicado como variável de decisão do problema.

Além disso, as seguintes restrições auxiliares também foram implementadas para garantir algumas das premissas descritas no início da seção:

$$\hat{d}_{i,k} \leq \hat{d}_{i+1,k-1} + v_k, \quad (3.18)$$

$$r_{i,k} \leq r_{\max}, \quad (3.19)$$

$$a_{i,k}, w_{i,k}, d_{i,k}, l_{i,k}, r_{i,k} \geq 0, \quad (3.20)$$

em que (3.18) impede o acontecimento de ultrapassagens e (3.19) limita o tempo máximo de retenção com um valor estipulado no planejamento.

Nota-se que a utilização do tempo de regulação não entra em momento algum nos cálculos do método de controle preditivo utilizado. Como descrito no início deste capítulo, a utilização dessa ferramenta por DAGANZO (2010) tem a função de auxiliar no cumprimento do intervalo planejado. Como o método por otimização tem como objetivo simplesmente a minimização dos tempos de espera dos usuários, qualquer tentativa de forçar a manutenção de intervalos regulares entra em conflito com seu próprio conceito.

Dentre os métodos apresentados neste capítulo, o método de controle preditivo é o que impõe maior dificuldade de implementação em um cenário de simulação, o que é um dos motivos da busca de novos métodos como o proposto neste trabalho. No entanto, para efeito de comparação, foi utilizado o cenário descrito e implementado em ZIMMERMANN (2016), que pode ser consultado para maiores informações relacionadas a essa etapa.

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 no Capítulo 4.

## 4 CONTROLE DE INTERVALO COM GANHO VARIÁVEL

Com o objetivo de replicar o efeito do método de controle preditivo identificado por ZIMMERMANN et al. (2016), mantendo a simplicidade das técnicas de controle proporcional, são propostas neste capítulo duas formas de variação do ganho nominal  $K_N$ . A primeira forma de variação é baseada apenas em dados do histórico de carregamento dos ônibus pelo itinerário, enquanto a segunda faz uso também de informações em tempo real no instante de cálculo da retenção.

Com relação à utilização de dados históricos relacionados ao carregamento dos ônibus de uma determinada linha de transporte público parte do princípio de que esses dados já devem estar disponíveis na etapa de planejamento para definição, por exemplo, da frota a ser utilizada, intervalo planejado ou cronograma estipulado, entre outros. É comum que dados do perfil de carregamento sejam coletados anualmente para todo o trajeto de uma linha de transporte público durante períodos do dia específicos. Geralmente, o acompanhamento de trechos de carregamento crítico é realizado várias vezes ao ano com o objetivo de possibilitar revisões e ajustes ao sistema em operação (CEDER, 2007). O objetivo dos métodos propostos é de aplicar um ganho mínimo nesses trechos de carregamento crítico de forma a diminuir a retenção aplicada nestes pontos.

As duas técnicas apresentadas neste capítulo utilizam uma mesma forma de variação do tempo de regulagem ao longo do itinerário. A proposta é de que o tempo de regulagem total ( $S_{\text{tot}}$ ) seja distribuído ao longo das estações do itinerário também de acordo com a quantidade de passageiros embarcados, diferente da forma descrita em DAGANZO (2009). A seção que trata sobre essa nova distribuição é apresentada a seguir.

### 4.1 DISTRIBUIÇÃO DA REGULAGEM AO LONGO DO ITINERÁRIO

Como o objetivo da utilização da regulagem é o de manter os tempos de ciclo ( $T_C$ ) de cada veículo equilibrados, a utilização de dados em tempo real é impossibilitada, já que ela estaria sujeita a perturbações do sistema. Portanto, a variação na distribuição do tempo de regulagem acontece de acordo com o histórico de carregamento dos veículos da linha e pode ser calculado para cada estação de acordo com:

$$s_k = \begin{cases} \left( \frac{S_{\text{tot}}}{N_K} \right), & l_{\text{max}} = l_{\text{med}k} \\ \left( \frac{l_{\text{max}} - l_{\text{med}k}}{\sum_{k \in K} (l_{\text{max}} - l_{\text{med}k})} \right) S_{\text{tot}}, & l_{\text{max}} \neq l_{\text{med}k}, \end{cases} \quad (4.1)$$

em que  $l_{\max}$  representa o carregamento crítico da linha e  $l_{\text{med}k}$ , a média de passageiros embarcados na estação  $k$ , dados proveniente do histórico do itinerário em questão.

Dessa forma, é possível ponderar o peso do carregamento médio de cada estação em relação ao carregamento máximo da linha para cada uma das estações. Na prática, esse cálculo permite estabelecer valores maiores de tempo de regulagem em estações em que os ônibus estão historicamente mais vazios e valores menores naquelas em que os ônibus normalmente se encontram mais carregados, mantendo o tempo total de regulagem planejado.

É importante ressaltar que essa proposta só se aplica quando ocorre uma variação mínima no carregamento ao longo de um itinerário. Caso a quantidade de passageiros seja exatamente igual em todas as estações, o que não deve acontecer na prática, o uso da técnica não se justifica. Além disso, o denominador de (4.1) se igualaria a zero, caso  $l_{\max}$  for igual à  $l_{\text{med}k}$  para todas as estações.

No ambiente de simulação, os valores do histórico podem ser adquiridos através da replicação do cálculo de carregamento dos ônibus por uma quantidade suficiente de voltas até que os valores se estabilizem. Para efeitos de simplificação, o cálculo dos valores relativos ao carregamento histórico são feitos utilizando o intervalo planejado entre os ônibus, já que as variações dos métodos de controle não impactam significativamente na quantidade de passageiros a bordo. O cálculo do carregamento estimado para cada estação se dá conforme:

$$l_{i,k} = (1 - q_k)l_{i,k-1} + \lambda_k(H), \quad (4.2)$$

em que primeiro termo do lado direito da equação representa os passageiros que saem da estação anterior e não desembarcam na atual e o segundo termo representa aqueles passageiros que embarcam na presente estação.

A taxa de chegada de usuários para embarcarem em uma estação ( $\lambda_k$ ) é dada por um valor absoluto com unidade de passageiros por segundo (pax/s). Por outro lado, o desembarque dos passageiros é dado pelo valor relativo de porcentagem de passageiros a bordo que desembarcam em determinada estação ( $q_k$ ). Dessa forma, a convergência de (4.2) é garantida, mesmo que o sistema leve mais tempo para convergir quanto maior for a diferença entre o embarque e o desembarque.

A Figura 8 mostra a comparação entre a distribuição proposta por DAGANZO (2010) baseada simplesmente no desvio padrão dos tempos de viagem e a distribuição proposta neste trabalho para um tipo de demanda concentrada que varia o carregamento de acordo com a linha pontilhada. A segunda, também leva em conta a quantidade média de passageiros a bordo em cada estação do itinerário de acordo com os dados do histórico e segue

a variação de maneira inversa à variação do carregamento.

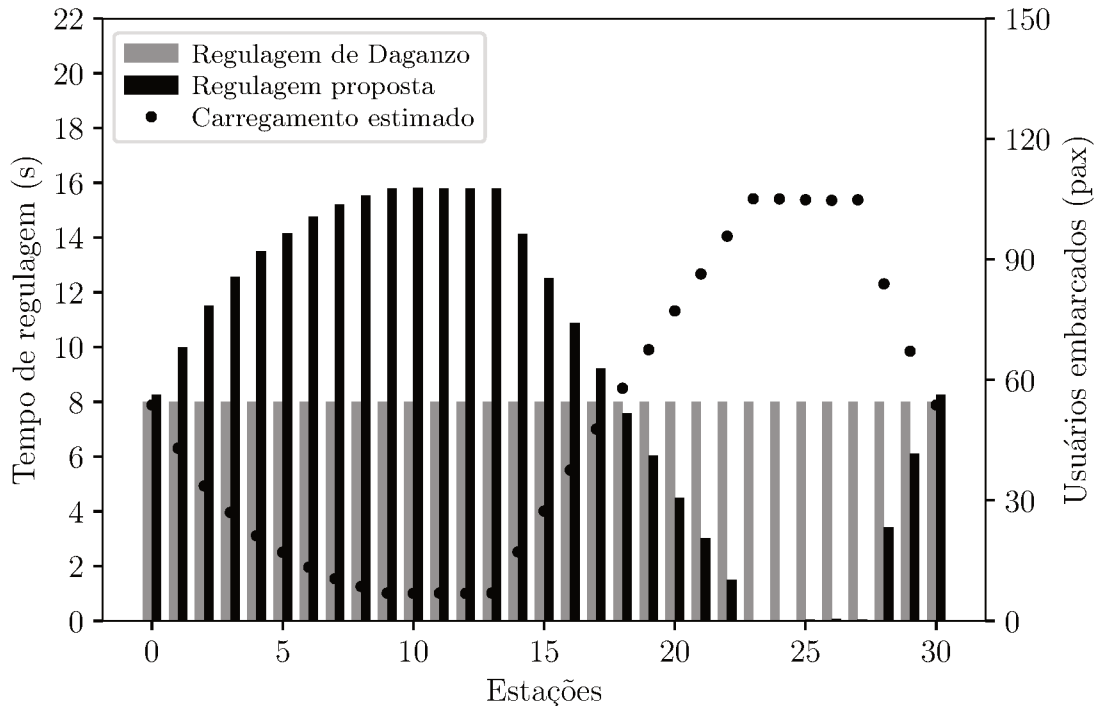


Figura 8 – Comparação entre as distribuições dos tempos de regulagem ao longo do itinerário.

Com a nova distribuição de tempo de regulagem definida através de (4.1), são apresentados a seguir dois métodos diferentes para variação do ganho das técnicas de controle realimentado tradicionais.

#### 4.2 GANHO VARIÁVEL BASEADO EM DADOS DO HISTÓRICO ( $K_{Hk}$ )

A primeira forma de variação do ganho proposta faz uso apenas de dados do histórico de carregamento dos ônibus de uma linha. Assim como na variação do tempo de regulagem apresentada no começo deste capítulo, essa técnica busca a redistribuição do ganho nominal definido pelos operadores ao longo do itinerário de forma a mantê-lo como ganho médio de todo o itinerário.

Dessa forma, o ganho variável pode ser definido previamente para cada estação por meio de:

$$K_{Hk} = \begin{cases} K_N, & l_{\max} = l_{\text{med}k} \\ \left( \frac{l_{\max} - l_{\text{med}k}}{\sum_{k \in K} (l_{\max} - l_{\text{med}k})} \right) N_k(K_N), & l_{\max} \neq l_{\text{med}k}, \end{cases} \quad (4.3)$$

que redistribui o ganho nominal  $K_N$  que seria aplicado igualmente em todas as estações  $N_k$  do itinerário, para que ele siga o comportamento inverso ao da curva de carregamento

médio dos ônibus, exatamente como em (4.1) faz para o tempo de regulação.

Assim como para o caso de (4.1), essa proposta só é válida para os cenários em que houver uma variação mínima no carregamento, o que garante que o denominador de (4.3) seja diferente de zero. Para casos sem variação de carregamento, mantêm-se o ganho nominal para todas as estações.

Para os métodos de controle realimentado apresentados no Capítulo 3, o novo  $K_{Hk}$  substitui o  $K_N$  tradicional e as equações de cálculo de retenção para o FH e para o TWH são alteradas, respectivamente, para:

$$r_{i,k} = s_k + K_{Hk}(H - \hat{h}_{i,k}) \text{ e} \quad (4.4)$$

$$r_{i,k} = s_k + \frac{K_{Hk}}{2}[h_{i+1,k'} - \hat{h}_{i,k}]^+, \quad (4.5)$$

A primeira proposta, apesar de ser mais simples e intuitiva, não atua sobre possíveis variações inesperadas que possam ocorrer no carregamento causadas por fatores externos nos veículos de uma linha. O interesse em utilizar informações em tempo real de sistemas mais modernos levou a proposta de um outro método de controle com ganho adaptativo.

### 4.3 GANHO ADAPTATIVO EM TEMPO REAL ( $K_{Ri,k}$ )

Deseja-se obter um esquema de variação de ganho que o adapte ao estado do carregamento dos ônibus, similar ao apresentado na Figura 9. Observa-se, na figura, que o ganho tem valores mais altos para carregamentos baixos, sendo praticamente zerado quando a lotação é máxima. Além disso, tanto no trecho das estações 10 a 14 como de 24 a 28, observa-se uma variação do ganho mesmo com carregamento constante, evitando-se assim a estagnação do ganho em situações sem variação do carregamento.

Partindo-se do comportamento descrito acima, consideram-se as seguintes características necessárias para uma lei de ajuste adaptativo do ganho conforme o carregamento:

1. O ganho deve variar proporcionalmente e em relação oposta ao carregamento. Isto é:

$$\Delta K_{Ri,k} \propto l_{i,k-1} - l_{i,k}. \quad (4.6)$$

Ou seja, se o carregamento no ponto atual for maior do que no ponto anterior, o ganho deve ter variação negativa, e vice-versa.

2. A variação deve ser incremental, evitando-se sobressaltos. Portanto, deve haver

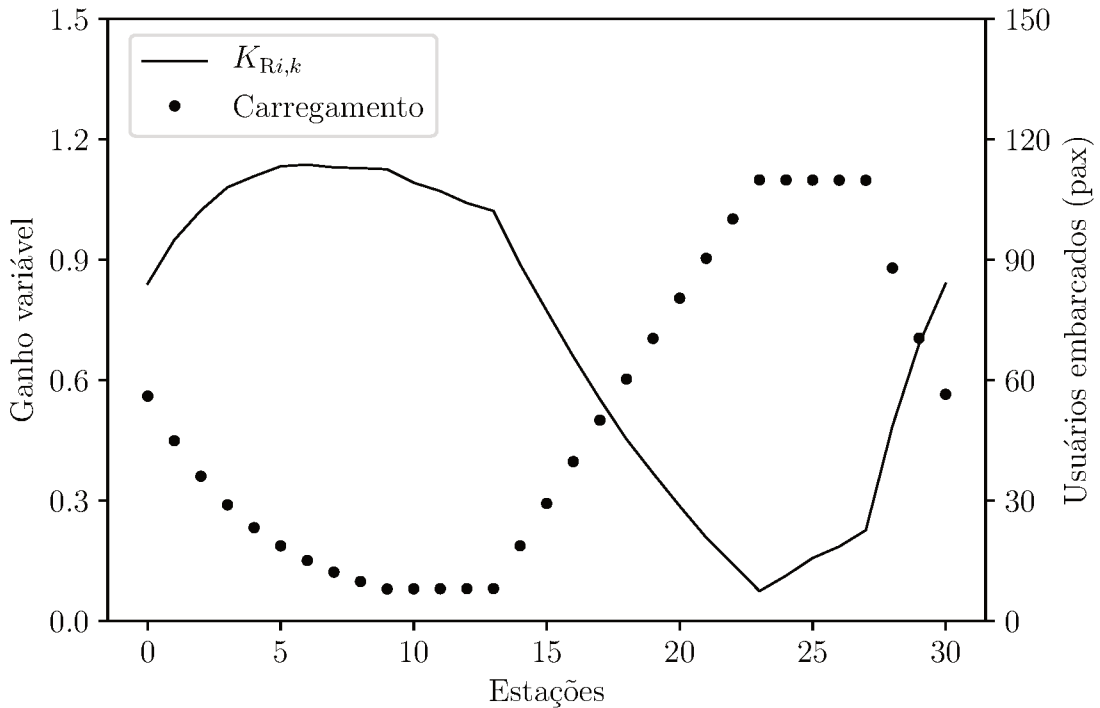


Figura 9 – Comportamento desejável do ganho com variações que (i) acompanham as tendências do carregamento e (ii) restauram ganho nominal se o carregamento for constante.

possibilidade de ajuste na magnitude das variações calculadas em (4.6), como, por exemplo, com uso de fator de ganho  $K_V$  em:

$$K_{Ri,k} = K_{Ri,k-1} + K_V (l_{i,k-1} - l_{i,k}). \quad (4.7)$$

- Se não houver variação do carregamento ao longo de vários pontos, o ganho deve ser restituído gradualmente a um ganho nominal de referência, evitando-se que fique estagnado em valor muito alto ou muito baixo por longos trechos com carregamento constante. Este efeito poder ser obtido individualmente por:

$$K_{Ri,k} = K_P (K_N - K_{Ri,k-1}). \quad (4.8)$$

A soma das três características desejáveis da variação do ganho pode ser representada pelo diagrama de blocos da Figura 10. No diagrama, o bloco  $z^{-1}$  representa um atraso amostral e as demais variáveis seguem as definições acima. Em forma de equação, a lei de controle adaptativa apresentada no diagrama fica:

$$K_{Ri,k} = K_{Ri,k-1} + K_V (l_{i,k-1} - l_{i,k}) + K_P (K_N - K_{Ri,k-1}). \quad (4.9)$$



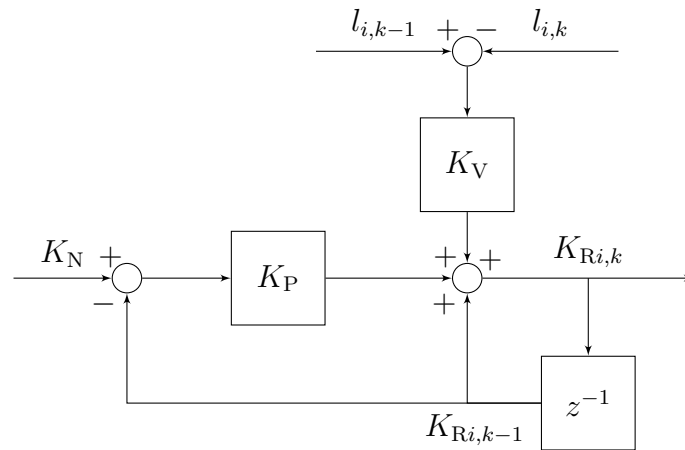


Figura 10 – Diagrama de blocos que representa o funcionamento do ganho adaptativo baseado na variação em tempo real do carregamento; o bloco  $z^{-1}$  representa o atraso amostral.

Os ganhos internos  $K_V$  e  $K_P$  são ajustados de forma experimental através de tentativa e erro para que a curva da Figura 9 tenha o comportamento adequado seguindo o oposto da curva de carregamento. Portanto, seus valores ótimos são diferentes para cada tipo de padrão de demanda testado.

Mesmo antes da implementação dos métodos no ambiente de simulação a ser apresentado no Capítulo 5, algumas de suas características podem ser analisadas.

#### 4.4 ANÁLISE PRELIMINAR DOS MÉTODOS PROPOSTOS

A Figura 11 mostra a variação dos dois métodos propostos neste capítulo ao longo do itinerário para o mesmo cenário de demanda concentrada que gera a curva de carregamento da Figura 8. O ganho do método baseado apenas em dados do histórico de carregamento é o mesmo para todos os ônibus em todas as voltas para cada estação. Já o ganho do método que faz uso de informações em tempo real varia de acordo com a quantidade de passageiros do ônibus no instante do cálculo da retenção, portanto o valor apresentado no gráfico é a média dos ganhos em cada estação.

A Figura 12 mostra o comportamento das técnicas propostas neste trabalho sendo aplicadas no mesmo cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) descrito no capítulo anterior. Percebe-se que a ação de controle é concentrada na estação em que há apenas desembarque de passageiros no itinerário (3). Além disso, 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

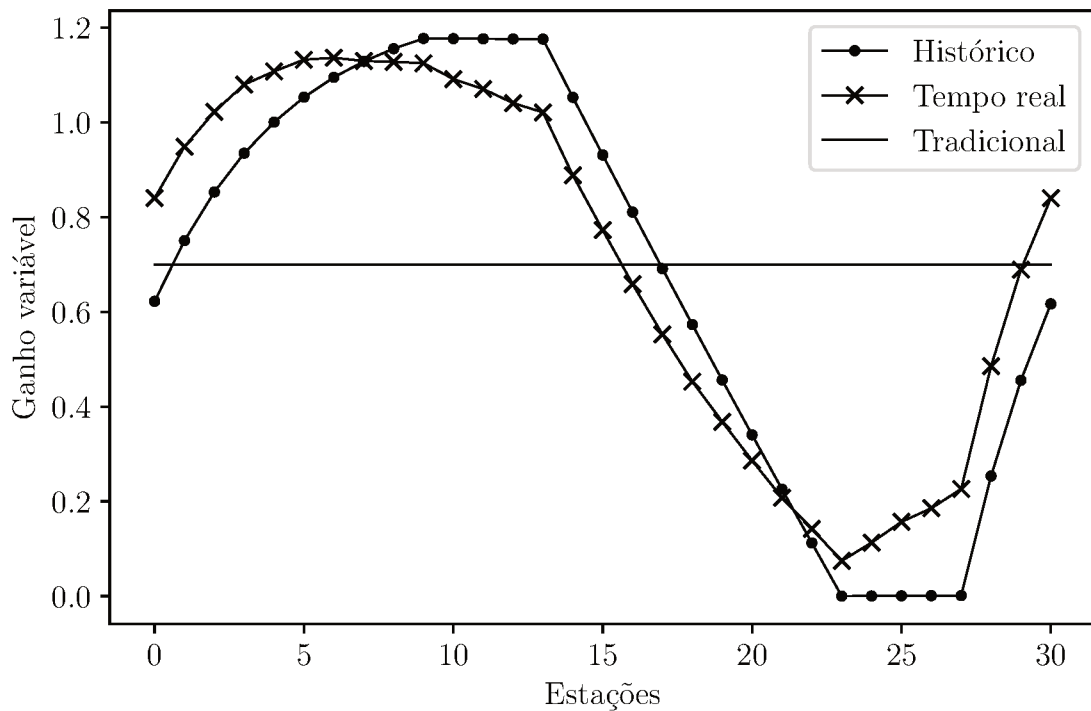


Figura 11 – Variação dos ganhos propostos ao longo do itinerário.

levar também a um tempo de espera de passageiros embarcados menor.

Ressalta-se que, para cenários de demanda uniforme ou distribuída, a quantidade de passageiros nos ônibus não varia tanto durante o itinerário quanto para o cenário com demanda concentrada que está sendo utilizado como base. Como essa variação é menor, o comportamento dos métodos propostos de variação da aplicação da retenção também deve se aproximar aos métodos tradicionais com os quais ele é associado.

Com o objetivo de verificar a sensibilidade dos métodos ao fornecimento de dados do histórico que refletem a operação do sistema na prática, foram realizados testes com dois padrões de demanda diferentes. Nesses testes, supôs-se um carregamento real diferente do carregamento do histórico utilizado para alimentar o cálculo dos métodos apresentados. Para o ganho variável baseado apenas em dados do histórico, o teste mostrou que, quando o carregamento real diverge do carregamento histórico com uma média de 24% ao longo do itinerário, o erro médio entre o ganho real e o ganho ideal caso o histórico estivesse correto é de 18%.

Como o método de ganho adaptativo utiliza a informação de carregamento em tempo real, a influência do erro da mesma informação vinda do histórico prejudica apenas a etapa de ajuste dos ganhos internos do controlador. Dessa forma, a comparação foi feita com a variação apenas dos ganhos ótimos encontrados para cada um dos perfis de carregamento. Assim, o mesmo desvio de 24% no carregamento do histórico levou a um erro na curva de

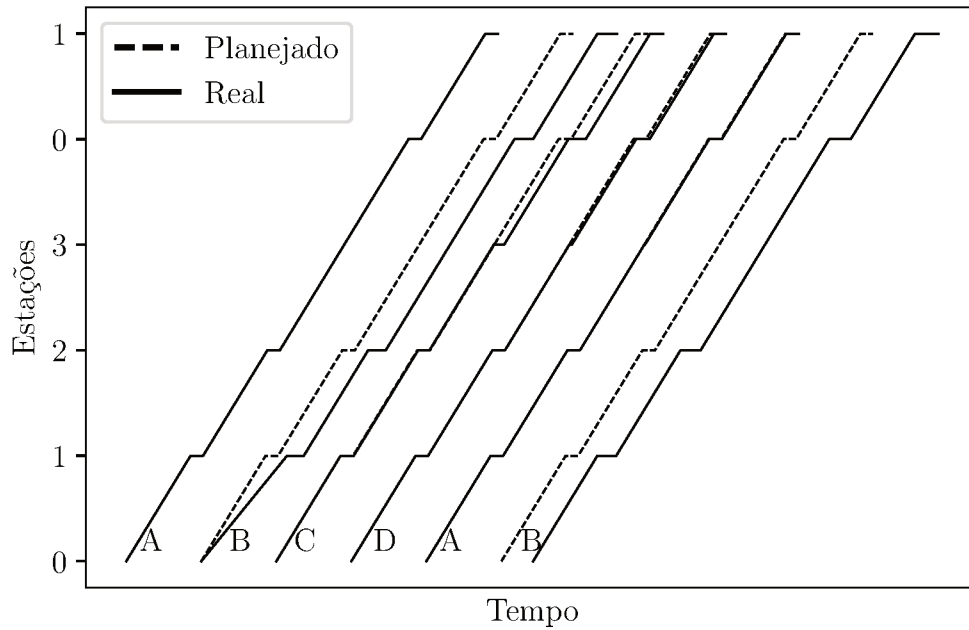


Figura 12 – Gráfico de marcha para cenário proposto por NEWELL; POTTS (1964) com método proposto FHv genérico, que foca a aplicação de retenção nas estações em que os ônibus se encontram mais vazios.

ganho de 25%, devido à diferença nos ganhos internos do controlador.

No próximo capítulo, o cenário de simulação utilizado é apresentado juntamente com os indicadores de desempenho que serviram para comparar os resultados de cada método.

## 5 CENÁRIO E INDICADORES DE DESEMPENHO

Com o objetivo de testar o novo método de controle, foi utilizado um modelo de transporte público baseado em KOEHLER; KRAUS; CAMPONOVARA (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).

### 5.1 CENÁRIO DE APLICAÇÃO

O cenário utilizado nesse ambiente, que pode ser visto na Figura 13, 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). Uma das características dos sistemas BRT relevante para a cenário de simulação é a de que os ônibus circulam em vias exclusivas sem interação com tráfego misto. Além disso, assume-se que os veículos do transporte público possuem prioridade semafórica total, fazendo paradas no itinerário apenas nas estações para embarque e desembarque de passageiros.

No ambiente de simulação, não são permitidas ultrapassagens entre ônibus consecutivos. Cada estação da linha do sistema BRT possui espaço para embarque e desembarque de dois ônibus simultaneamente. Como os ônibus circulam em voltas, depois de chegarem à última estação e realizarem sua parada, os mesmos partem novamente para a primeira estação.

O padrão de demanda é relevante à ação dos métodos de controle escolhidos, já que influenciam diretamente nos tempos de embarque e desembarque da dinâmica dos ônibus de um sistema (CATS; RUFFI; KOUTSOPOULOS, 2014). No entanto, como a linha de transporte público que está sendo utilizada como base para a simulação ainda não foi implementada na prática, a sua demanda de usuários real não é conhecida e deve ser estimada.

ZIMMERMANN (2016) comparou três tipos de padrões de demanda em termos de taxa de chegada de usuários e porcentagem de desembarque em cada estação. A demanda constante possui a taxa de chegada de usuários e a fração de desembarque iguais para todas as estações, a demanda concentrada considera um trecho com forte característica de



Figura 13 – Linha de ônibus utilizada no ambiente de simulação. Fonte: ZIMMERMANN (2016).

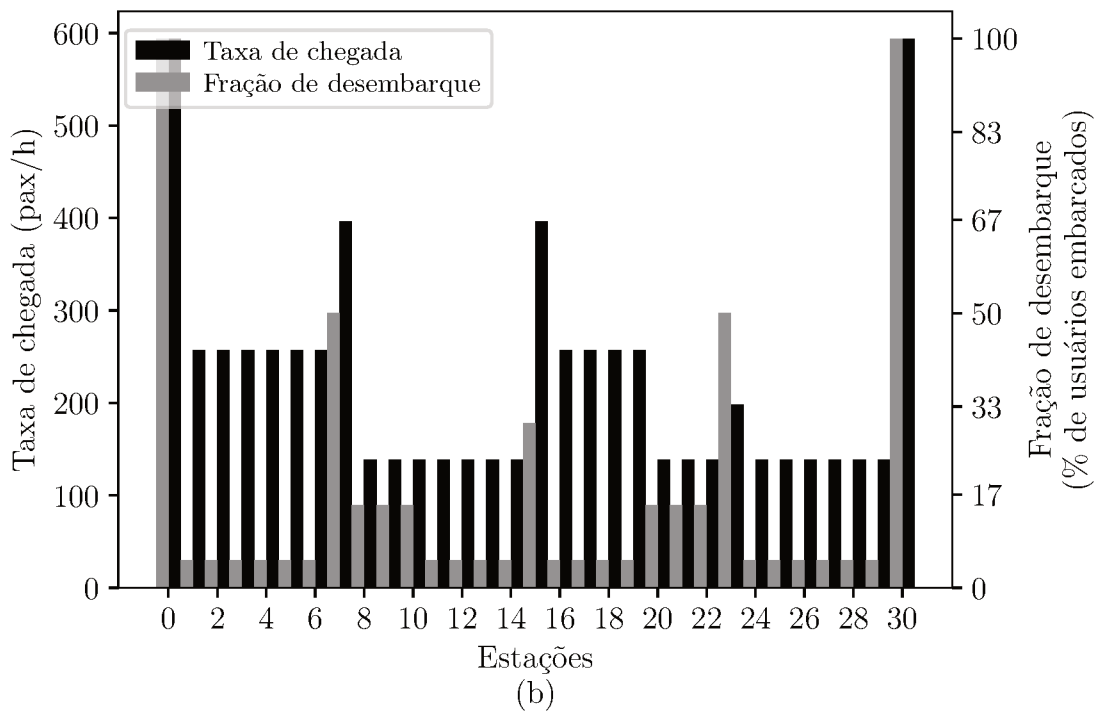
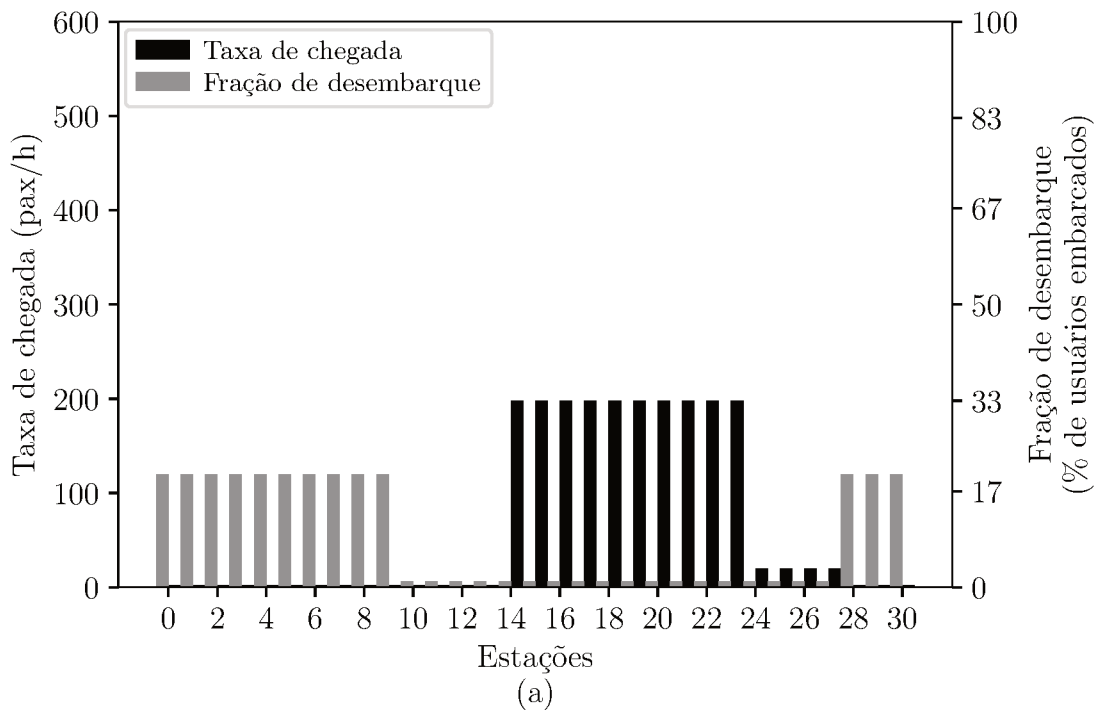


Figura 14 – Padrões de demanda concentrada (a) e distribuída (b) de usuários ao longo do itinerário para teste dos métodos de controle.

origem de viagens, com muitos usuários embarcando e sem desembarque algum, e outro com forte característica de destino, apenas com usuários desembarcando, como pode ser visto na Figura 14(a), e a demanda distribuída tem essas as duas variáveis estimadas

conforme conhecimento empírico da região concentrada, como indica a Figura 14(b).

Para os três padrões de demanda testados por ZIMMERMANN (2016), a demanda concentrada foi aquela que mais evidenciou o comportamento diferente do método de controle preditivo OPT.H, destacando-o dos demais métodos. Como esse é o comportamento que se pretende replicar com o método de controle proposto, o padrão de demanda concentrada foi escolhido para a etapa de simulações. Além disso, o padrão de demanda distribuída também foi utilizado em simulações para demonstrar o efeito dos métodos de controle propostos quando a variação do carregamento é menor ao longo do itinerário.

Os parâmetros do ambiente de simulação para teste e comparação dos métodos de controle apresentados no trabalho podem ser vistos na Tabela 2. Todos os métodos têm sua ação de controle limitada em 40 s de retenção por estação que já inclui o tempo de regulagem de cada método de controle.

Tabela 2 – Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Média	Desvio Padrão
Tempo de retenção máximo (s)	40	0
$C_0$ (s)	3	0
$C_1$ (s/pax)	0,5	0
$C_2$ (s/pax)	0,35	0
Capacidade máxima (pax)	150	0
n <sup>o</sup> de assentos	58	0
Aceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	1	0,3
Desaceleração normal (m/s <sup>2</sup> )	2	0,3
Fator de aceitação de velocidade	1	0,05
Intervalo de simulação (s)	0,75	0

O parâmetro  $C_0$  representa o intervalo de tempo depois da parada do ônibus em uma estação até o instante de início do desembarque do primeiro usuário, já que o software de simulação Aimsun simula os processos de aceleração e desaceleração durante as paradas e partidas dos ônibus e não os contabiliza como tempo de parada. Os tempos de embarque e desembarque de cada usuário,  $C_1$  e  $C_2$ , foram obtidos de WRIGHT; HOOK (2007).

Todos os ônibus do sistema possuem a mesma capacidade de 58 passageiros sentados e de 150 no total, considerando os que viagem em pé na sua lotação máxima. A velocidade máxima dos corredores de ônibus do cenário é de 50 km/h e o fator de aceitação de velocidade indica a aceitação dos motoristas em respeitar este limite. O intervalo de simulação é utilizado para representar o tempo mínimo de reação dos motoristas. Os valores de aceleração máxima, desaceleração normal, fator de aceitação de velocidade e intervalo de simulação foram mantidos como os valores indicados pelo próprio software de simulação.

Os valores de desvio padrão da Tabela 2 são responsáveis por gerar as perturbações iniciais que causam desvios nos intervalos entre os ônibus do sistema, pois cada motorista de ônibus da simulação tem as suas características próprias sorteadas aleatoriamente de acordo com os valores da tabela. Esses valores também variam de acordo com a replicação.

Replicações são repetições da mesma simulação com sementes diferentes para o gerador de números aleatórios. Os resultados de desempenho de cada método de controle são obtidos através da média dos resultados de 10 replicações. Os valores de  $K_P$  e de horizonte de predição utilizados são aqueles que proporcionaram melhor desempenho em relação ao tempo de viagem percebido.

As demandas apresentadas na Figura 14 foram simuladas no cenário apresentado na Figura 13. Todos os diferentes métodos de controle foram implementados separadamente para simulação no cenário descrito e os indicadores de desempenho apresentados a seguir foram analisados para cada um deles.

## 5.2 INDICADORES DE DESEMPENHO

Alguns indicadores de desempenho são usados para comparar os métodos de controle utilizados neste trabalho. 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 melhoria 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.

Com o objetivo de medir o conforto dos usuários do sistema de transporte público, é utilizado o indicador de média de usuários em pé, que cresce com o aumento do carregamento de cada ônibus. É importante ressaltar que esse indicador é intimamente relacionado à regularidade dos intervalos entre os ônibus, já que, quanto menor a variação dos intervalos, mais uniforme será o carregamento (HICKMAN, 2001).

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; WILSON; BERNSTEIN, 2001).

O tempo de espera dos usuários na estação e embarcados são os indicadores que mo-



tivaram 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 com os outros métodos de controle realimentado proporcional, como mostra ZIMMERMANN (2016).

O tempo de espera de um passageiro em uma estação ( $E_{est}$ ) 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 15(a).

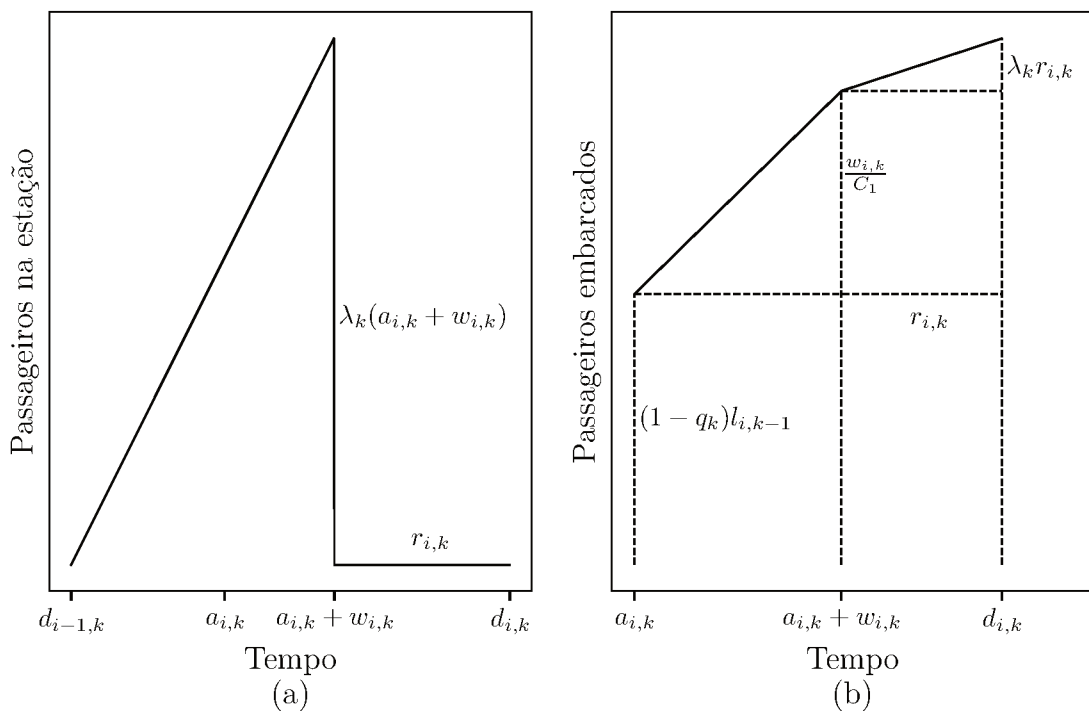


Figura 15 – Cálculo dos indicadores de tempo de espera.(a) na estação; (b) embarcado.

Assume-se que os usuários chegam a uma taxa constante ( $\lambda_k$ ) 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:

$$E_{\text{est}} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \frac{\frac{\lambda_k}{2} (a_{i,k} + w_{i,k} - d_{i-1,k})^2}{\lambda_k (d_{i,k} - d_{i-1,k})}, \quad (5.1)$$

que tem o seu numerador calculado igualmente ao primeiro termo a ser minimizado por (3.14).

Já o indicador de tempo de espera dos passageiros a bordo ( $E_{\text{emb}}$ ) considerado neste trabalho se diferencia daquele segundo termo apresentado em (3.14). 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 15(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 em (3.14). Além disso, os passageiros que chegaram 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  $\lambda_k$  e não sofriam  $E_{\text{est}}$ , como descrito na explicação do cálculo de tempo de espera na estação, precisam aguardar o final desse tempo de retenção, já embarcados.

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:

$$E_{\text{emb}} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \frac{(1 - q_k)l_{i,k-1}(w_{i,k} + r_{i,k}) + \frac{w_{i,k}^2}{2C_1} + \frac{r_{i,k}w_{i,k}}{C_1} + \frac{\lambda_k r_{i,k}^2}{2}}{\lambda_k (d_{i,k} - d_{i-1,k})}. \quad (5.2)$$

Por fim, é medido também o tempo de viagem percebido, indicador proposto por ZIMMERMANN (2016), com o objetivo de reunir em uma única grandeza os tempos de espera dos usuários tanto na estação quanto a bordo com a medida de conforto dos usuários dentro do veículo. O tempo de viagem percebido dá pesos diferentes para o tempo de espera dos usuários aguardando na estação e para os que esperam as ações de embarque, desembarque e retenção embarcados levando em conta também a densidade de usuários em pé por metro quadrado.

Dessa forma, o intervalo médio e seu coeficiente de variação, a média de usuários em pé, a retenção total aplicada, os tempos de espera na estação e embarcado e o tempo de

viagem percebido são os indicadores que serão usados na próxima seção a fim de comparar os resultados dos métodos de controle testados.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos métodos discutidos durante o trabalho quando aplicados ao cenário de simulação descrito no Capítulo 5. Primeiramente, é analisado o desempenho das técnicas propostas quando utilizadas com o padrão de demanda concentrada e com o método FH e, em seguida, com o TWH. Os resultados dos métodos propostos combinados ao FH também serão apresentados para o cenário com demanda distribuída e menor variação de carregamento ao longo do itinerário. Por fim, uma breve análise de sensibilidade será apresentada para verificar o comportamento dos métodos propostos quando alimentado com dados do histórico que não se confirmam na operação.

Os resultados são compilados de valores médios de 10 replicações. Em cada replicação, ao longo de 1 hora de simulação, cerca de 4100 usuários foram transportados por 16 ônibus em operação, no cenário de demanda concentrada. Para a demanda distribuída, a média foi de 12000 passageiros transportados pelos mesmos 16 ônibus em operação. Os métodos de controle proporcional são aplicados com ganho nominal  $K_N = 0,7$  e o método de controle preditivo com horizonte de predição de 30 estações.

É importante ressaltar que o método de controle opt.H possui um tempo de ciclo diferente dos demais, já que não faz uso da ferramenta de tempo de regulagem. Espera-se portanto, uma diferença considerável entre os indicadores de intervalo médio e de retenção aplicada entre o opt.H e os métodos de controle realimentado que se confirma nas tabelas deste capítulo. Mesmo assim, as técnicas de controle propostas promovem uma melhoria, principalmente, no indicador de tempo de espera a bordo que aproxima o método realimentado tradicional do preditivo.

Além disso, os métodos propostos juntamente com os métodos de controle realimentado da literatura apresentam menores tempos de simulação quando comparados ao controle preditivo. Enquanto o tempo de uma replicação do cenário de simulação rodando com os métodos mais simples leva em média 6 s para ser finalizado, o controle por otimização precisa de cerca de 230 s por replicação. Os comportamentos de cada método ao longo do itinerário poderão ser visualizados nas seções a seguir.

### 6.1 MÉTODO FH EM CENÁRIO COM DEMANDA CONCENTRADA

A Tabela 3 mostra todos os indicadores de desempenho analisados para o padrão de demanda concentrada da Figura 14(a). O método FH tradicional é comparado com os

dois métodos de variação de ganho propostos e também com os dois métodos utilizados como referência, RTO e opt.H.

O método que possui ganho variável baseado apenas em dados do histórico é representado pelas letras “vh”, enquanto o método que utiliza informação em tempo real pode ser identificado por “vr”. Para o padrão de demanda concentrada, os valores configurados para os ganhos internos do controlador FHvr foram  $K_P = 0,05$  e  $K_V = 0,011$ , resultados do ajuste por tentativa e erro baseado na curva de carregamento médio. Ainda, o intervalo planejado foi  $H = 195$  s e o tempo de regulagem total,  $S_{tot} = 240$  s, definidos, respectivamente, de acordo com o tempo de ciclo dos veículos e com o desvio padrão dos tempos de viagem entre as estações, como descrito no Capítulo 3.

Tabela 3 – Desempenho dos métodos FH com ganho variável para cenário com demanda concentrada. Comparação com métodos FH tradicional, RTO e opt.H, o último sem tempo de regulagem e, portanto, com intervalo médio menor.

Indicadores de desempenho	RTO	FH (0,7)	FHvh (0,7)	FHvr (0,7)	opt.H* (30)
Intervalo médio (s)	192	195	195	195	183
Coef. de variação dos intervalos	0,45	0,01	0,06	0,07	0,34
Retenção total aplicada (s)	7456	9392	9226	9519	2852
Tempo de espera na estação (s)	128	97	98	97	99
Tempo de espera embarcado (s)	178	182	146	164	84
Tempo de viagem percebido (min)	34,79	32,79	31,86	32,31	30,70
Velocidade operacional (km/h)	36,49	36,04	36,11	36,00	38,26
Média de usuários em pé (pax)	39	32	32	32	30

Percebe-se que em todos os casos o intervalo médio se manteve próximo ao intervalo planejado de 195 segundos, porém os métodos que se utilizaram da aplicação de retenção ao longo de todo o itinerário apresentaram uma diminuição considerável no coeficiente de variação desses intervalos. O FH tradicional, que busca exatamente a regulagem dos intervalos assim que qualquer distúrbio aparece no sistema, se destaca apresentando uma diminuição de quase 98% nesse indicador, quando comparado ao RTO. O método opt.H foi o que menos regularizou os intervalos, com 24% de diminuição. Por outro lado, quando o tempo total de retenção é analisado, percebe-se que o opt.H aplicou um esforço de controle menor que os demais métodos. Como destacado anteriormente, o principal fator responsável por essa diferença é o não uso da ferramenta de tempo de regulagem pelo opt.H. Entre os métodos de controle realimentado, o FHvr aplicou mais de retenção que o método FH tradicional e que o FHvh.

Ainda de acordo com a Tabela 3, ao analisar os tempos de espera na estação, pode-se notar que todos os métodos que buscaram alguma regularização nos intervalos durante o itinerário obtiveram reduções nesse indicador de desempenho. Com relação ao tempo de

espera embarcado, no entanto, o método FH tradicional teve uma piora quando comparado ao RTO, por causa da quantidade extra de retenção que seus usuários experienciam ao longo do itinerário, já que ele não leva em consideração o carregamento dos ônibus. Os métodos propostos FHvh e FHvr se destacam, no entanto, pelo fato de terem conseguido abaixar consideravelmente o indicador de tempo de espera embarcado com relação ao FH tradicional, mantendo praticamente o mesmo tempo de espera na estação e com aproximadamente a mesma quantidade de retenção total aplicada, alterando apenas a sua distribuição ao longo do itinerário.

A Figura 16 mostra a variação dos intervalos ao longo do itinerário também para o padrão de demanda concentrada e pode-se perceber claramente o efeito descrito por NEWELL; POTTS (1964) de que um ônibus atrasado (ou adiantado) tende a se atrasar (ou adiantar) cada vez mais, se nenhum método de controle é aplicado. Esse comportamento é refletido no método RTO com o aumento do coeficiente de variação dos intervalos ao longo do itinerário até que é aplicado um controle rígido com o tempo de regulagem no terminal de origem. Além disso, é possível notar 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. Os métodos propostos, por sua vez, tiveram comportamento similar ao do controle preditivo de manter os intervalos mais regulares nas estações com menos passageiros a bordo, porém sempre apresentam um valor de coeficiente de variação de intervalos menor que o opt.H, o que mostra a importância que dão a esse indicador de desempenho.

Devido à natureza circular da rota estudada, os dados referentes ao terminal de origem são repetidos no início (estação 0) e no final (estação 30) de todos os gráficos apresentados neste capítulo. Além disso, os valores médios obtidos para cada estação se referem sempre à média de todas as paradas de embarque que aconteceram em cada uma delas com a passagem de cada ônibus em todas as voltas contabilizadas durante a simulação.

A Figura 17 apresenta o tempo médio de espera dos usuários para cada um dos métodos ao longo das 30 estações do itinerário. Como os valores são referentes à cada estação separadamente, a unidade utilizada é de  $\text{pax} \cdot \text{s}$ , que representa o tempo agregado de todos os passageiros que experienciaram esse tempo de espera para o embarque.

Como esperado, ao analisar a Figura 17, pode-se notar que só há ocorrência do tempo de espera considerável entre as estações 14 e 24, que são aquelas que possuem alguma demanda, de acordo com a Figura 14(a) apresentada no Capítulo 5. Entre os métodos de controle realimentado, não se observam variações no desempenho com relação a este indicador, e todos tiveram resultados melhores que o método RTO. O controle

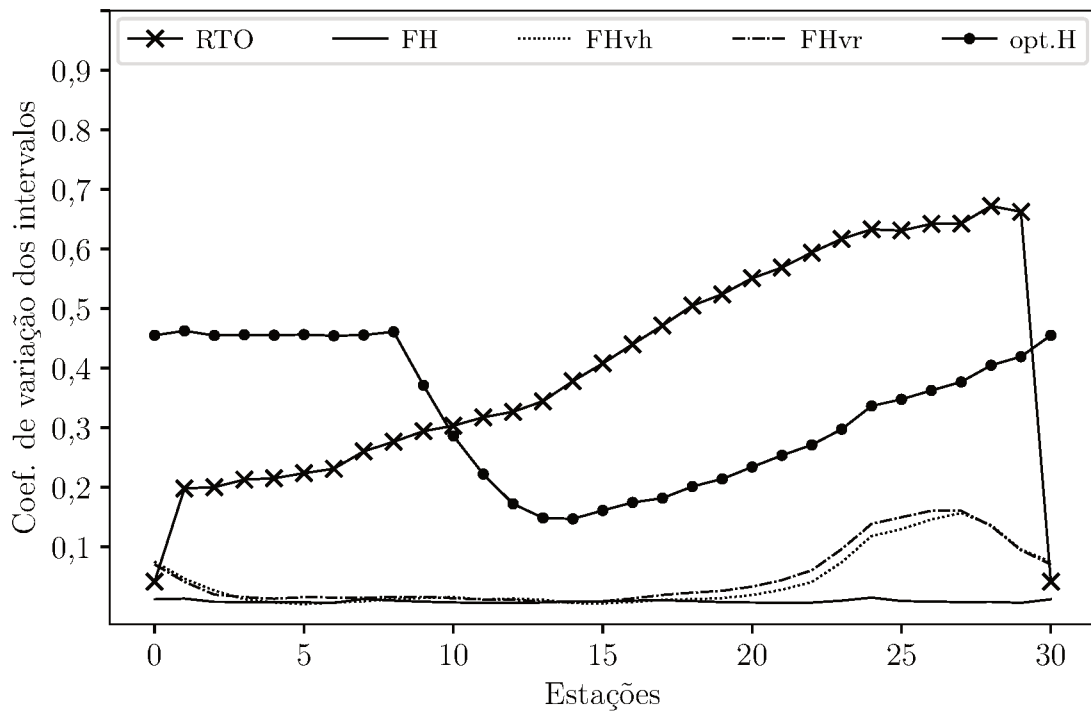


Figura 16 – Variação dos intervalos ao longo do itinerário para diferentes métodos de controle em comparação com FH no cenário de simulação com demanda concentrada.

preditivo opt.H se destacou dos demais, por apresentar valores ainda menores que aqueles dos métodos que buscavam a regularização dos intervalos, exceto para a estação 23.

Já a Figura 18 mostra uma diminuição no tempo de espera dos passageiros a bordo para os métodos propostos com ganho variável de acordo com o carregamento, com destaque para o FHvr, que se aproxima ao desempenho do método de controle preditivo opt.H nas estações em que os veículos se encontram com mais passageiros. Como o método RTO permitiu a aplicação de todo o tempo de regulação  $S_{tot}$  no terminal de origem, caso necessário, toda a retenção indicada na Tabela 3 para este método foi aplicada na Estação 0, o que prejudica a visualização em conjunto com os demais métodos. Por esse motivo, sua curva não foi representada neste gráfico.

Ainda analisando a Figura 18, pode-se notar que os métodos propostos conseguem replicar o formato da curva do método opt.H consideravelmente. Ainda assim, apresentam valores mais altos que o método FH tradicional nas estações em que os ônibus estão mais vazios entre 0 e 14 e valores consideravelmente menores, nas estações 18–27, em que mais passageiros embarcados seriam penalizados.

Para a Figura 19 o carregamento médio dos ônibus é estimado através da média aritmética entre os diferentes métodos aplicados, considerando o carregamento inicial existente devido ao período de aquecimento da simulação. Os valores relativos ao carre-

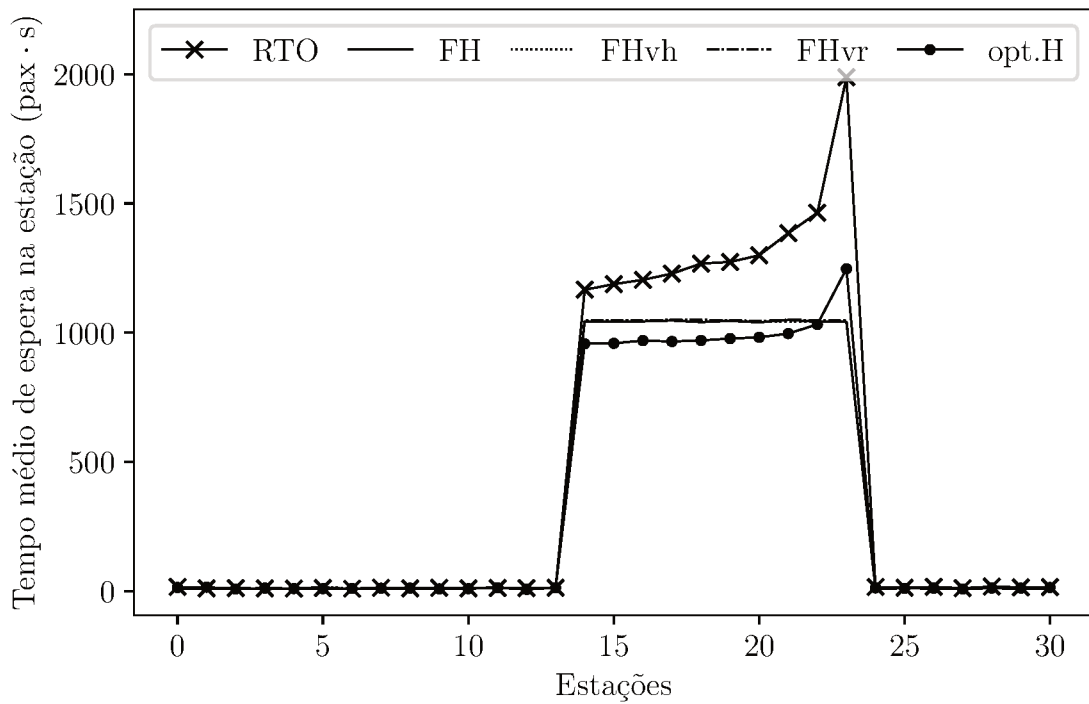


Figura 17 – Tempo médio de espera dos usuários nas estações ao longo do itinerário em comparação com FH no cenário de simulação com demanda concentrada.

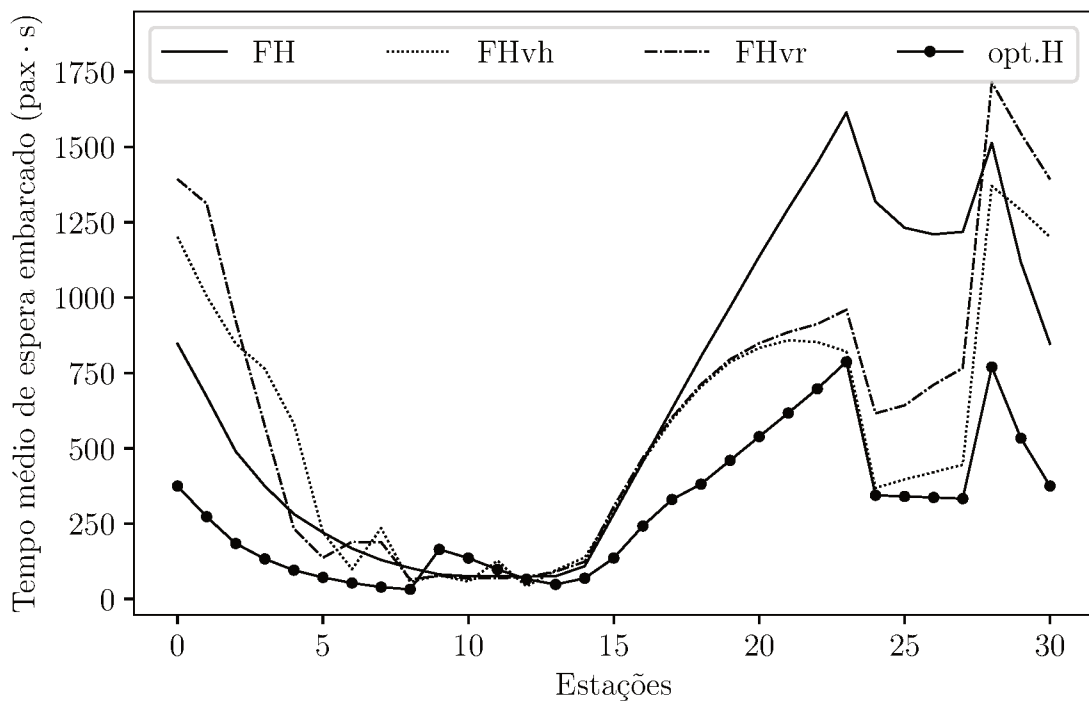


Figura 18 – Tempo médio de espera dos usuários embarcados ao longo do itinerário em comparação com FH no cenário de simulação com demanda concentrada.



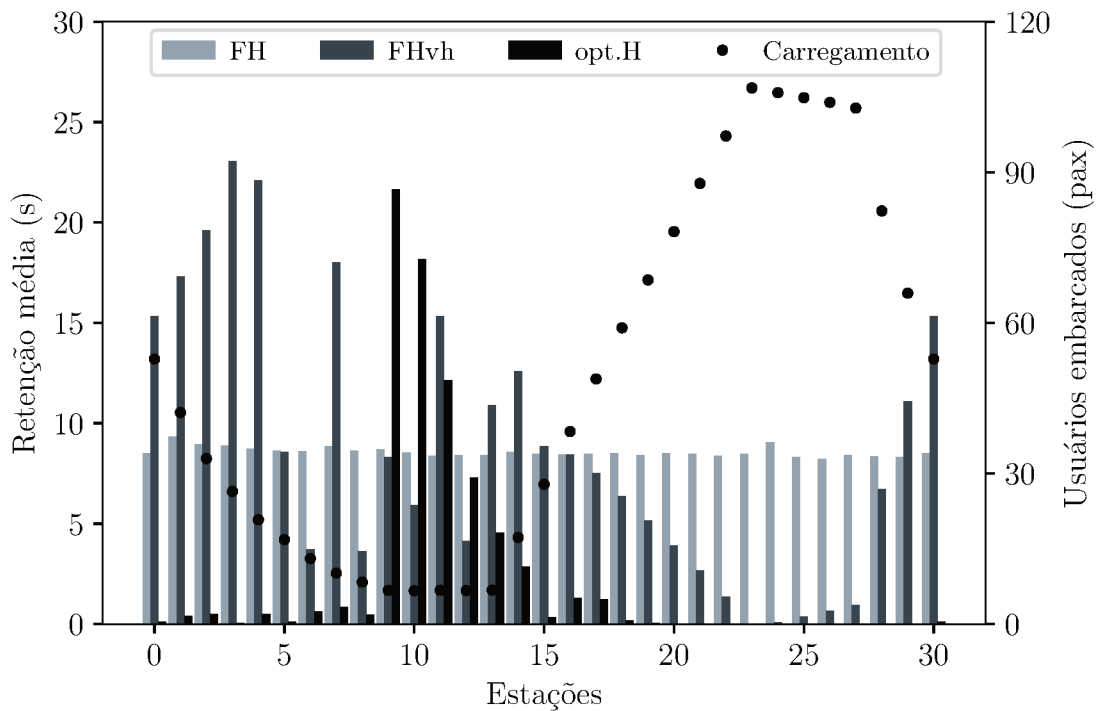


Figura 19 – Ação de controle do método FHvh e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com FH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda concentrada.

gamento dos ônibus se encontram no eixo direito da figura. Além disso são apresentados os valores referentes ao esforço de controle dos métodos FH, FHvh e opt.H no eixo esquerdo. Como o resultado da ação de controle dos dois métodos propostos é parecida, o método FHvh foi escolhido apenas com o objetivo de não carregar a imagem com informações repetidas.

Nota-se uma diferença no perfil de esforço de controle dos métodos que levam em consideração a quantidade de passageiros embarcados nos ônibus. Os métodos propostos, se aproximam ao perfil de controle do opt.H e concentram a aplicação de retenção em estações onde os ônibus se encontram mais vazios, enquanto o FH tradicional distribui a retenção aplicada igualmente ao longo de todo o itinerário, insensível ao carregamento dos veículos.

Na próxima seção, as técnicas de variação propostas são combinadas ao método de controle TWH, também amplamente utilizado na literatura, ainda no cenário com demanda concentrada.

## 6.2 MÉTODO TWH EM CENÁRIO COM DEMANDA CONCENTRADA

O cenário de simulação com demanda concentrada foi utilizado novamente, por permitir uma melhor visualização dos efeitos dos métodos de ganho variável propostos combinados ao TWH. Os resultados obtidos com as médias de 10 replicações para cada um dos métodos podem ser visualizados na Tabela 4. O intervalo planejado para a simulação foi  $H = 195$  s, o tempo de regulagem total,  $S_{\text{tot}} = 240$  s, e os ganhos internos do método TWHvr foram  $K_P = 0,05$  e  $K_V = 0,011$ , ajustados por tentativa e erro com a curva de carregamento médio.

Tabela 4 – Desempenho dos métodos TWH com ganho variável para cenário com demanda concentrada. Comparação com métodos TWH tradicional, RTO e opt.H, o último sem tempo de regulagem e, portanto, com intervalo médio menor.

Indicadores de desempenho	RTO	TWH (0,7)	TWHvh (0,7)	TWHvr (0,7)	opt.H (30)
Intervalo médio (s)	192	194	194	196	183
Coef. de variação dos intervalos	0,45	0,04	0,09	0,10	0,34
Retenção total aplicada (s)	7456	8966	8988	9825	2852
Tempo de espera na estação (s)	128	97	98	99	99
Tempo de espera embarcado (s)	178	177	135	150	84
Tempo de viagem percebido (min)	34,79	32,66	31,72	32,29	30,70
Velocidade operacional (km/h)	36,49	36,20	36,19	35,89	38,26
Média de usuários em pé (pax)	39	32	32	33	30

Por mais que o TWH tradicional também busque a regularização dos intervalos, ele o faz tentando equilibrar os intervalos à frente e atrás de cada ônibus sem levar em conta o cumprimento do intervalo planejado. Isso se reflete no fato de o coeficiente de variação dos intervalos ser maior nesse caso que para o FH apresentado na seção anterior. Comparando os valores da Tabela 3 com os da 4 pode-se perceber um comportamento parecido entre os dois métodos de controle realimentado, com uma leve vantagem para o TWH na análise dos tempos de espera para os usuários.

Ainda na Tabela 4, pode-se perceber que ambos os métodos propostos em TWHvh e TWHvr aproximaram o método tradicional do comportamento do controle preditivo. Os novos métodos atuam redistribuindo a retenção do método tradicional de uma maneira diferente ao longo do itinerário, o que acaba beneficiando consideravelmente o tempo de espera dos passageiros a bordo sem penalizar o tempo de espera dos passageiros na estação.

O gráfico da Figura 20 mostra as mesmas curvas de coeficiente de variação para os métodos RTO e opt.H da seção anterior porém, dessa vez, comparadas ao TWH, TWHvh e TWHvr. Pode-se observar novamente uma maior rigidez no controle de intervalo do

método proposto nas estações em que os ônibus se encontram mais vazios, permitindo uma variação maior naquelas em que os veículos estivessem mais cheios. Novamente, as técnicas de controle apresentadas aproximam o método tradicional ao comportamento do opt.H tido como referência.

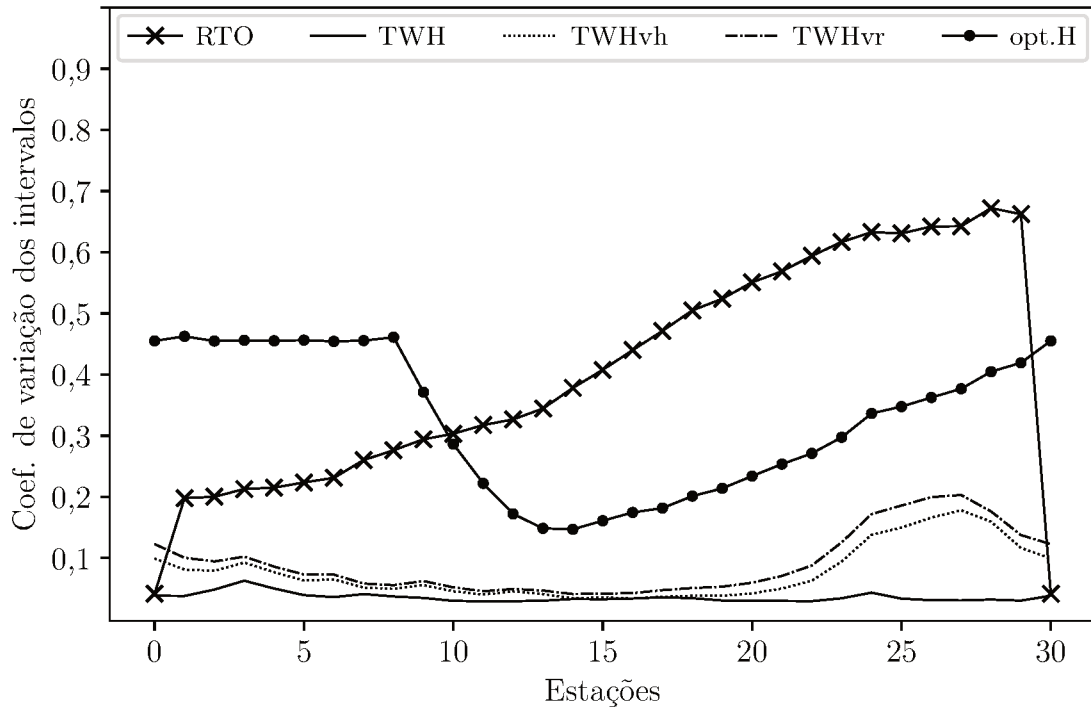


Figura 20 – Variação dos intervalos ao longo do itinerário para diferentes métodos de controle em comparação com TWH no cenário de simulação com demanda concentrada.

A Figura 21, que mostra a ação de controle dos métodos citados na presente seção, deixa claro o comportamento dos métodos propostos de aplicar as ações de controle com foco nas estações mais vazias, aproximando o comportamento do método de controle proporcional a aquele do método preditivo. Como o gráfico de ação de controle da seção anterior apresentou a curva do FHvh para representar os métodos propostos, na Figura 21, o método com variação que utiliza informações em tempo real TWHvr é utilizado para representar as duas propostas que resultam em comportamentos parecidos.

Nota-se que o método opt.H opta por não regularizar os intervalos nas estações em que o ônibus se encontra mais cheio por causa do efeito de predição de que poderia fazê-lo nos trechos em que esperava uma menor quantidade de passageiros a bordo e que a aplicação de retenção nas demais estações não seria benéfica ao tempo de espera total dos usuários do sistema. Esse é o comportamento replicado de alguma forma pelos métodos propostos, que possuem esse conhecimento advindo do histórico ou da contagem de passageiros embarcados em tempo real, para definir as melhores estações para que o

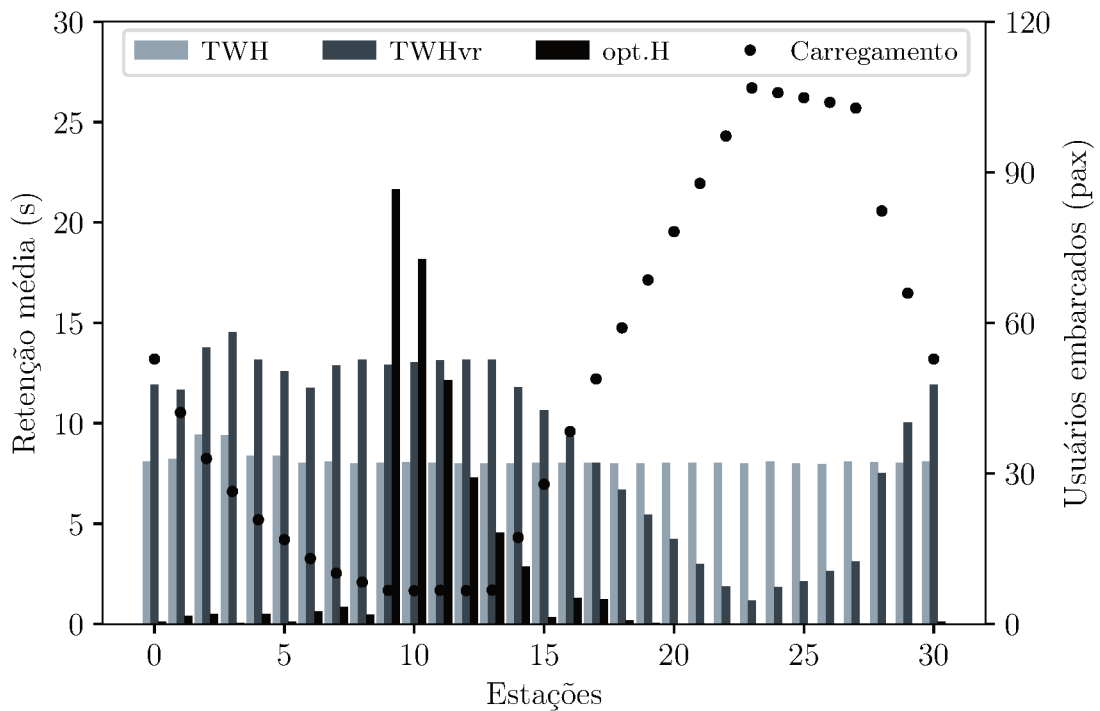


Figura 21 – Ação de controle do método TWHvr e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com TWH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda concentrada.

controle seja efetuado.

Com o objetivo de verificar o funcionamento dos métodos propostos em cenários em que o carregamento não varia tanto quanto o da demanda concentrada, novos testes foram realizados utilizando o padrão de demanda distribuída.

### 6.3 MÉTODO FH EM CENÁRIO COM DEMANDA DISTRIBUÍDA

Para melhor análise do efeito dos métodos propostos de ganho variável, as simulações foram repetidas para o método FH e suas variações utilizando o cenário de demanda distribuída, em que a variação do carregamento ao longo do itinerário ocorre em uma magnitude menor que no cenário de demanda concentrada. Espera-se portanto, que o comportamento dos métodos de ganho variável se aproximem a aqueles do método tradicional.

A Tabela 5 reúne os indicadores de desempenho médios das 10 replicações para cada um dos métodos indicados. Para o padrão de demanda distribuída, os valores dos ganhos internos do controlador FHvr foram alterados para  $K_P = 0,1$  e  $K_V = 0,018$ , já que foram ajustados de acordo com uma curva diferente de carregamento médio ao longo

do itinerário.

Tabela 5 – Desempenho dos métodos FH com ganho variável para cenário com demanda distribuída. Comparação com métodos FH tradicional, RTO e opt.H, o último sem tempo de regulagem e, portanto, com intervalo médio menor.

Indicadores de desempenho	RTO	FH (0,7)	FHvh (0,7)	FHvr (0,7)	opt.H* (30)
Intervalo médio (s)	204	209	209	211	203
Coef. de variação dos intervalos	0,56	0,01	0,03	0,05	0,16
Retenção total aplicada (s)	7078	9515	9573	10144	6452
Tempo de espera na estação (s)	140	105	105	106	104
Tempo de espera embarcado (s)	68	114	106	110	79
Tempo de viagem percebido (min)	19,03	18,15	17,94	18,15	17,20
Velocidade operacional (km/h)	34,13	33,57	33,56	33,35	34,64
Média de usuários em pé (pax)	34	26	26	26	25

O padrão de demanda distribuída apresenta uma quantidade maior de passageiros no sistema, o que implica em maiores tempos de embarque e desembarque acaba resultando na diferença dos intervalos médios quando comparados aos da Tabela 3. O novo intervalo planejado foi  $H = 209$  s e o tempo de regulagem total,  $S_{\text{tot}} = 300$  s. Como os métodos de controle realimentado aplicaram uma quantidade maior de retenção ao longo do itinerário, também tiveram seus tempos de ciclo e intervalos médios maiores. Além disso, pode-se perceber que os métodos que buscam a regularização dos intervalos tiveram valores menores para o coeficiente de variação. O método opt.H se destaca, no entanto, por conseguir uma diminuição no coeficiente de variação de 71% quando comparado ao RTO aplicando ainda menos retenção que o método de regulagem em terminal de origem.

Com relação aos tempos de espera na estação, pode-se perceber o efeito positivo de sua relação com a diminuição da variação dos intervalos para todos os métodos que efetuam controle ao longo do itinerário, com uma diminuição no indicador de desempenho de aproximadamente 25% para todos eles com relação ao RTO.

Para o cenário com demanda distribuída, percebe-se também, que a variação dos indicadores de tempo de espera entre o método FH tradicional e os métodos propostos FHvh e FHvr é bem menor que para o cenário com demanda concentrada. Como a variação de carregamento é menor, o objetivo é, de fato, que os métodos se aproximem ao comportamento do método tradicional com ganho fixo.

Na Figura 22, pode-se observar a variação dos intervalos ao longo do itinerário, enquanto a Figura 23 mostra a quantidade de retenção aplicada por cada método, ambas referentes ao padrão de demanda distribuída. Para a segunda, novamente o método FHvh foi escolhido para representar os métodos propostos no trabalho, que apresentam perfis semelhantes de ação de controle ao longo do itinerário. O perfil de carregamento médio

dos ônibus resultado desse padrão de demanda também pode ser visto no eixo direito da Figura 23.

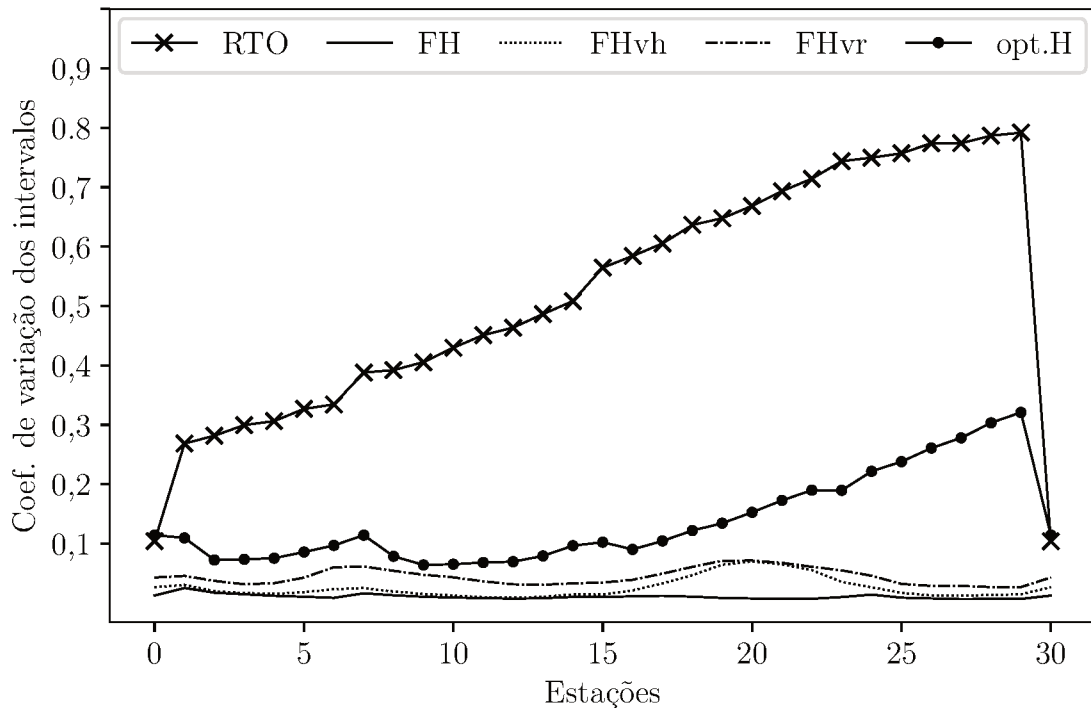


Figura 22 – Variação dos intervalos ao longo do itinerário para diferentes métodos de controle em comparação com FH no cenário de simulação com demanda distribuída.

Analisando a Figura 23, percebe-se que tanto o opt.H quanto o método FHvh que leva em conta o carregamento dos ônibus ao longo do itinerário aplicam maiores valores de retenção nas estações mais vazias, enquanto o método FH tradicional distribui a ação de controle de forma mais equilibrada por todo o trajeto. O opt.H se destaca por aplicar pouca retenção a partir da estação 20, o que leva ao aumento da variação dos intervalos percebida a partir da mesma estação na Figura 22. Por outro lado, os métodos propostos tiveram alguns picos na aplicação de retenção em estações mais vazias, algo que os diferencia do FH tradicional e que causa a melhora no indicador de tempo de espera dos passageiros embarcados vista na Tabela 5.

Por fim, também foi simulado um cenário em que o histórico de carregamento fornecido para a definição dos métodos propostos é diferente do carregamento real encontrado pelos ônibus durante a operação. Seus resultados podem ser observados na seção a seguir.

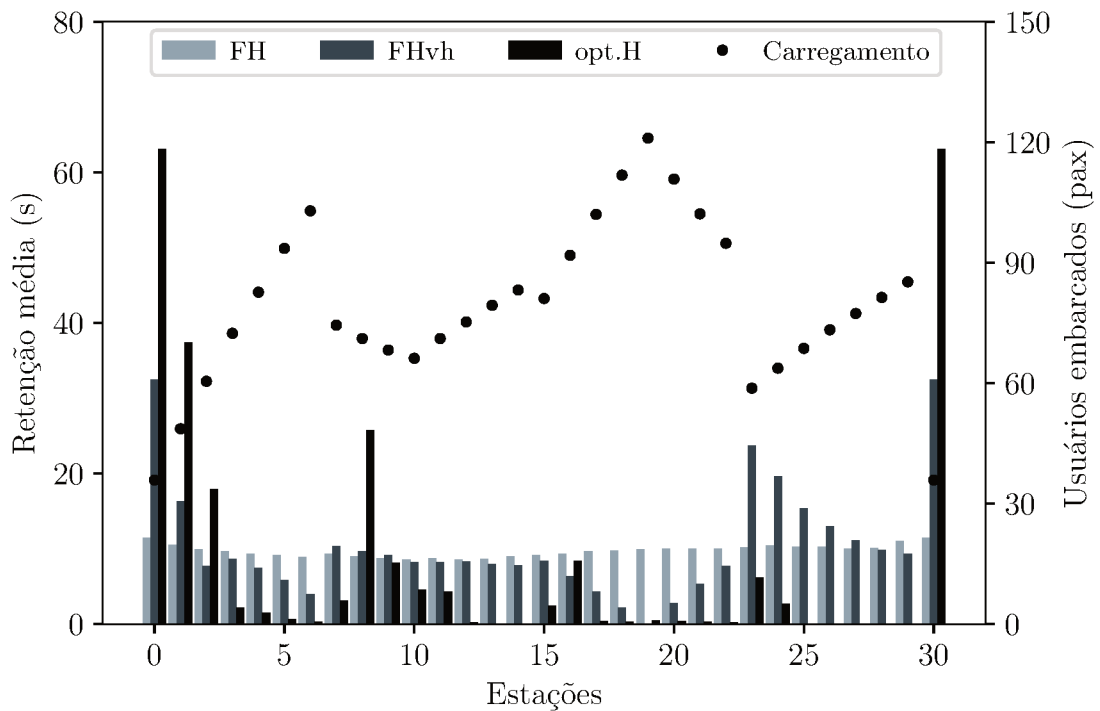


Figura 23 – Ação de controle do método FHvh e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com FH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda distribuída.

#### 6.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MÉTODOS PROPOSTOS

Para testar a sensibilidade dos métodos propostos com relação aos seus parâmetros de entrada, a simulação foi repetida de forma a replicar um desvio nos dados do histórico de carregamento que servem como base para definição do próprio ganho, no caso do FHvh, e para configuração dos ganhos internos do FHvr. O teste simula a operação do sistema de transporte público controlado pelos métodos propostos para um caso em que os métodos foram ajustados de acordo com um padrão de demanda errado, não encontrado na prática da operação.

O padrão de demanda utilizado no teste foi de demanda concentrada da Figura 14(a). No entanto, o ganho variável do método FHvh foi calculado com base no carregamento da demanda distribuída da Figura 14(b) para simular o desvio nos dados que alimentam o método proposto. O método FHvr, que também utiliza o cenário com demanda concentrada, também teve seus ganhos internos configurados com base na demanda distribuída utilizada anteriormente no trabalho. Os resultados podem ser vistos na Tabela 6.

É importante lembrar que, se a demanda esperada é muito diferente da demanda real na linha, os valores de intervalo planejado e de tempo total de regulação definidos na etapa

de planejamento da linha também geram erros nos métodos de controle. No entanto, para verificar apenas o efeito do erro causado pelo desvio nos métodos propostos, os valores assumidos para essas duas variáveis são os corretos para a demanda concentrada, com  $H = 195$  s e  $S_{\text{tot}} = 240$  s. O ganho nominal de todos os métodos utilizados foi  $K_N = 0,7$ .

Tabela 6 – Desempenho dos métodos FH com ganho variável para cenário com demanda concentrada, mas com ganhos configurados de acordo com demanda distribuída. Comparação com métodos FH tradicional e com os mesmos ganhos variáveis caso tivessem sido configurados corretamente.

Indicadores de desempenho	FH (0,7)	FHvh (correto)	FHvh (com erro)	FHvr (correto)	FHvr (com erro)
Intervalo médio (s)	195	195	196	195	199
Coef. de variação dos intervalos	0,01	0,06	0,03	0,07	0,31
Retenção total aplicada (s)	9392	9226	10039	9519	11951
Tempo de espera na estação (s)	97	98	98	97	104
Tempo de espera embarcado (s)	182	146	182	164	226
Tempo de viagem percebido (min)	32,79	31,86	32,94	32,31	34,46
Velocidade operacional (km/h)	36,04	36,11	35,82	36,00	35,18
Média de usuários em pé (pax)	32	32	32	32	33

O desvio médio entre os carregamentos resultados pelos dois tipos de demanda testados foi de 24% e, conforme apresentado no Capítulo 4, o erro médio ao longo do itinerário para o ganho baseado em histórico do método FHvh foi de 18% e para o ganho que utiliza informação em tempo real do método FHvr foi de 25%.

Analisando a Tabela 6, percebe-se que o erro no carregamento previsto faz com que o método FHvh perca os benefícios que teria conseguido, caso a demanda tivesse sido estimada de maneira correta para o itinerário. Os indicadores de tempo de espera voltam a ser os mesmos do FH tradicional, mesmo com a maior retenção aplicada pelo FHvh.

Para o método FHvr, o desempenho com os ganhos internos baseados em um padrão de demanda que não se concretizou na operação causou resultados ainda piores que os do método FH com ganho fixo. Tanto o tempo de espera da estação quanto embarcado tiveram seus indicadores de desempenho piorados, devido a significativa maior quantidade de retenção aplicada pelo mesmo. Os resultados mostram portanto a importância do ajuste dos ganhos internos do seu controlador.

A Figura 24 mostra a distribuição da ação de controle dos métodos com ganho variável configurados de acordo com a demanda errada e os compara ao método FH tradicional.

Pode-se perceber que os métodos propostos se comportaram de forma diferente dos exemplos apresentados nas seções anteriores pelo fato de terem sido configurados com informações erradas da demanda da operação. Enquanto deveriam concentrar sua ação



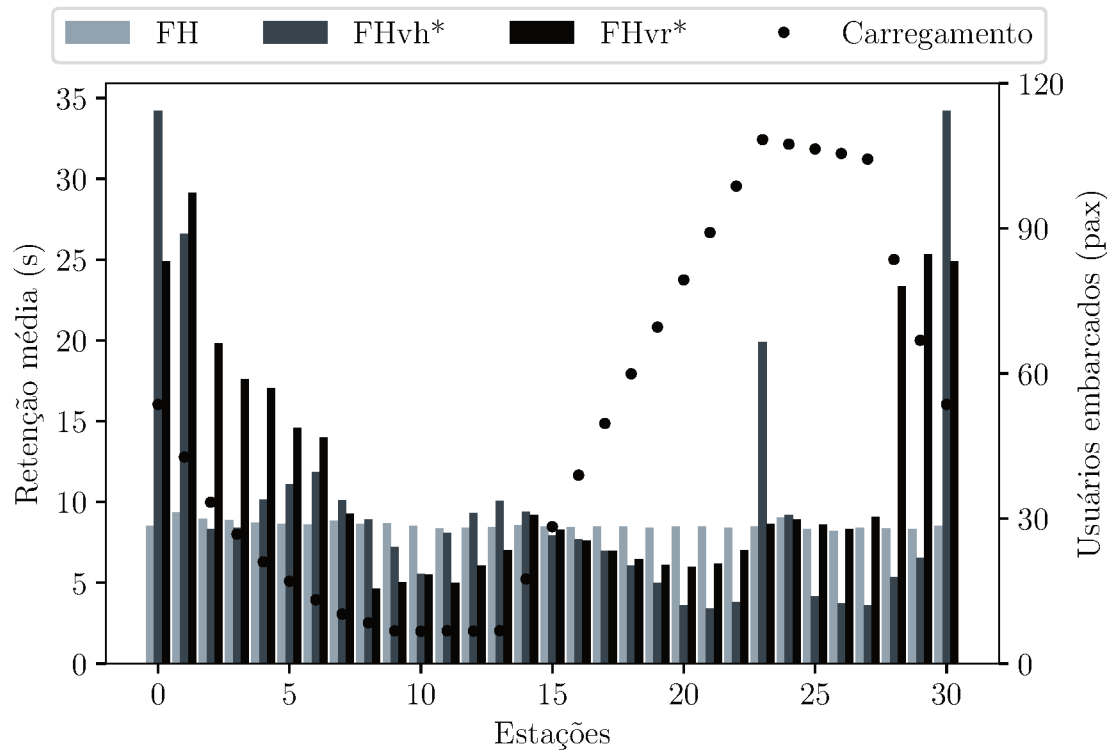


Figura 24 – Ação de controle do método FHvvh\* e carregamento médio ao longo do itinerário em comparação com FH tradicional e opt.H no cenário de simulação com demanda concentrada com erro no carregamento esperado ao longo do itinerário.

de controle nas estações em que os ônibus se encontrassem mais carregados não o fizeram de forma satisfatória, o que justifica a piora nos resultados da Tabela 6.

Conclui-se, portanto, que o opt.H continua apresentando os melhores resultados entre os métodos comparados. No entanto, 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 sem qualquer penalização ao tempo de espera dos usuários na estação. A consideração do carregamento atual e do histórico de carregamento, além da manutenção de intervalos regulares, nos métodos de controle realimentado mais simples os aproxima ao comportamento do preditivo.

Com este resultado, é possível confirmar a possibilidade de serem obtidos resultados melhorados aos métodos de controle realimentado mais simples matemática e computacionalmente através do conhecimento advindo de um método controle preditivo mais complexo e que necessita de mais informações do sistema para seu funcionamento.

No entanto, fica clara a importância da correta medição da demanda esperada na etapa de planejamento com a última seção apresentada neste capítulo. Erros nessa etapa, geram também erros consideráveis na operação dos novos métodos.

## 7 CONCLUSÃO

Foram definidas duas novas técnicas de controle por retenção em transporte público. Essas técnicas modificam o uso de duas leis de controle realimentado tradicionais, controle de intervalo à frente (FH) e controle de intervalo à frente e atrás (TWH), mantendo suas características principais, mas passando a operar com ganhos variáveis ao invés de ganhos fixos. Nas duas técnicas, o ganho varia em função do carregamento de cada ônibus em cada estação.

O desenvolvimento dessas duas técnicas se baseou em ZIMMERMANN (2016), que concluiu que em cenários onde a demanda proporciona um carregamento dos ônibus constante ao longo do itinerário, uma maior regularização dos intervalos beneficia os usuários do sistema. Por outro lado, em cenários com carregamentos mais variáveis, é mais benéfico aos usuários regularizar os intervalos nos trechos de baixo carregamento e permitir que os intervalos se desregulem nos trechos com carregamento mais elevado.

Foram comparados em ambiente de simulação, portanto, quatro métodos diferentes: RTO, FH, TWH e opt.H. Os métodos FH e TWH foram os escolhidos para receber o efeito de variação de ganho proporcional ao longo do itinerário de forma a concentrar os esforços de controle nas estações em que os ônibus se encontrassem menos carregados.

Foram incorporados aos métodos de controle o tempo de regulagem proposto por DAGANZO (2010). Essa ferramenta diminui o efeito de “fuga” permitindo que ônibus que cheguem atrasados possam se adiantar com relação aos ônibus que tem seus intervalos regulares.

O cenário de simulação consistiu de uma linha BRT circular proposta para a Região Metropolitana de Florianópolis com 30 estações e 16 ônibus em operação. Os testes foram realizados com dois padrões de demanda diferentes: concentrada, em que o embarque dos passageiros se acumula em uma parte específica do itinerário e o desembarque em outra, e distribuída, que busca representar de forma mais realista o padrão de demanda da região proposta para instalação da linha de BRT. Enquanto a demanda concentrada busca destacar os efeitos dos métodos propostos, a demanda distribuída mostra que seu comportamento se aproxima ao dos métodos tradicionais, quando a variação do carregamento ao longo do itinerário é menor.

Duas formas de variação do ganho foram apresentadas e resultados semelhantes foram obtidos. A primeira, se utiliza apenas de dados do histórico, enquanto a segunda também faz uso da informação de quantidade de usuários embarcados em tempo real, no instante de cálculo da retenção a ser aplicada.

Foi proposta uma alteração no cálculo para definição do indicador de tempo de espera dos usuários embarcados para obter uma melhor aproximação dos valores encontrados na realidade. O novo cálculo contabiliza, além dos usuários que saíram da estação anterior e não desembarcaram na estação atual, também aqueles que subiram no ponto em questão e também sofrem qualquer retenção que seja aplicada antes da partida do ônibus.

Os resultados de simulação apresentados mostram que o comportamento do opt.H foi, de certa forma, replicado com as técnicas propostas, que trouxeram melhora ao tempo de espera dos passageiros embarcados, sem penalizar o tempo de espera na estação dos usuários. Como os métodos de controle realimentado propostos são mais simples que o método de controle por otimização, também apresentaram tempos de simulação menores para cada replicação. Foi possível concluir que é possível diminuir a espera dos passageiros na estação utilizando um método simples de controle realimentado proporcional apenas com uma distribuição diferente da mesma quantidade de retenção aplicada pelos métodos tradicionais.

Também foram realizados testes para verificar o funcionamento dos métodos propostos caso não sejam alimentados com os dados corretos da demanda em operação. Para isso, os ganhos variáveis dos métodos foram ajustados de acordo com um padrão de demanda errado. Um dos métodos perdeu as vantagens que seriam adquiridas com a calibração correta do controlador e teve seus resultados próximos ao do método tradicional. O segundo método teve resultado ainda pior que o método de controle sem ganho variável.

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.

Podem ser elaboradas também, diferentes formas de variação do ganho para o método de controle baseado em informação em tempo real que não seja tão sensível à calibração dos seus ganhos internos. Análises de sensibilidade mais aprofundadas e também estudos sobre a estabilidade do método podem ser continuados.

## REFERÊNCIAS

- ABKOWITZ, M. **Transit service reliability**. Relatório Técnico. Cambridge, MA: US Department of Transportation, 1978.
- ABKOWITZ, M.; ENGELSTEIN, I. Factors affecting running time on transit routes. **Transportation Research Record**, n. 17A, 1983.
- ABKOWITZ, M.; ENGELSTEIN, I. Methods for maintaining transit service regularity. **Transportation Research Record**, n. 961, 1984.
- ABKOWITZ, M.; TOZZI, J. Transit route characteristics and headway-based reliability control. **Transportation Research Record**, n. 1078, 1986.
- BALCOMBE, R. et al. **The demand for public transport: a practical guide**. Relatório Técnico 593. Transportation Research Laboratory, 2004.
- BARNETT, A. On controlling randomness in transit operations. **Transportation Science**, v. 8, n. 2, p. 102–116, 1974.
- BARNETT, A.; KLEITMAN, D. J. Optimal scheduling policies for some simple transportation systems. **Transportation Science**, v. 7, n. 1, p. 85–99, 1973.
- BERREBI, S. J. et al. Comparing bus holding methods with and without real-time predictions. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 87, p. 197–211, 2018.
- BUKKAPATNAM, S.; DESSOUKY, M.; ZHAO, J. **Distributed architecture for real-time coordination in transit networks**. Relatório Final Metrans 00-13. Los Angeles, CA. METRANS Transportation Center, 2003.
- CATS, O. et al. Impacts of holding control strategies on transit performance. **Transportation Research Record**, v. 2216, p. 51–58, 2011.
- CATS, O.; RUFÍ, F. M.; KOUTSOPOULOS, H. N. Optimizing the number and location of time point stops. **Public Transport**, v. 6, n. 3, p. 215–235, 2014.
- CEDER, A. **Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice**. Burlington, Massachusetts: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2007.
- DAGANZO, C. F. A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 43, n. 10, p. 913 – 921, 2009.
- DAGANZO, C. F. **Public Transportation Systems : Basic Principles of System Design , Operations Planning and Real-Time Control**. Berkeley, California: ITS Berkeley, 2010.
- DAGANZO, C. F.; PILACHOWSKI, J. Reducing bunching with bus-to-bus cooperation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 1, p. 267 – 277, 2011.

- DESSOUKY, M. et al. Real-time control of buses for schedule coordination at a terminal. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 37, n. 2, p. 145 – 164, 2003.
- EBERLEIN, X. J.; WILSON, N. H. M.; BERNSTEIN, D. Modeling real-time control strategies in public transit operations. In: **Computer-aided transit scheduling**. Berlin: Springer, 1999. p. 325–346.
- EBERLEIN, X. J.; WILSON, N. H. M.; BERNSTEIN, D. The holding problem with real-time information available. **Transportation Science**, v. 35, n. 1, p. 1–18, 2001.
- HICKMAN, M. D. An analytic stochastic model for the transit vehicle holding problem. **Transportation Science**, v. 35, n. 3, p. 215–237, 2001.
- IBARRA-ROJAS, O. et al. Planning, operation, and control of bus transport systems: A literature review. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 77, p. 38 – 75, 2015.
- JOLLIFFE, J. K.; HUTCHINSON, T. P. A behavioural explanation of the association between bus and passenger arrivals at a bus stop. **Transportation Science**, v. 9, p. 248 – 282, 1975.
- KOEHLER, L.; KRAUS, W.; CAMPONOGARA, E. Iterative quadratic optimization for the bus holding control problem. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 4, p. 1568–1575, 2011.
- KOFFMAN, D. **A simulation study of alternative real-time bus headway control strategies**. Transportation Research Board, 1978.
- LEVINSON, H. **Supervision Strategies for Improved Reliability of Bus Routes**. Washington, DC: National Cooperative Transit Research and Development Program, 1991.
- LUETHI, M.; WEIDMANN, U. A.; NASH, A. Passenger arrival rates at public transport stations. In: **Transportation Research Board 86th Annual Meeting**. Washington: Transportation Research Board, 2007.
- NEWELL, G. F.; POTTS, R. B. Maintaining a bus schedule. In: **2nd Australian Road Research Board Conference**. Melbourne: Australian Road Research Board (ARRB), 1964. v. 2, n. 1, p. 388–93.
- OSUNA, E.; NEWELL, G. Control strategies for an idealized public transportation system. **Transportation Science**, v. 6, n. 1, p. 52–72, 1972.
- O’FLAHERTY, C. A.; MANGAN, D. O. Bus passenger waiting times in central areas. **Traffic Engineering and Control**, p. 419–421, 1970.
- PLAMUS. **Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da Grande Florianópolis**. 2015. Disponível em: <plamus.com.br/plamus.html>.
- SEDDON, P.; DAY, M. Bus passenger waiting times in greater manchester. **Traffic Engineering and Control**, v. 15, n. 9, p. 442–445, 1974.

- STRATHMAN, J. G.; HOPPER, J. R. Empirical analysis of bus transit on-time performance. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 27, n. 2, p. 93–100, 1993.
- STRATHMAN, J. G. et al. 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, 2001.
- TSS. **AIMSUN Dynamic Simulator Users Manual v. 7**. Barcelona: Transport Simulation Systems, 2012.
- TURNQUIST, M. A. **Strategies for Improving Bus Transit Service Reliability**. Transportation Research Record 818. Evanston, IL, 1982.
- TURNQUIST, M. A.; BLUME, S. W. **Evaluating potential effectiveness of headway control strategies for transit systems**. Transportation Research Record 746. Washington, 1980.
- TURNQUIST, M. A.; BOWMAN, L. A. The effects of network structure on reliability of transit service. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 14, 1980.
- WEBER, W. **Die Reisezeit der Fahrgäste öffentlicher Verkehrsmittel in Abhängigkeit von Bahnart und Raumlage**. Stuttgart: Technische Hochschule Stuttgart, 1966.
- WRIGHT, L.; HOOK, W. **Bus Rapid Transit Planning Guide**. New York: Institute for Transportation & Development Policy, 2007.
- ZIMMERMANN, L. **Controle de intervalos entre ônibus: comparação entre métodos realimentados clássicos e controle preditivo baseado em modelo**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2016.
- ZIMMERMANN, L.; KRAUS, W.; KOEHLER, L. A. Análise de estratégias realimentadas para controle por retenção do intervalo entre ônibus. **XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da Anpet**, 2015.
- ZIMMERMANN, L. et al. Holding control of bus bunching without explicit service headways. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 3, p. 209 – 214, 2016.