



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

Lucas Zimmermann

Otimização da Trajetória de Ônibus para Regularização de Intervalos por meio de Retenção em Estações e de Controles de Velocidade e Semafórico

Florianópolis
2023

Lucas Zimmermann

Otimização da Trajetória de Ônibus para Regularização de Intervalos por meio de Retenção em Estações e de Controles de Velocidade e Semafórico

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Werner Kraus Jr., Dr.

Coorientadores: Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.

Prof. Leandro Callegari Coelho, Dr.

Florianópolis

2023

Lucas Zimmermann

Otimização da Trajetória de Ônibus para Regularização de Intervalos por meio de Retenção em Estações e de Controles de Velocidade e Semafórico

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

Prof. Enrique Ferreira, Dr.
Universidade Católica do Uruguai

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ubirajara Franco Moreno, 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 Doutor em Engenharia de Automação e Sistemas.

Coordenação do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Automação e Sistemas

Prof. Werner Kraus Jr., Dr.
Orientador

Florianópolis, 2023.

RESUMO

Apresentam-se resultados da aplicação de método de atuação ótima do controle da operação para regularizar os intervalos entre ônibus de uma mesma linha. Supondo que um controlador de intervalos gerencie a operação dos ônibus definindo instantes alvo de chegada na próxima estação para cada ônibus, o problema é como implementar as decisões de controle para o ônibus em termos de três ações alternativas não exclusivas: reter o ônibus nas estações; variar a velocidade dos ônibus; e controlar os semáforos. Para este fim, especificou-se modelo de trajetória dos ônibus que se desejava controlar com base em restrições usando linguagem de programação matemática. Os objetivos operacionais foram formulados como uma função de custo multiobjetivo que exprime cinco diferentes critérios de desempenho: (i) precisão em cumprir o instante alvo de chegada; (ii) menor ajuste semaforico; (iii) menor tempo de retenção nas estações; (iv) menor tempo de atraso semaforico; e (v) reduzir a variabilidade da velocidade ao longo do itinerário. O problema resultante da combinação das restrições com a função multiobjetivo foi resolvido por método lexicográfico. Resultados da aplicação do método em um único segmento entre duas estações no controle da trajetória de um único ônibus mostraram a superioridade da solução tanto para cumprimento do instante alvo de chegada como da redução da variação dos tempos de viagem. Estudos com casos de vários ônibus operando em itinerários com muitas estações foram realizados com base em dois ambientes de simulação. No primeiro caso, modelou-se em simulador comercial uma linha de ônibus completa na Cidade de Quebec, Canadá, permitindo mostrar a vantagem da atuação ótima sobre a simples retenção nas estações ou, até mesmo, a atuação combinada de retenção nas estações e prioridade semaforica absoluta. No segundo caso, desenvolveu-se simulador próprio computacionalmente mais eficiente, facilitando a implementação de estratégia de controle preditivo baseado em modelo, bem como permitindo melhor acesso às informações das simulações. Neste simulador, modelou-se uma linha de ônibus com operação circular. A comparação da atuação ótima com a atuação por simples retenção nas estações ou a atuação combinada de retenção nas estações e prioridade semaforica absoluta mostrou a superioridade da solução proposta tanto em regularidade de intervalos quanto em velocidade comercial para diversas estratégias de controle de intervalo, com a contrapartida de demandar mais ajustes nos tempos semaforicos. Testes de variação de parâmetros evidenciaram a importância do ajuste correto de parâmetros, sendo que algumas estratégias de controle testadas se mostraram mais sensíveis que outras. Por fim, testou-se a integração do controle preditivo de intervalos com a atuação ótima em um único modelo, revelando resultados mais promissores do que todas as demais estratégias de controle testadas. Entretanto, por limitação computacional diante da complexidade do modelo obtido, os testes foram executados com horizonte de predição curto, limitando o alcance das conclusões acerca dos ganhos de desempenho.

Palavras-chave: Transporte Público. Controle de intervalo. Controle preditivo. Controle realimentado. Controle Semaforico atuado por ônibus. Controle de velocidade. Controle por retenção.

ABSTRACT

We present the results of the application of an optimal actuation control method to regulate the headways between buses of the same line. Assuming that an headway controller manages bus operation by defining target arrival times at the next station for each bus, the problem is how to implement control decisions for the buses in terms of three non-exclusive alternative actions: holding the bus at stations, varying bus speeds, and controlling traffic lights. To this end, a bus trajectory model was specified based on constraints using mathematical programming language. The operational objectives were formulated as a multi-objective cost function that expresses five different performance criteria: (i) accuracy in meeting the target arrival time; (ii) minimization of traffic light adjustments; (iii) minimization of holding time; (iv) minimization of delay at traffic light; and (v) reducing the variability of speed along the itinerary. The problem resulting from the combination of constraints and the multi-objective function was solved by a lexicographic method. Results from the method's application in a single segment between two stations in controlling the trajectory of a single bus highlight the properties of the solution for both meeting the target arrival time and reducing the variation of travel times. Studies with cases of multiple buses operating on itineraries with many stations were carried out based on two simulation environments. In the first case, a complete bus line in Quebec City, Canada, was modeled in a commercial simulator, allowing to show the advantage of optimal actuation over simple holding or even the combined actuation of holding and unconditional transit signal priority. In the second case, a more computationally efficient simulator was developed, facilitating the implementation of a model-based predictive control strategy, as well as allowing better access to simulation information. In this simulator, a circular bus line was modeled. The comparison of optimal actuation with simple holding or the combined actuation of holding and absolute traffic light priority showed the superiority of the proposed solution in terms of headway regularity and commercial speed for various headway control strategies, with the counterpart of requiring more adjustments in traffic light timings. Parameter variation tests highlighted the importance of correctly adjusting parameters, with some control strategies tested being more sensitive than others. Finally, the integration of predictive headway control with optimal actuation was tested in a single model, revealing more promising results than all other control strategies tested. However, due to computational limitations in the face of the complexity of the model obtained, the tests were performed with a short prediction horizon, limiting the scope of conclusions about performance gains.

Keywords: Public Transportation. Headway Control. Model Predictive Control. Feedback Control. Transit Signal Control. Speed Control. Holding Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do sistema de controle dos ônibus, no qual: “Otimizador de Trajetória” refere-se ao modelo apresentado neste capítulo; “Controlador de Intervalos” é o tomador de decisão referente ao intervalo a ser mantido entre os ônibus; “Ônibus” representa todos os ônibus no sistema, os quais são equipados com um atuador de velocidade e um atuador de retenção; “Controlador Semafórico” estão nos semáforos em cada interseção.	31
Figura 2 – (a) Segmento entre duas estações k e $k+1$ composta por $ S_k $ interseções e $ Y_k $ seções. (b) Diagrama espaço-tempo de uma trajetória de ônibus no segmento entre as estações k e $k+1$; em vermelho, as fases semaforicas vermelhas.	33
Figura 3 – Distribuição de probabilidade do instante de chegada do ônibus na estação 2 para o experimento A, em que $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 = 83s$	42
Figura 4 – Diagrama espaço-tempo exemplificando duas trajetórias de ônibus do experimento A: em roxo o resultado de [T] e em cinza o resultado do [H]. Ambas as trajetórias com $s_{i,1} = 54$ s e $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 = 83$ s. O instante alvo de chegada (137 s) está representado pelo círculo preto na ordenada próxima de 1.200 m.	43
Figura 5 – Distribuição de probabilidade do instante de chegada do ônibus na estação 2 para o experimento B, em que $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 + 50 = 133$ s.	43
Figura 6 – Diagrama espaço-tempo exemplificando duas trajetórias de ônibus do experimento B: em roxo o resultado de [T] e em cinza o resultado do [H]. Ambas as trajetórias com $s_{i,1} = 80$ s e $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 + 50 = 133$ s. O instante alvo de chegada (213 s) está representado pelo círculo preto na ordenada próxima de 1.200 m.	44
Figura 7 – Horizonte de predição utilizado pelo modelo do controle preditivo, exemplificado com 5 estações no horizonte de predição.	48
Figura 8 – Esquema do sistema de controle dos ônibus, no qual: “Controlador de Intervalos com Otimização de Trajetória” refere-se ao modelo apresentado neste capítulo; “Ônibus” representa todos os ônibus no sistema, os quais são equipados com um atuador de velocidade e um atuador de retenção; “Controlador Semafórico” estão nos semáforos em cada interseção.	50
Figura 9 – Linha de ônibus 800, sentido Pointe-de-Sainte-Foy da Cidade de Quebec, Canadá. Os pontos roxos são as estações e os números entre elas são a quantidade de interseções controladas no segmento. Sem número significa um segmento sem semáforo.	54

Figura 10 – Estimativa de demanda e fração de passageiros a bordo que desembarcam em cada estação da Linha 800, Cidade de Quebec, Canadá.	54
Figura 11 – Histograma dos desvios de intervalos observados nas estações para cada caso simulado. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória.	56
Figura 12 – Composição do tempo médio de viagem no segmento de cada estação. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória.	57
Figura 13 – Histogramas das velocidades observadas para todos os casos simulados; a velocidade instantânea de cada ônibus foi medida a cada 10 segundos. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória.	58
Figura 14 – Cenário implementado para testes no simulador desenvolvido. Os símbolos vermelho e verde entre estações identificam a presença de semáforos.	59
Figura 15 – Histograma dos desvios de intervalos observados nas estações para cada caso simulado no cenário base. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.	62
Figura 16 – Composição do tempo médio de viagem no segmento de cada estação para cada caso simulado no cenário base. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.	64
Figura 17 – Histogramas das velocidades observadas para cada caso simulado no cenário base; a velocidade instantânea de cada ônibus foi medida a cada 10 segundos. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.	65

Figura 18 – Gráficos de marcha de uma replicação selecionada para cada caso simulado no cenário base. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.	66
Figura 19 – Desvio de intervalo e velocidade comercial em função da variação do ganho proporcional, K_c , para os casos FH.H, FH.P e FH.T e em função da variação do horizonte de predição para os casos OPT.H e OPT.T.	69
Figura 20 – Desvio absoluto de intervalo, velocidade comercial, e ajuste semaforico em função da variação do ajuste semaforico máximo, para os três casos que atuam sobre os tempos semaforicos.	71
Figura 21 – Composição do tempo médio de viagem no segmento de cada estação para o caso G.T no cenário base; o resultado do caso OPT.T é repetido para comparação.	75
Figura 22 – Histograma das velocidades observadas para o caso G.T no cenário base; o resultado do caso OPT.T é repetido para comparação.	75
Figura 23 – Resultados para uma replicação selecionada da simulação do caso G.T no cenário base. (a) o gráfico de marcha; (b) a média móvel dos desvios de intervalo; e (c) o custo retornado por cada componente da função objetivo no ponto ótimo para cada evento da operação.	77
Figura 24 – falar o intervalo horário	91
Figura 25 – Fluxograma resumido de todo o algoritmo de simulação de controle de intervalos entre ônibus de uma mesma linha.	94
Figura 26 – Fluxograma detalhado do algoritmo de geração de arquivo com dados de entrada de uma replicação.	95
Figura 27 – Defasagens semaforicas do cenário base. Os valores de defasagem dos 11 semaforos, de baixo para cima são: 90, 30, 90, 30, 30, 90, 90, 30, 90, 30, 30 segundos.	96
Figura 28 – Fluxograma detalhado do algoritmo de cálculo do tempo de parada de um ônibus em uma estação.	100
Figura 29 – Fluxograma detalhado do algoritmo que executa a trajetória dos ônibus nos segmentos do itinerário.	103
Figura 30 – Resultados do teste do simulador com replicação determinista; (a) o gráfico de marcha; (b) o tempo médio de viagem em cada segmento do itinerário; e (c) o histograma das velocidade observadas ao longo da simulação.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Análise numérica de um segmento. Experimento A: $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 = 83$. Experimento B: $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 + 50 = 133$ s.	42
Tabela 2 – Desempenho de todos os casos simulados para a linha 800.	55
Tabela 3 – Desempenho de todos os casos simulados no cenário base.	61
Tabela 4 – Desempenho do caso G.T no cenário base; desempenho do OPT.T no mesmo cenário é repetido para comparação.	74
Tabela 5 – Parâmetros de simulação.	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

[H]	Caso que testa a aplicação de retenção na estação
[T]	Caso que testa a aplicação do modelo de otimização de trajetória
API	Interface para Programação de Aplicações (<i>Application Programming Interface</i>)
BRT	<i>Bus Rapid Transit</i>
CSP	Prioridade Semafórica Condicional para Ônibus (<i>Conditional Signal Priority</i>)
FH.H	Caso que testa a estratégia que usa o controle proporcional de intervalos atuando por retenção
FH.P	Caso que testa a estratégia que usa o controle proporcional de intervalos atuando por retenção e por TSP
FH.T	Caso que testa a estratégia que integra o controle proporcional de intervalos com a otimização de trajetória
G.T	Caso que testa a estratégia de controle unificado de intervalos e trajetórias
OPT.H	Caso que testa a estratégia que usa o controle preditivo de intervalos atuando por retenção
OPT.T	Caso que testa a estratégia que integra o controle preditivo de intervalos com a otimização de trajetória
Prefol	Método de controle proposto por Turnquist (1982)
TSC	Controle Semafórico para Ônibus (<i>Transit Signal Control</i>)
TSP	Prioridade Semafórica para Ônibus (<i>Transit Signal Priority</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_{i,m,k',y}$	Instante de chegada do ônibus i na seção y da estação k' volta m
$\alpha_{i,y}$	Instante de chegada do ônibus i no semáforo da seção y
$\hat{\alpha}_{i,k,y}$	Instante esperado de chegada do ônibus i no semáforo da seção y do segmento da estação k
$\delta_{y,x}$	Tempo de ajuste do início da fase x do semáforo da seção y
δ_y^{ant}	Tempo limite para antecipação do início de fases no semáforo da seção y
δ_y^{pst}	Tempo limite para adiamento do início de fases no semáforo da seção y
$\hat{\delta}_{k,y,x}$	Tempo esperado de ajuste do início da fase x do semáforo da seção y do segmento da estação k
λ_k	Taxa estimada de chegada de usuários na estação k
$\mu_{i,m,k',y}$	Instante de entrada do ônibus i na seção y do segmento da estação k' volta m
ν_i^{acc}	Aceitação de velocidade do ônibus i
$\nu_{i,m,k',y}^{\tau}$	Fator aleatório do tempo de viagem do ônibus i na volta m na seção y do segmento da estação k'
$\sigma_{i,y}$	Atraso do ônibus i no semáforo da seção y
$\hat{\sigma}_{i,k,y}$	Atraso esperado do ônibus i no semáforo da seção y do segmento da estação k
$\bar{\sigma}_{k,y}$	Atraso médio no semáforo da seção y do segmento da estação k
$\tau_{i,m,k',y}$	Tempo de viagem na seção y do segmento da estação k' na volta m
$\hat{\tau}_{i,m,k',y}$	Tempo esperado de viagem na seção y do segmento da estação k' na volta m
$\tau_{i,y}$	Tempo de viagem do ônibus i na seção y
τ_y^{max}	Limite superior do tempo de viagem na seção y
τ_y^{min}	Limite inferior do tempo de viagem na seção y
$\hat{\tau}_{i,k,y}$	Tempo esperado de viagem do ônibus i na seção y do segmento da estação k
$\bar{\tau}_{k,y}$	Tempo médio de viagem na seção y do segmento da estação k
Φ_y	Conjunto de fases semaforicas do semáforo da seção y
$\phi_{y,x}$	Instante predefinido de início da fase x do semáforo da seção y
Ψ	Conjunto de fases semaforicas que sofreram ajustes em eventos anteriores
Ω	Conjunto de tuplas que identificam quais semáforos são os mesmos fisicamente
$a_{i,k}$	Instante de chegada do ônibus i na estação k
$\hat{a}_{i,k+1}$	Instante alvo de chegada do ônibus i na estação $k + 1$
$\mathcal{B}_{i,m,k'}$	Número de usuários que embarcam no ônibus i na estação k' volta m
$b_{i,y,x}$	variável binária que define se o ônibus i cruza o semáforo da seção y durante a fase x
$\hat{b}_{i,k,y,x}$	valor esperado da variável binária que define se o ônibus i cruza o semáforo da seção y do segmento da estação k durante a fase x
C_0	Atraso de tempo para início do processo de embarque e desembarque

C_1	Tempo de embarque por usuário
C_2	Tempo de desembarque por usuário
$d_{i,k}$	Instante de partida do ônibus i da estação k
$\hat{d}_{i,k}$	Instante esperado de partida do ônibus i da estação k
f	Custo global dos usuários
f_1	Custo do erro no instante de chegada do ônibus na estação
f_2	Custo dos ajustes semafóricos
f_3	Custo de retenção do ônibus na estação
f_4	Custo do atraso do ônibus em semáforos
f_5	Custo da variação de velocidade entre seções de um segmento
f_d	Custo da espera dos usuários nas estações
f_s	Custo da espera dos usuários embarcados enquanto o ônibus está parado nas estações
f_t	Custo do tempo de viagem dos usuários entre estações
H_i	Intervalo planejado para operação entre o ônibus i e o ônibus $i - 1$
$h_{i,k}$	Tempo de retenção do ônibus i na estação k
h_k^{\max}	Tempo máximo permitido para retenção de ônibus na estação k
$\hat{h}_{i,k}$	Tempo esperado de retenção do ônibus i na estação k
I	Conjunto de ônibus de uma linha
i	Índice de ônibus pertencentes ao conjunto I
K	Conjunto de estações no itinerário de uma linha
k	Índice de estações pertencentes ao conjunto K
k'	Índice de estação quando este é vinculado à uma volta em itinerários circulares
K_c	Ganho proporcional
\mathcal{L}_i	Capacidade máxima de usuários no ônibus i
$l_{i,m,k'}$	Número de usuários embarcados no ônibus i na partida da estação k' volta m
$\hat{l}_{i,k}$	Número esperado de usuários embarcados no ônibus i na partida da estação k
$\tilde{l}_{i,k}$	Estimativa de usuários embarcados no ônibus i na partida da estação k obtida na iteração anterior do método de Koehler
M	número qualquer maior que qualquer valor possível de $\alpha_{i,y}$
m	Índice de volta em itinerários circulares
n	Número de portas do ônibus
N_i	Conjunto de estações no horizonte de predição do ônibus i
$q_{i,m,k'}$	Fração de desembarque de usuários do ônibus i na estação k' volta m
\hat{q}_k	Fração estimada de desembarque de usuários na estação k
R_y	Subconjunto de fases semafóricas vermelhas do semáforo da seção y
$r_{i,k}$	Tempo de regulagem do ônibus i para a estação k

S_k	Subconjunto de seções que contém semáforos no segmento entre as estações k e $k + 1$
$s_{i,m,k'}$	Tempo para embarque e desembarque do ônibus i na estação k volta m
$s_{i,k}$	Tempo para embarque e desembarque do ônibus i na estação k
$\hat{s}_{i,k}$	Tempo esperado para embarque e desembarque do ônibus i na estação k
t_k^{\max}	Limite superior do tempo de viagem entre as estações k e $k + 1$
t_k^{\min}	Limite inferior do tempo de viagem entre as estações k e $k + 1$
$\hat{t}_{i,k}$	Tempo esperado de viagem do ônibus i entre as estações k e $k + 1$
$\bar{t}_{i,k}$	Tempo médio de viagem entre as estações k e $k + 1$
u_y	Comprimento da seção y
$v_{i,m,k'}$	Número de vagas no ônibus i após o desembarque de usuários na estação k' volta m
x	Índice de fases semaforicas pertencentes ao conjunto Φ_y
Y_k	Conjunto de seções no segmento entre a estação k e a estação $k + 1$
y	Índice de seções pertencentes ao conjunto Y_k

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	VEÍCULOS AUTOMATIZADOS E O FUTURO DO TRANSPORTE COLETIVO	16
1.2	CONTROLE DA OPERAÇÃO DE ÔNIBUS	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.4	MÉTODO	20
1.5	ORGANIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO ESCOPO	21
1.6	PUBLICAÇÕES GERADAS	22
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	23
2.1	INTERVALOS CONTROLADOS POR RETENÇÃO	23
2.2	INTERVALOS CONTROLADOS POR VELOCIDADE	26
2.3	INTERVALOS CONTROLADOS POR SEMÁFOROS	27
2.4	INTERVALOS CONTROLADOS POR ATUAÇÕES COMBINADAS	28
3	OTIMIZAÇÃO DA TRAJETÓRIA	30
3.1	ESTRUTURA DE CONTROLE E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .	30
3.2	MODELO DE TRAJETÓRIA DO ÔNIBUS	31
3.2.1	Elementos básicos de modelagem	32
3.2.2	Atraso nas interseções	33
3.2.3	Restrições de limite	34
3.3	OBJETIVOS PARA OTIMIZAÇÃO	35
3.3.1	Instante alvo de chegada	35
3.3.2	Tempos semaforicos	36
3.3.3	Tempo de retenção	36
3.3.4	Atraso nas interseções	36
3.3.5	Velocidade constante	37
3.4	EFEITOS DE CADA OBJETIVO NA SOLUÇÃO	37
3.5	FORMULAÇÃO MULTIOBJETIVO	39
3.6	ANÁLISE NUMÉRICA DE UM SEGMENTO	40
3.6.1	Configuração do cenário	40
3.6.2	Tempo esperado de viagem igual ao tempo médio de viagem .	41
3.6.3	Tempo esperado de viagem 50 s maior que tempo médio de viagem	42
4	APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO DA TRAJETÓRIA COM CONTROLE DE INTERVALOS	45
4.1	APLICAÇÃO COM CONTROLE PROPORCIONAL DE INTERVALOS	45
4.2	APLICAÇÃO COM CONTROLE PREDITIVO DE INTERVALOS .	46

4.3	MODELO INTEGRADO DE CONTROLE DE INTERVALOS E DE TRAJETÓRIAS	50
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	53
5.1	TESTES DA APLICAÇÃO COM CONTROLE PROPORCIONAL DE INTERVALOS	53
5.1.1	Cenário de simulação	53
5.1.2	Estratégias simuladas	54
5.1.3	Síntese dos Resultados	55
5.1.4	Detalhamento dos Resultados de Simulação	55
5.2	TESTES DA APLICAÇÃO COM CONTROLE PREDITIVO DE INTERVALOS	59
5.2.1	Cenário de simulação	59
5.2.2	Estratégias simuladas	60
5.2.3	Síntese dos resultados	61
5.2.4	Detalhamento dos Resultados de Simulação	61
5.2.5	Discussão dos resultados do simulador próprio em relação aos resultados do simulador comercial	67
5.2.6	Variação de ganho proporcional e horizonte de predição	68
5.2.7	Variação do ajuste semafórico máximo	70
5.3	TESTE DO MODELO INTEGRADO DE CONTROLE DE INTERVALOS E DE TRAJETÓRIAS	73
6	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A – MODELAGEM DA LINHA 800 EM SIMULADOR COMERCIAL	89
A.1	AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	89
A.2	VALIDAÇÃO DA LINHA SIMULADA	89
	APÊNDICE B – AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE INTERVALOS ENTRE ÔNIBUS	93
B.1	INTRODUÇÃO AO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO	93
B.2	DADOS DE ENTRADA	94
B.2.1	Parâmetros do cenário e do simulador	96
B.2.2	Tempos de viagem	97
B.2.3	Demanda de embarque e desembarque	98
B.2.4	Fases semafóricas	98
B.2.5	Estado inicial	98
B.3	TEMPO DE PARADA NA ESTAÇÃO	99
B.4	TRAJETÓRIA DO ÔNIBUS NO SEGMENTO	102

B.5	TESTE DO SIMULADOR	105
-----	------------------------------	-----

1 INTRODUÇÃO

Dentre os vários modos de transporte público urbano, destacam-se o metrô, o veículo leve sobre trilhos (VLT) e o ônibus. Este último apresenta características de alta flexibilidade e baixo custo de implantação e manutenção quando comparado aos dois primeiros em que o transporte ocorre sobre trilhos (HENSHER, 2007).

Na ótica do controle da operação de sistemas de transporte público, os sistemas que funcionam em superfície (ônibus e VLT) são mais desafiadores do que sistemas subterrâneos (metrô) devido às perturbações causadas pelo compartilhamento do espaço com outros veículos (DESAULNIERS; HICKMAN, 2007). Por conta dessas perturbações e as flutuações nos tempos de embarque e desembarque de usuários, tais sistemas têm dificuldade em manter a operação conforme planejado. A falta de regularidade aumenta o tempo de espera dos usuários nas estações e causa carregamento irregular dos veículos, deixando assentos livres em ônibus adiantados enquanto pessoas viajam em pé nos ônibus atrasados (HICKMAN, 2001).

Em sistemas do tipo BRT (*Bus Rapid Transit*) são utilizados ônibus de alta capacidade que operam em corredores exclusivos com plataformas de pré-embarque de usuários (WRIGHT; HOOK, 2007). Estes sistemas estão igualmente sujeitos ao problema da instabilidade, pois os veículos têm velocidades diferentes de acordo com cada condutor, encontram semáforos pelo caminho, enfrentam flutuações nos tempos de embarque e sofrem consequências agravadas por operarem com alta frequência de serviço (DELGADO *et al.*, 2009).

Neste trabalho são estudados métodos de controle de sistemas de ônibus de alta frequência. O controle é aplicado em tempo real em cada ônibus individualmente, ajustando seu tempo de viagem, utilizando informações de estado da operação de todo o sistema em tempo real, e com o objetivo de regularizar os intervalos entre ônibus da mesma linha.

1.1 VEÍCULOS AUTOMATIZADOS E O FUTURO DO TRANSPORTE COLETIVO

As grandes fabricantes de veículos e muitas empresas de tecnologia estão dedicando volumosos recursos no desenvolvimento de veículos auto-dirigidos (condução automática), que mudarão a forma como nos transportamos nas cidades (EFRATI, 2019). Uma análise de possíveis cenários futuros que afetam tanto o transporte individual quanto o coletivo se faz necessária para planejar este trabalho com o intuito de fazê-lo apropriado para implementações práticas consistentes.

A condução automática de veículos pode ser classificada em seis níveis de acordo com a taxonomia SAE J3016 (SAE, 2014). O nível 0 corresponde a nenhuma automação e os níveis seguintes indicam um crescente nível de condução independente. A maior parte dos veículos modernos já contam com nível 1 de automação, por oferecerem controle de cruzeiro ou de manutenção de faixa. Veículos de nível 4 (alta automação) podem substituir

os motoristas completamente, mas apenas em modos de direção e em ambientes específicos. Veículos de nível 5 (automação completa) podem dirigir sozinhos em qualquer lugar e sob qualquer condição que um motorista humano também fosse capaz de conduzir. Estes são os veículos que cativam a imaginação pública de um serviço de transporte totalmente automático. Por conveniência, os veículos com condução automatizada serão chamados de veículos automatizados.

A disponibilidade comercial de veículos com nível 4 de automação já vem iniciando um processo de mudança na operação de sistemas de ônibus (SHLADOVER, 2018; WALKER, 2022). Ônibus automatizados reduziriam o custo de operação do sistema e tornariam a viagem mais segura e confortável para os usuários. Os ônibus continuariam sendo uma boa solução para cidades altamente adensadas, e se tornariam ainda mais baratos do que sistemas sobre trilhos. O controle da operação destes sistemas seria aplicado mais facilmente por se tratar de comandos passados diretamente aos ônibus, sem intermédio de motoristas (YOSSI, 2016).

A popularização de veículos com nível 4 e 5 de automação trará impactos drásticos no transporte urbano, facilitando o compartilhamento de veículos, e desacoplando a localização dos estacionamentos e dos destinos dos usuários (SHLADOVER, 2018). Quanto ao tráfego, aliar a tecnologia de comunicação entre veículos com a automatização da condução, implica em uma capacidade de reagir a informações para além do seu entorno imediato, amortecendo ondas de choque no tráfego e permitindo a operação mais eficiente de interseções, causando aumento substancial na capacidade das vias.

Um cenário onde quase a totalidade dos veículos em circulação são automatizados e cooperativos, previsto para ocorrer em partes do mundo dentro de duas décadas (MUNSTER, 2016; LITMAN, 2020), será também palco de um grande aumento no compartilhamento de veículos, convertendo a maioria dos deslocamentos urbanos para transporte público. Mas transporte público não significa transporte coletivo. A previsão é de grande crescimento na demanda por transportes públicos individuais, por meio de aplicativos como Uber e Lyft (MUNSTER, 2016), enquanto que o futuro do transporte coletivo permanece sendo tema de debates (WALKER, 2017).

Figuras públicas influentes defendem que o aumento na capacidade das vias causado pela completa adoção de carros automatizados e cooperativos será suficiente para acomodar toda a demanda por transporte em veículos individuais (SHELLEY, 2016; MARSHALL, 2017). Porém, profissionais de transportes apontam que em cidades densas, o transporte de grandes massas continuará sendo feito de forma mais eficiente por linhas de transporte coletivo de alta capacidade, como BRT ou metrô (WALKER, 2012; LORO, 2014; TRANSLOC, 2012).

Com o avanço destas novas tecnologias automotivas, um provável cenário será a substituição do ônibus convencional por veículos menores atendendo sob demanda nas periferias, onde há mais disponibilidade de espaço viário e o destino das viagens é bastante

disperso, enquanto seriam mantidos e inovados os sistemas de transporte coletivo de alta capacidade nos grandes centros urbanos (TRANSLOC, 2012). Neste cenário, uma solução que integra os transportes públicos individuais e coletivos seria a utilização de veículos de alta capacidade para transportar pessoas nos corredores viários centrais, e a utilização de veículos de baixa capacidade para transporte destas pessoas a partir de estações nos eixos centrais rumo aos seus destinos finais.

Com base nesta previsão de diminuição de demanda por transporte coletivo em regiões menos adensadas, e a crescente demanda por transporte coletivo em regiões mais adensadas, o presente trabalho justifica o enfoque que será dado em desenvolver estratégias de controle da operação de sistemas de ônibus de alta frequência.

Novas estratégias para operação do tráfego nestes cenários futuros estão sendo desenvolvidos considerando a extinção de semáforos no meio urbano. A negociação ocorreria entre os veículos e a infraestrutura, com garantia de atraso praticamente nulo, sem comprometer a segurança dos usuários (MÜLLER; CARLSON; KRAUS, 2016). Para controle dos ônibus, uma malha viária sem atraso nas interseções implicaria em menor perturbação e conseqüentemente ações de controle mais brandas. Neste trabalho serão propostas soluções de controle que considerem a presença de semáforos, pensando em implementações anteriores à completa adoção dos veículos automatizados e cooperativos.

1.2 CONTROLE DA OPERAÇÃO DE ÔNIBUS

Em um sistema de transporte público a confiabilidade do serviço é um dos atributos mais importantes do ponto de vista dos seus usuários (BALCOMBE *et al.*, 2004). Problemas de confiabilidade são caracterizados pela degradação do desempenho do sistema causada por: incertezas no ambiente de operação, falta de dados adequados para planejamento da operação, projeto inadequado do serviço, falta de monitoramento e controle do sistema, e falha na manutenção do horário planejado (CEDER, 2007).

A manutenção de um horário regular é um fator importante na operação de um sistema de transporte público confiável. O primeiro trabalho a tratar da dificuldade de um serviço de ônibus manter os horários programados, realizado por Newell e Potts (1964), demonstra por meio de uma formulação analítica a tendência natural dos ônibus se desviarem dos horários planejados. Considera-se um pequeno atraso inicial do primeiro ônibus em uma estação, que o atrasa em relação ao horário programado. Na estação seguinte, um número de usuários maior do que o usual terá chegado à estação e levará mais tempo que o usual para embarque. Desta forma, este ônibus se atrasa ainda mais, e assim, o pequeno atraso original é gradualmente amplificado ao longo do itinerário. O ônibus que vem atrás deste, por outro lado, encontra menos usuários em cada estação, fazendo-o se adiantar progressivamente. Por conseqüência o ônibus seguinte se atrasa e assim por diante, de forma que há sempre a tendência de desvio do horário ou do intervalo planejado. Esta irregularidade entre os intervalos dos ônibus provoca o efeito de comboiamento de

ônibus operando na mesma linha (*bunching*, em inglês). Dada a natureza deste efeito, ele ocorre independentemente dos ônibus serem conduzidos por motoristas humanos ou não.

Intervalos irregulares entre os ônibus geram ocupações irregulares dos veículos e longos tempos de espera na estação. Os ônibus atrasados tendem a ficar sobrecarregados de usuários, os quais enfrentam longos tempos de viagem em situações desconfortáveis e longos tempos de espera na estação, enquanto os ônibus adiantados circulam com assentos livres. Portanto, se o serviço for regularizado, são esperados carregamentos e tempos de viagens mais uniformes.

Diante da tendência natural dos ônibus se desviarem do intervalo planejado ao longo da operação, apenas o planejamento prévio de intervalos não é suficiente; são necessárias estratégias de controle em tempo real para operação mais eficiente do sistema. Na nomenclatura deste trabalho define-se por “estratégia” todo o esquema utilizado para controle da operação, por “método” a formulação específica para cálculo da ação de controle, e por “atuação” a forma de aplicação dos ajustes calculados aos ônibus.

Historicamente, as propostas de métodos de controle de intervalos entre ônibus apresentam o cálculo da ação de controle atrelado à atuação de controle. Tipicamente, o cálculo fornece um tempo de ajuste (ou de regulagem) de cada ônibus em cada ponto ou região de controle, enquanto que a atuação define o meio utilizado para impor a ação de controle.

A atuação de controle mais utilizada para regularizar os intervalos é a retenção dos ônibus adiantados nas estações de embarque de usuários (OSUNA; NEWELL, 1972). Nela, o tempo de regulagem, obtido por um cálculo que observa os intervalos entre os ônibus do sistema, é passado para cada ônibus como um tempo a mais que estes devem ficar parados, tipicamente em estações, ao fim do processo de embarque e desembarque. Outras atuações utilizadas são o controle de velocidade dos ônibus (DAGANZO; PILACHOWSKI, 2011), e o controle de interseções semaforizadas (MCLEOD, 1998). Enquanto a retenção só pode atrasar os ônibus adiantados, o controle de velocidade e controle de interseções semaforizadas são capazes de adiantar e atrasar os ônibus.

1.3 OBJETIVOS

Neste trabalho propõe-se pensar a estratégia de controle de intervalos entre ônibus separadamente: o cálculo do tempo de regulagem e a atuação desta regulagem. O cálculo do tempo de regulagem tem sido tema de diversos trabalhos nesta área, e atualmente temos soluções, das mais simples às mais complexas, capazes de determinar quanto tempo cada ônibus deve ser atrasado ou adiantado para que a regularidade da operação seja retomada. Esses métodos podem também ser classificados de acordo com o seu objetivo, pois cada um possui um conceito do que seja uma “operação ideal”. Entretanto, pouco se avançou até o presente em estratégias que combinem diferentes atuações de controle para implementar o tempo de regulagem calculado.

Sendo assim, este trabalho tem o objetivo de avançar o estado da arte no campo da atuação de controle para regularização dos intervalos entre ônibus, permitindo a integração entre a atuação do tempo de regulagem e qualquer método de cálculo deste; e que a atuação ocorra de forma combinada entre retenção nas estações, controle de velocidade e controle de interseções semaforizadas.

Ao considerar combinadamente as atuações de retenção nas estações, controle de velocidade e controle de interseções semaforizadas, define-se um novo problema: como combinar as atuações de controle para que a regulagem da operação ocorra de forma ideal. E ainda, por “ideal”, cabem diferentes interpretações: de forma a regularizar os intervalos entre ônibus com total precisão; de forma a minimizar o tempo de viagem dos usuários ou causar o menor desconforto a eles; de forma a causar menor interrupção no tráfego em geral; etc.

Por fim, o uso combinado de diferentes atuações de controle implica no problema de geração de trajetórias para os ônibus a fim de cumprir a regulagem na operação. Define-se como trajetória o perfil de velocidade de um ônibus em um segmento entre duas estações. Este perfil consiste em tempo parado na estação de partida (retenção), tempo de viagem quando em movimento no segmento (controle de velocidade), e tempo parado em cada semáforo existente no segmento (controle de interseções semaforizadas).

O sucesso desta abordagem existe fundamentalmente por controlar fatores de tráfego que, quando não controlados, causam perturbações à operação do sistema; desta forma, ações de controle mais brandas são suficientes para manter os ônibus operando de forma regular.

Pontuadamente, os principais objetivos deste trabalho são:

- Formular um modelo matemático para otimização de trajetória de ônibus levando em consideração a possibilidade de retenção nas estações, controle de velocidade dos ônibus e ajuste de tempos semaforicos nas interseções a ser aplicado para regularização de intervalos entre ônibus;
- Alcançar a maior independência possível do modelo de otimização de trajetória, permitindo a aplicação com diferentes métodos de cálculo de tempo de regulagem;
- Concluir sobre o desempenho do modelo de otimização de trajetória submetido à aplicações com diferentes métodos de cálculo de tempo de regulagem, e à diferentes cenários urbanos.

1.4 MÉTODO

Com o conhecimento adquirido ao longo do trabalho de mestrado do autor sobre métodos de cálculo de tempo de regulagem (ZIMMERMANN *et al.*, 2016), iniciou-se esse trabalho com a hipótese de que tais regulagens seriam empregadas mais eficientemente

se toda a trajetória do ônibus fosse controlada com o mesmo objetivo. O primeiro passo se deu com a formulação do modelo de otimização de trajetória (ZIMMERMANN, 2018), sendo finalizado antes da publicação dos dois outros trabalhos que também propõem a combinação de atuações através de um controle de trajetória para regularização de intervalos (LASKARIS; SEREDYNSKI; VITI, 2020; BIE *et al.*, 2020).

Para realização de testes foi preciso desenvolver estratégias que aplicam o modelo de otimização de trajetória com métodos de cálculo de tempo de regulação já publicados e validados na literatura. As aplicações se deram progressivamente, da mais simples até a mais complexa. Primeiramente com um método de cálculo baseado em controle proporcional, depois com um método baseado em controle preditivo, e por último a integração com o controle preditivo em um único modelo.

Os resultados dos experimentos por simulação computacional foram obtidos paralelamente ao processo de aplicação do modelo de otimização de trajetória. Primeiramente, em simulador comercial, que já era de domínio do autor por conta de seu trabalho de mestrado, foi testada a aplicação do modelo de otimização de trajetória com o método de cálculo de tempo de regulação baseado em controle proporcional. Conclui-se nesse experimento que estudos mais completos e execuções mais eficientes seriam obtidas com um simulador dedicado exclusivamente a este problema. Então um simulador próprio foi desenvolvido, e veio a servir de plataforma para todos os demais experimentos propostos no trabalho.

A execução da estratégia mais complexa, o modelo integrado de controle de intervalos e de trajetórias, apresentou desafios não previstos no planejamento do trabalho. Os resultados deste modelo se mostraram promissores, mas a sua complexidade computacional o impedia de ser testado em instâncias suficientemente grandes para comparação direta com as demais estratégias de controle estudadas. Esforços foram empregados para melhorar a eficiência na busca da solução desta otimização, permitindo o teste de instâncias maiores, o que levou a observação de resultados ainda mais promissores. Até a conclusão deste trabalho, instâncias suficientemente grandes para embasar conclusões definitivas sobre o desempenho não puderam ser executadas, deixando em aberto questões de avaliação dessa vertente do método geral.

1.5 ORGANIZAÇÃO E DELIMITAÇÃO DO ESCOPO

Esta tese estuda estratégias de controle de intervalos entre ônibus baseadas na atuação por retenção, controle de velocidade, e prioridade semaforica. O Capítulo 2 fornece revisões bibliográficas separadas por tipo de atuação, todas apresentando os trabalhos em ordem histórica. O capítulo finaliza com uma revisão de trabalhos recentes que, assim como esse, propõem atuações combinadas.

O Capítulo 3 formula o modelo para otimização de trajetória a ser utilizado para controle de intervalos entre ônibus, baseado na minimização de uma função multiobje-

tivos. É considerada uma única linha de ônibus, operando em faixa exclusiva. Em cada segmento que se aplica a otimização de trajetória todos os semáforos permitem atuação dos ônibus sobre os tempos semaforicos; e filas não são consideradas. Como entrada, o modelo demanda um instante alvo para chegada ao fim do segmento, e como saída fornece os tempos para cada atuador.

O Capítulo 4 detalha dois métodos de cálculo de controle de intervalos obtidos da literatura, ambos capazes de fornecer o instante alvo de chegada para o modelo de otimização de trajetória. Um deles baseado em controle proporcional e o outro baseado em controle preditivo. Ao fim do capítulo, é apresentada uma integração do modelo de controle preditivo de intervalos com o modelo de otimização de trajetória.

O Capítulo 5 apresenta os resultados de testes de simulação das três principais estratégias de controle apresentadas no trabalho: o controle realimentado de intervalos aplicado com otimização de trajetória, o controle preditivo de intervalos aplicado com otimização de trajetória, e o controle integrado de intervalos e trajetórias. A primeira estratégia é confrontada com outras duas que utilizam o mesmo controle realimentado de intervalos, porém aplicados com atuação só por retenção, e por retenção e prioridade semaforica, em uma linha de ônibus real, implementada em um simulador comercial. Posteriormente, em um simulador próprio, o controle preditivo de intervalos aplicado com otimização de trajetória é confrontado com os demais, onde são aprofundadas as discussões sobre o controle da operação de linhas de ônibus. Por fim, os resultados do modelo integrado de intervalos e trajetória são apresentados, obtidos também no simulador próprio, e discutidos a parte devido o impedimento de parametrizá-lo em configurações ideais, sendo essas, limitadas pelo tempo de execução dada a complexidade do modelo.

O Capítulo 6 ressalta os principais resultados encontrados nos testes de simulação e as principais características do modelo para otimização de trajetória, e do ambiente de simulação desenvolvidos. Por fim, apresenta a visão do autor em relação a trabalhos que devem ser desenvolvidos futuramente tanto para melhoria da solução proposta quanto pra viabilidade de implementação desta em ambientes urbanos.

1.6 PUBLICAÇÕES GERADAS

A primeira parte de desenvolvimento deste trabalho, apresentada no Capítulo 3, bem como os experimentos apresentados na Seção 5.1, estão publicados na forma de artigo por Zimmermann *et al.* (2021). Concomitantemente, o autor participou no desenvolvimento de outras estratégias de controle de intervalos entre ônibus: controle realimentado com ganho variável de acordo com o número de usuários embarcados (LIMA *et al.*, 2021); estratégia de auto-sequenciamento dos ônibus para uso em controladores de intervalo que permitam ultrapassagem, inserção ou remoção de veículos ao longo do itinerário (SEMAN *et al.*, 2022); e generalização do controle preditivo de intervalos baseado em retenção para múltiplas linhas concorrendo no mesmo corredor de ônibus (SEMAN *et al.*, 2020).

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

O controle para regularização da operação pode ter diferentes objetivos. Linhas de baixa frequência costumam ser operadas com quadros de horários que embutem tempos de folga (*slack*); nestas, o controle é aplicado com o objetivo de manter a saída dos ônibus das estações nos horários preestabelecidos. Para linhas que operam com alta frequência de serviço, o controle de intervalo é mais indicado, com o objetivo de regularizar o serviço na forma de chegadas uniformemente espaçadas às estações, dispensando a necessidade de quadro de horários (BARNETT, 1974).

Para definir se uma linha de ônibus deve operar por quadro de horários ou por intervalos, é preciso caracterizar o comportamento dos usuários em relação aos intervalos de chegadas de ônibus às estações. Tipicamente, um intervalo de 6 a 8 minutos marca a transição de comportamentos (LUETHI; WEIDMANN; NASH, 2007; SEDDON; DAY, 1974; WEBER, 1966); portanto, linhas que operam com intervalos maiores que este são ditas de baixa frequência (implicando na definição de quadros de horários) e as que operam com intervalos menores que este são de alta frequência. Esta transição é definida quando o padrão de chegada de usuários deixa de ser aleatório (alta frequência de serviço) e passa a ser influenciado pelo instante previsto de chegada do ônibus (baixa frequência de serviço). Neste trabalho serão considerados métodos de controle de intervalos, haja visto que serão consideradas linhas de ônibus de alta frequência.

É ressaltado por Luethi, Weidmann e Nash (2007) que o intervalo de transição entre comportamentos varia com a confiabilidade do serviço, que é conhecida pelos usuários regulares, os quais tomam suas decisões de chegada de acordo com este conhecimento prévio. Portanto, quanto mais confiável o sistema, menos aleatório é o processo de chegada de usuários às estações. Importante ressaltar também que o uso de estratégias de controle para manutenção do quadro de horários aumenta a confiabilidade do sistema, induzindo assim um padrão de chegada de usuários mais dependente dos instantes de chegada dos ônibus (STRATHMAN; HOPPER, 1993).

2.1 INTERVALOS CONTROLADOS POR RETENÇÃO

Para regularizar os intervalos entre os ônibus, uma das estratégias de controle mais utilizadas envolve a atuação por retenção dos ônibus que estão à frente do horário. Esta retenção provoca uma melhora do serviço por diminuir o atraso incremental enfrentado por aqueles ônibus que estão atrasados, como demonstrado pelo modelo proposto por Newell e Potts (1964). Tipicamente, a retenção é aplicada mesmo em sistemas operando sem uma estratégia de controle definida, através do julgamento empírico de motoristas ou supervisores (HICKMAN, 2001). Entretanto, a retenção invariavelmente causa o aumento no tempo de viagem dos usuários embarcados nos ônibus retidos. Portanto, é necessário que a decisão de qual ônibus reter, em qual ponto e por quanto tempo seja tomada de

forma cuidadosa.

Trabalhos pioneiros no desenvolvimento de cálculos de controle da operação baseado em retenção dos ônibus trabalham com um método intitulado retenção por tempo limite (*threshold-based holding*) (ZOLFAGHARI; AZIZI; JABER, 2004), que consiste em identificar um certo valor, dito valor limite, em um ponto de controle em particular. Se o intervalo observado entre um ônibus que chega neste ponto em relação ao ônibus da frente é inferior ao valor limite, então o ônibus que está no ponto de controle é retido até que o intervalo atinja o valor limite. Se o intervalo observado é maior que o valor limite então o ônibus não é retido (ABKOWITZ; TOZZI, 1986). O ponto de controle pode ser uma estação de embarque ou qualquer outro ponto pré-definido no itinerário.

As principais contribuições dessa primeira geração de controle da operação são resumidas por Strathman *et al.* (2001) como segue:

- A retenção impõe custos aos usuários a bordo dos ônibus na forma de aumento do tempo de viagem.
- A retenção impõe custos aos operadores na forma de aumento do tempo de circulação dos ônibus.
- A seleção de pontos de controle apropriados é crucial para minimização dos tempos de espera na estação e a bordo.
- A retenção é mais eficaz se aplicada quando o carregamento dos ônibus é baixo e a demanda imediatamente após este ponto é alta.
- A retenção é mais eficaz em reduzir tempos de espera nas estações imediatamente à frente do ponto de controle.
- Desvios de intervalo voltam a crescer após a ação de controle.
- A retenção pode se mostrar prejudicial à operação em certas situações.

Turnquist (1982) apresenta um método intitulado “Prefol” que difere do método baseado no valor limite por considerar tanto o intervalo para o ônibus à frente como o intervalo para o ônibus de trás, e não depende de um valor de intervalo planejado. A ação deste controle consiste em reter um ônibus até que o intervalo para o ônibus da frente esteja o mais próximo possível do intervalo para o ônibus de trás. Esse método é comparado por meio de simulação com outro método de controle que age baseado apenas no intervalo para o ônibus da frente, similar ao método do valor limite. A conclusão do autor é que quando a operação se dá com intervalos altamente correlacionados, isto é, o adiantamento de um ônibus é a causa do atraso do ônibus seguinte, como no modelo simplificado de Newell e Potts (1964), ambas as soluções são eficazes. Conforme os intervalos estão menos correlacionados devido à perturbações frequentes no sistema, a eficácia destas soluções é menor; entretanto nestes casos o controle Prefol desempenha melhor do que o controle que age baseado apenas no intervalo em relação ao ônibus à frente.

O surgimento de tecnologias como a localização automática de veículos e a contagem automática de usuários facilitaram o desenvolvimento de sistemas computacionais de suporte à decisão em tempo real, por permitirem o acesso instantâneo às informações como velocidade, posição e carregamento dos ônibus. Eberlein, Wilson e Bernstein (1999) apresentaram proposta pioneira com rotinas de tempo real para regularização de sistemas de transporte público.

Xuan, Argote-Cabanero e Daganzo (2011) apresentaram um método de controle por retenção para regularizar o intervalo entre ônibus, baseando-se na existência de um quadro de horários virtual. A solução proposta foi comparada pelos autores com outras soluções de controle de intervalo da literatura. Os testes da simulação foram realizados em um cenário no qual a demanda é constante ao longo do itinerário. Os resultados demonstram que para este padrão de demanda o desempenho das leis de controle independe da escolha dos pontos de retenção, exceto no caso de método de controle tradicional baseado em quadro de horários fixo que tem seu desempenho degradado significativamente com um número muito grande de pontos de controle.

Cats *et al.* (2011) testaram três soluções diferentes de controle por retenção por meio de simulações de uma linha de ônibus real com demanda conhecida. Um dos métodos se baseia na manutenção do quadro de horários, um segundo método busca manter o intervalo regular em relação ao ônibus da frente, semelhante ao método do valor limite, e o terceiro busca regularizar os intervalos em relação aos ônibus de trás e da frente, semelhante ao método Prefol. O método que se mostra mais promissor de acordo com os resultados é aquele que busca regularizar os intervalos em relação ao ônibus de trás e da frente.

Ainda na primeira geração de métodos de controle do intervalo entre ônibus, Osuna e Newell (1972) e Barnett (1974) buscavam minimizar os tempos de espera dos usuários. Por limitações tecnológicas as otimizações eram executadas antes da operação ocorrer, no intuito de gerar parâmetros fixos para o controle dos ônibus durante a operação. Porém, caso a operação divergisse daquilo que foi estimado previamente, não havia possibilidade de corrigir estes parâmetros em tempo real.

Com ferramentas que informam o estado da operação em tempo real e o aumento da capacidade de processamento dos computadores, surgiram cálculos mais complexos para controle de intervalo por retenção. A programação matemática passou a ser aplicada em tempo real, determinando tempos de retenção dinamicamente conforme as informações sobre a operação são atualizadas, com o objetivo de minimizar o tempo de espera dos usuários do sistema. De modo geral, os modelos buscam minimizar a espera dos usuários tanto na estação quanto embarcado, tendo o tempo de retenção como variável de decisão, e se valendo de previsões futuras do número de usuários que embarcam e desembarcam em estações a jusante (HICKMAN, 2001; DELGADO *et al.*, 2009; KOEHLER; KRAUS; CAMPONOVARA, 2011).

Koehler, Kraus e Camponogara (2011) utilizaram um modelo determinístico para calcular os tempos de retenção aplicáveis em múltiplos pontos de um itinerário de ônibus. Assume-se que estão disponíveis informações em tempo real e dados históricos do sistema. O objetivo foi minimizar o tempo de espera dos usuários na estação e embarcado, o qual foi modelado por uma função objetivo não convexa e restrições não lineares. Para solucionar o problema em tempo real foi proposto um procedimento iterativo de programação quadrática.

Em relação à terminologia, a denominação do controle em tempo real por retenção baseado em programação matemática como “controle preditivo” é relativamente recente (CORTÉS *et al.*, 2010; ZIMMERMANN *et al.*, 2016). A escolha da denominação está de acordo com a essência do controle preditivo baseado em modelo que é a otimização do comportamento futuro de um processo com respeito a valores futuros estimados (NUNEZ; SÁEZ; CORTÉS, 2012).

Todos os trabalhos citados nesta seção apresentam e/ou testaram soluções para regularização de intervalos, no qual o tempo de regulagem calculado é aplicado aos ônibus através da atuação por retenção. Sendo assim, o presente trabalho inicia seu desenvolvimento propondo que todo o esforço empenhado em décadas de evolução do controle por retenção possa ser aproveitado mesmo quando consideradas atuações de controle de intervalos mais modernas.

Os diferentes métodos já desenvolvidos podem fornecer a informação primária, que é o tempo de regulagem a ser aplicado à cada ônibus, e uma estratégia de atuação mais eficiente que a simples retenção de ônibus atrasados se encarregaria de implementar esta regulagem. Todos os métodos citados nesta seção fornecem apenas tempo de regulagem positivo para os ônibus, dada a limitação da atuação por retenção. Entretanto, todos eles podem ser facilmente adaptados para fornecer também um tempo de regulagem negativo, que dependeria de atuações de adiantamento dos ônibus para ser aplicado.

Novas formas de atuação de controle surgiram em décadas mais recentes por dependerem de sistemas de comunicação e controle mais sofisticados. O controle por velocidade é normalmente feito através da informação de velocidade transmitida em tempo real de uma central de controle para o painel do ônibus (ARGOTE-CABANERO; DAGANZO; LYNN, 2015), enquanto a atuação do ônibus sobre os tempos semafóricos depende de controladores semafóricos mais modernos.

2.2 INTERVALOS CONTROLADOS POR VELOCIDADE

Apesar de ser uma atuação mais comum para controle de veículos que operam sobre trilhos, alguns trabalhos já foram desenvolvidos focados no uso exclusivo de controle de velocidade para regulagem de intervalos entre ônibus.

Ampountolas e Kring (2020) utilizam a modelagem de *car-following* aplicada a ônibus, em um esquema líder-seguidor, onde o ônibus seguidor tem sua velocidade con-

trolada através de informações de estado do ônibus líder. Este esquema é replicado de forma sobreposta, onde cada ônibus é seguidor de outro que vai a sua frente e também é ônibus líder de outro que vem atrás, obtendo assim a regularidade de intervalos para todo o sistema. O objetivo do controle é semelhante ao do método do valor limite, onde um intervalo pré-definido para o ônibus líder é almejado no controle de velocidade do ônibus seguidor.

Outro trabalho também se baseia em um método clássico do controle por retenção, o Prefol, que busca regularizar os intervalos em relação aos ônibus de trás e da frente, mas faz isso utilizando controle de velocidade (DAGANZO; PILACHOWSKI, 2011). Este método se mostrou mais eficiente em manter os desvios regulares e ainda manter a velocidade comercial mais alta, quando comparado ao método apresentado por Daganzo (2009).

Na literatura encontram-se vantagens e desvantagens de aplicar o tempo de regulação na forma de retenção ou na forma de controle de velocidade. Entretanto, nenhum trabalho que se dedique exclusivamente à comparação destas atuações foi encontrado. Das vantagens das atuações de retenção sobre as atuações de controle de velocidade cita-se: a possibilidade dos usuários embarcarem e desembarcarem se a retenção for feita em uma estação com as portas abertas (KOEHLER; KRAUS; CAMPONOGARA, 2011); e a possibilidade de ser ultrapassado por outros veículos no caso típico do corredor de ônibus possuir faixa dupla apenas nas estações (WRIGHT; HOOK, 2007). Das desvantagens cita-se: o maior custo para os usuários embarcados, que se importunam mais com o tempo que o ônibus passa parado do que com o tempo que passa em movimento (CARREL *et al.*, 2016); e a falta de complacência dos motoristas, que comumente descumprem total ou parcialmente os tempos de retenção (PHILLIPS *et al.*, 2015).

2.3 INTERVALOS CONTROLADOS POR SEMÁFOROS

Independente da atuação por retenção, por velocidade, ou ambos, o desempenho do controle pode ser prejudicado se as interseções ao longo do itinerário do ônibus não forem controladas combinadamente com o controle de intervalos entre os ônibus. Nesses casos, a prioridade semaforica para transporte coletivo público (*Transit Signal Priority - TSP*) é uma atuação que pode melhorar a regularidade do serviço. Interseções semaforizadas podem ser usadas para controlar os intervalos entre ônibus por meio do controle de prioridade condicional (*Conditional Signal Priority - CSP*) (MCLEOD, 1998; HOUNSELL; SHRESTHA, 2012; CHOW; LI; ZHONG, 2017; ANDERSON; DAGANZO, 2019), que usa o semáforo para adiantar ônibus atrasados ao invés de conceder sinal verde para todos os ônibus. O CSP baseado no controle de intervalos causa um atraso substancialmente menor ao tráfego geral, comparado com o TSP incondicional (FURTH; MULLER, 2000).

O método clássico que busca regularizar os intervalos em relação aos ônibus de trás e da frente, desenvolvido para atuação por retenção e já replicado para atuação por velocidade é também replicado para atuação utilizando apenas CSP (HOUNSELL; SH-

RESTHA, 2012). Ao contrário das demais atuações, neste trabalho os autores consideram apenas a possibilidade de adiantamento de ônibus atrasado e nunca o atraso de ônibus adiantado.

Chow, Li e Zhong (2017) adotou o controle ótimo para regularizar os intervalos de ônibus com CSP. A função objetivo busca minimizar irregularidades de intervalos entre os ônibus e atrasos no restante do tráfego. O modelo otimiza os tempos semafóricos para toda a linha de ônibus, sendo capaz de atrasar ônibus adiantados e adiantar ônibus atrasados, sem controle de velocidade ou retenção nas estações.

No presente trabalho, quando a atuação semafórica ocorre através da otimização de trajetória ela é chamada Controle Semafórico (TSC, do inglês: *Transit Signal Control*) ao invés de TSP ou CSP, uma vez que o controle dos tempos semafóricos é capaz de priorizar ou atrasar os ônibus concedendo verde ou vermelho de acordo com a necessidade. Quando a atuação ocorre incondicionalmente e sem integração com o otimizador de trajetória, é chamada TSP.

2.4 INTERVALOS CONTROLADOS POR ATUAÇÕES COMBINADAS

A combinação das formas de atuação apresentadas anteriormente foi explorada de forma limitada em trabalhos anteriores. Um trabalho sobre retenção de ônibus (DELGADO *et al.*, 2009) foi estendido para incluir o controle CSP (DELGADO *et al.*, 2015). O controlador resultante é do tipo preditivo baseado em modelo e utiliza a retenção nas estações e a extensão de verde como variáveis de decisão de um problema de otimização para minimizar a espera total dos usuários. Outra abordagem consiste em um controle CSP para interseções isoladas que podem ser combinadas com qualquer controle de intervalos por retenção (ANDERSON; DAGANZO, 2019). No entanto, a abordagem resultante não gerencia os tempos de retenção e semafóricos simultaneamente. Em ambas as soluções propostas, o CSP perde controlabilidade devido à falta de controle de velocidade, principalmente se existir mais de um semáforo entre duas estações.

Em outro trabalho, foi realizada uma adaptação de um método de retenção para CSP (HOUNSELL; SHRESTHA, 2012) para combinar controle de velocidade e CSP (ESTRADA *et al.*, 2016). Neste caso, as estações são os pontos de controle onde são medidos os intervalos entre os ônibus, e a atuação do controle ocorre no segmento desde o ponto de controle atual até o próximo, ajustando as velocidades para regularizar os intervalos. O CSP é aplicado independentemente do controle de velocidade, e o cálculo desta atuação é executado para cada semáforo isoladamente sempre que um ônibus se aproxima do semáforo.

A combinação de retenção nas estações, controle de velocidade e informação dos estados dos semáforos foi proposta anteriormente para minimizar atrasos de ônibus, número de paradas e consumo de combustível, mas sem aplicar alguma forma de controle semafórico (WU *et al.*, 2016). Outra abordagem para a combinação de retenção nas estações, controle

de velocidade e CSP procurou minimizar um equilíbrio de atrasos de ônibus e ajustes semafóricos (WANG *et al.*, 2014). Ambos os trabalhos consideraram apenas um semáforo entre as estações e tinham o objetivo de regularizar os intervalos.

Outro trabalho (LASKARIS; SEREDYNSKI; VITI, 2020) combinou retenção em estações, controle de velocidade e CSP para regularizar intervalos e o fez com um método baseado em regras que decide ações de controle sequencialmente em vez de considerar todas as ações possíveis de forma integrada para encontrar a combinação ótima de atuação, como proposto nesse trabalho.

Outra abordagem combinando controle de velocidade e CSP (BIE *et al.*, 2020), é a única encontrada que utiliza o mesmo princípio de modelagem de trajetória apresentado neste trabalho: dividir os trechos entre estações em seções nas quais cada uma possui apenas um semáforo. Os autores formulam um modelo de otimização para correção de intervalos de uma estação para outra com o objetivo de minimizar desvios de intervalos e ajustes de semáforos. Entretanto, a formulação de um modelo de otimização simplificado impede que as atuações de controle de velocidade e controle semafórico ocorram de forma integrada, permitindo ações indesejadas, por exemplo: que os ônibus se apressem inadvertidamente para o sinal vermelho.

Outras formas de atuação não abordadas neste trabalho para controle de intervalos de sistemas de transporte público, como: *stop-skipping*, limite de embarque e *short turn*, também possuem relevância, e algumas delas também já foram utilizadas em estratégias combinadas (BUENO-CADENA; MUÑOZ, 2017; DELGADO *et al.*, 2009).

Na revisão da literatura não foram encontrados trabalhos que apresentassem uma estratégia desacoplada entre otimização de trajetória e o cálculo de regularização de intervalos. Este desacoplamento é importante por aumentar a liberdade dos operadores. Métodos de controle mais sofisticados requerem mais dados históricos e mais sensores nos ônibus, o que pode tornar o controle de intervalos inviável para operadores de transporte que não dispõem de tais tecnologias. Além disso, por uma questão de preferência, o operador pode desejar trabalhar com um método de regularização em detrimento de outro. O capítulo seguinte inicia apresentando a estrutura geral de controle do sistema de ônibus utilizada neste trabalho, onde é explicado o desacoplamento que existe entre o cálculo para regularização de intervalos e a otimização da trajetória.

3 OTIMIZAÇÃO DA TRAJETÓRIA

O uso combinado das atuações de retenção nas estações, controle de velocidade e controle de interseções semaforizadas para regularização de intervalos entre ônibus impõe o desafio de combinação destas atuações, que pode ser tratado como o problema de geração de trajetórias para os ônibus a fim de cumprir a regulagem na operação. O modelo para otimização da trajetória apresentado neste capítulo tem por objetivo transformar um tempo de regulagem recebido por um método de cálculo qualquer em prescrições específicas: tempo de retenção em estação, ajuste de tempos semafóricos, e velocidade do ônibus entre semáforos. Tais prescrições devem ser realizadas com base na otimização de certos critérios de desempenho.

A seção seguinte apresenta a estrutura básica para controle de intervalos de uma linha de ônibus. Posteriormente, o modelo para a trajetória do ônibus entre duas estações consecutivas é apresentado. Finalmente, os critérios desejados para a função objetivo são apresentados junto com a formulação matemática do problema de otimização da trajetória.

3.1 ESTRUTURA DE CONTROLE E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Considera-se uma linha de ônibus operando um itinerário em faixa exclusiva com múltiplos ônibus que percorrem o itinerário parando em estações para embarque e desembarque de usuários. A estrutura do sistema de controle de intervalos considerado está retratada na Figura 1. Assume-se que o bloco *Controlador de Intervalos* decide por um instante alvo de chegada para cada ônibus da linha na estação seguinte, seja explicitamente ou implicitamente, através de atraso desejado (e.g., retenção) e tempo de adiantamento. O foco deste capítulo é descrever o bloco *Otimizador de Trajetória*, que transforma o instante alvo de chegada de cada ônibus em atuação na forma de (i) tempo de retenção (bloco *Atuador de Retenção*), (ii) tempo de viagem em cada segmento (bloco *Atuador de Velocidade*), e (iii) Ajuste de tempos semafóricos (bloco *Controlador Semafórico*).

Define-se que um evento ocorre toda vez que é finalizado o processo de embarque e desembarque de um ônibus em uma estação (ver indicação “Pronto para Partir” na Figura 1). Na ocorrência de um novo evento, o Controlador de Intervalos fornece um instante alvo de chegada para o ônibus na estação seguinte. O problema consiste em, dado o instante alvo de chegada, obter o tempo de retenção, a velocidade, e os ajustes semafóricos para este ônibus no segmento de itinerário entre esta e a próxima estação que otimize certos critérios de desempenho. Portanto, o objetivo é definir a distribuição ótima das ações de controle entre três formas de atuação possíveis, e assim otimizar a trajetória de um ônibus em um segmento entre duas estações consecutivas.

A única informação recebida pelo bloco Otimizador de Trajetória do bloco Controlador de Intervalos é o instante alvo de chegada, que pode ser prontamente obtido de qualquer método de controle de intervalos projetado para trabalhar com a atuação

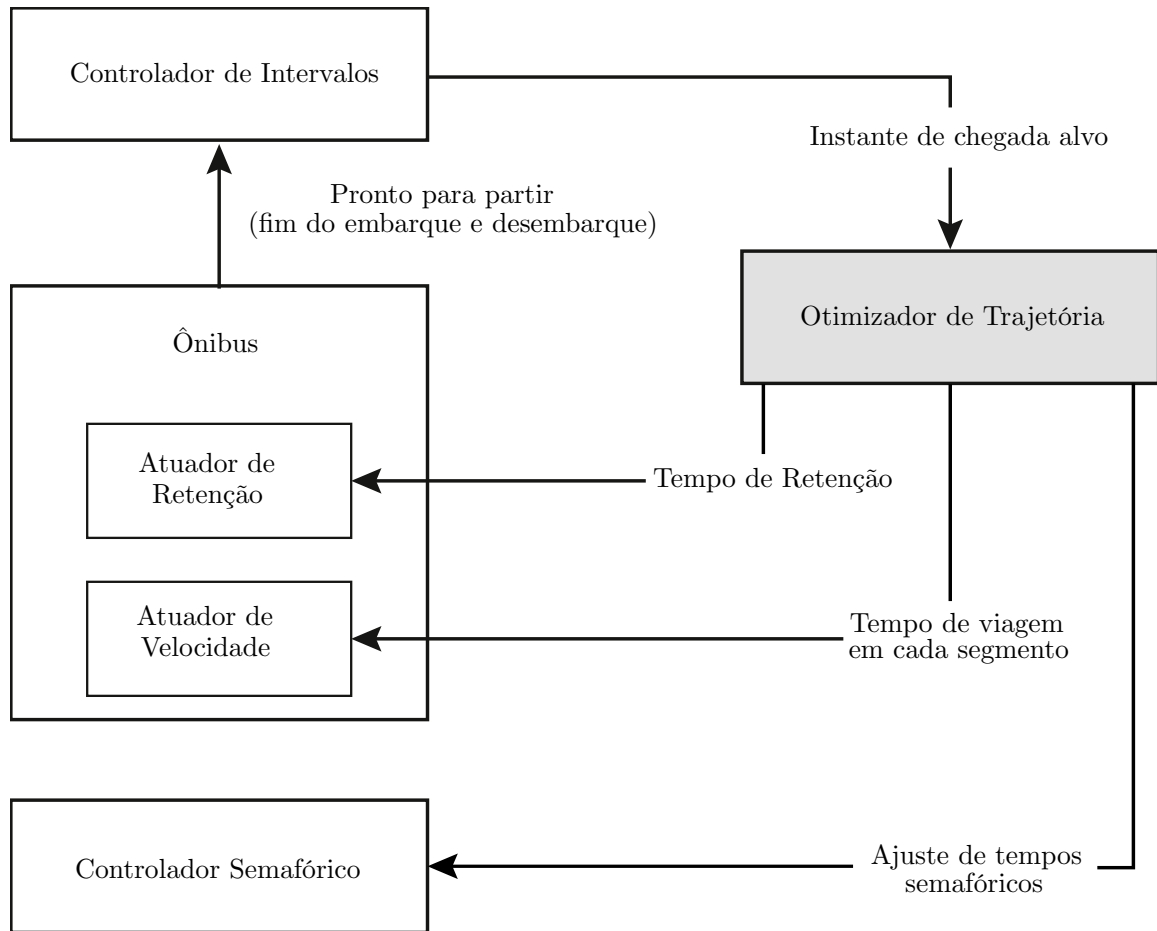


Figura 1 – Esquema do sistema de controle dos ônibus, no qual: “Otimizador de Trajetória” refere-se ao modelo apresentado neste capítulo; “Controlador de Intervalos” é o tomador de decisão referente ao intervalo a ser mantido entre os ônibus; “Ônibus” representa todos os ônibus no sistema, os quais são equipados com um atuador de velocidade e um atuador de retenção; “Controlador Semafórico” estão nos semáforos em cada interseção.

por retenção. Importante também ressaltar que, o bloco Controlador de Intervalos pode ser substituído por um bloco Controlador de Quadro de Horários, desde que forneça ao Otimizador de Trajetória um instante alvo de chegada para o ônibus na estação seguinte.

3.2 MODELO DE TRAJETÓRIA DO ÔNIBUS

A linha de ônibus a ser controlada opera com $|I|$ ônibus, indexados por ordem de partida (índice i), em que I é o conjunto de ônibus da linha. Este itinerário é composto por $|K|$ estações de embarque e desembarque numeradas em ordem crescente ao longo do itinerário (índice k), em que K é o conjunto das estações da linha. Na ocorrência de um evento, um ônibus i está prestes a partir de uma estação k , e o Controlador de Intervalos é acionado fornecendo o instante alvo de chegada $\hat{a}_{i,k+1}$ para este ônibus na estação seguinte $k+1$. O problema consiste em, dado $\hat{a}_{i,k+1}$, obter o tempo de retenção, a velocidade, e os

ajustes semafóricos para um ônibus i no segmento de itinerário entre as estações k e $k + 1$ que otimize certos critérios de desempenho. Portanto, o objetivo é definir a distribuição ótima das ações de controle entre três formas de atuação possíveis, e assim otimizar a trajetória de um ônibus em um segmento entre duas estações consecutivas.

Por considerar uma única linha de ônibus operando em faixa exclusiva, não existem filas de veículos e um modelo determinístico pode ser construído sem descaracterizar o problema real. Ainda, as variáveis que estão mais sujeitas às incertezas de um cenário não controlado, tempo de viagem e atraso dos ônibus nos semáforos, são reguladas pelo sistema de controle proposto, reduzindo assim a variabilidade que, por sua vez, reforça a precisão de um modelo determinístico. Todas as estações no itinerário da linha são consideradas pontos de controle com a possibilidade de retenção. Todos os semáforos que existirem ao longo do itinerário são controlados em tempo real e tem possibilidade de atuação do ônibus, e a velocidade dos ônibus pode ser controlada em todo o itinerário.

3.2.1 Elementos básicos de modelagem

Uma dada linha de ônibus com $|K|$ estações para embarque e desembarque de usuários pode ser dividida em $|K| - 1$ segmentos, cada um conectando duas estações consecutivas, como retratado na Figura 2(a). No segmento entre a estação k e a estação $k + 1$ existem $|S_k|$ semáforos, definidos pelo conjunto S_k . Este segmento é dividido em $|Y_k|$ seções, com Y_k o conjunto de seções: uma seção entre a estação k e a primeira interseção, uma seção entre cada duas interseções consecutivas, e uma seção entre a última interseção e a estação $k + 1$; portanto, $|S_k| = |Y_k| - 1$. Cada seção contém apenas uma interseção, sempre no seu fim, exceto pela última seção que não possui interseção.

Considere o diagrama espaço-tempo da Figura 2(b) para o mesmo segmento entre k e $k + 1$ da Figura 2(a). Um ônibus i chega na estação k no instante $a_{i,k}$ e despense um tempo $s_{i,k}$ para embarque e desembarque de usuários. Na sequência, existe a possibilidade de reter o ônibus por um tempo $h_{i,k}$ nesta estação. Após a partida, no instante $d_{i,k}$, para cada seção y , o ônibus leva um tempo $\tau_{i,y}$ para atravessar essa seção, que é influenciada pela velocidade do ônibus na seção.

Define-se como “fase” o intervalo entre a mudança de estados do semáforo na aproximação do ônibus. O tempo de ciclo em cada interseção é dividido em uma fase verde e uma fase vermelha, a qual inclui o tempo de amarelo. As fases são indexadas por x . Portanto, se a fase x é verde, a fase $x + 1$ será vermelha. Define-se $\phi_{y,x}$ o instante predefinido no qual a fase x inicia na interseção y . Devido aos planos semafóricos sofrerem atuação do ônibus, todos os valores de $\phi_{y,x}$ são conhecidos.

O conjunto de índices de fases que pertencem à interseção da seção y é definido como Φ_y , e R_y é o subconjunto de Φ_y com os índices x de fases vermelhas da interseção da seção y . Sempre que um ônibus i para na interseção de uma seção y devido a uma fase vermelha, ele está sujeito a um atraso $\sigma_{i,y}$. O atraso experimentado depende do

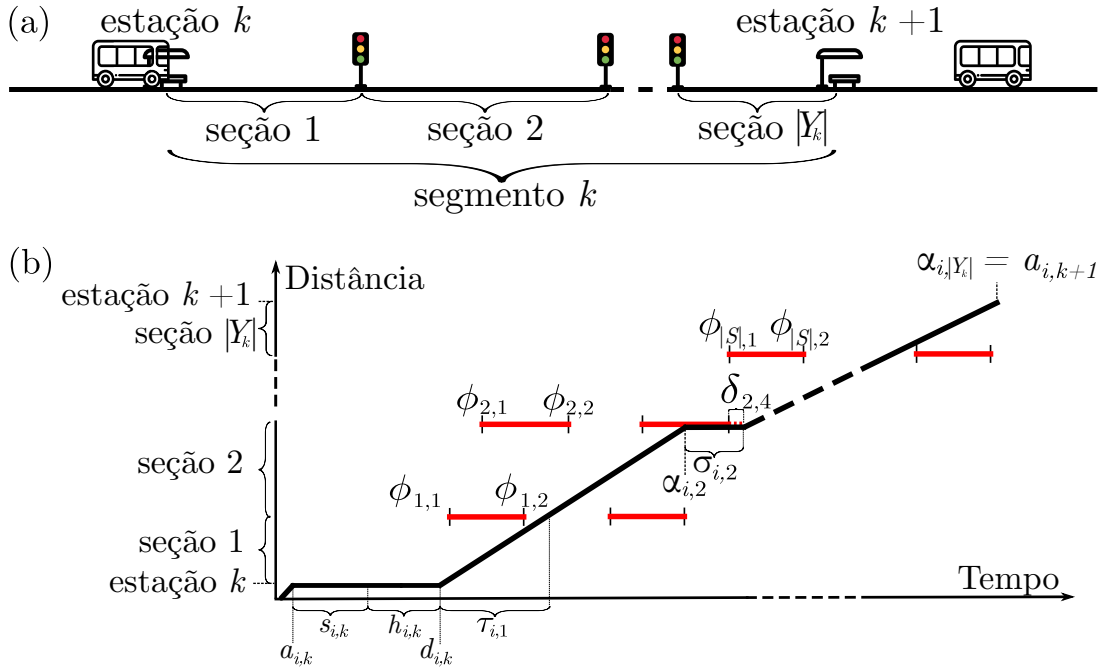


Figura 2 – (a) Segmento entre duas estações k e $k+1$ composta por $|S_k|$ interseções e $|Y_k|$ seções. (b) Diagrama espaço-tempo de uma trajetória de ônibus no segmento entre as estações k e $k+1$; em vermelho, as fases semafóricas vermelhas.

instante de chegada do ônibus $\alpha_{i,y}$ à interseção e pode ser afetado pela atuação semafórica. Neste modelo, definimos $\delta_{y,x}$ como a atuação na fase semafórica, dada em segundos; ela afeta o instante de início da fase x na seção y , onde valores positivos indicam um adiamento (consequentemente uma extensão da fase anterior) e valores negativos indicam uma antecipação (consequentemente um truncamento da fase anterior).

O instante de chegada $\alpha_{i,y}$ do ônibus i na interseção da seção y é dada pela soma da partida deste ônibus $d_{i,k}$ da estação k , o tempo de atraso em todas as seções anteriores, e o tempo de viagem em todas as seções anteriores e na atual:

$$\alpha_{i,y} = d_{i,k} + \sum_{j=1}^{y-1} \sigma_{i,j} + \sum_{j=1}^y \tau_{i,j} \quad \forall y \in Y_k, \quad (1)$$

em que, a partida do ônibus da estação é obtida por:

$$d_{i,k} = a_{i,k} + s_{i,k} + h_{i,k}. \quad (2)$$

3.2.2 Atraso nas interseções

O atraso em uma interseção pode ser expresso em termos do estado semafórico no instante de chegada do ônibus, a duração da fase, e o instante de chegada:

$$\sigma_{i,y} = \begin{cases} \phi_{y,x+1} - \alpha_{i,y}, & \text{se } \phi_{y,x} \leq \alpha_{i,y} < \phi_{y,x+1}, \forall x \in R_y; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3)$$

A primeira condição ocorre se o ônibus chegar na interseção durante uma fase vermelha, o que impõe um atraso ao ônibus $\sigma_{i,y}$ dado pela diferença entre o instante de chegada deste na interseção $\alpha_{i,y}$ e o instante de início da próxima fase, que por definição é uma fase verde. Na segunda condição, $\sigma_{i,y}$ é zero porque o ônibus chega durante a fase verde e cruza a interseção sem parar.

Como mencionado, o atraso em uma interseção pode ser afetado pela atuação do sistema de controle sobre o início das fases. Portanto, reescreve-se (3) para incorporar $\delta_{y,x}$:

$$\sigma_{i,y} = \sum_{x \in R_y} (\phi_{y,x+1} + \delta_{y,x+1} - \alpha_{i,y}) b_{i,y,x}, \quad (4)$$

$$\sum_{x \in \Phi_y} b_{i,y,x} = 1 \quad \forall y \in S_k, \quad (5)$$

$$\alpha_{i,y} \leq (\phi_{y,x+1} + \delta_{y,x+1}) b_{i,y,x} + M(1 - b_{i,y,x}), \quad (6)$$

$$\alpha_{i,y} \geq (\phi_{y,x} + \delta_{y,x}) b_{i,y,x}, \quad \forall x \in \Phi_y, y \in S_k \quad (7)$$

em que $b_{i,y,x} \in 0,1$ tem valor 1 quando x é o índice da fase usada pelo ônibus i para cruzar a interseção da seção y , e M é um número qualquer maior que qualquer valor possível de $\alpha_{i,y}$. A Equação (4) expressa ambas as condições em (3). De fato, para a interseção da seção y , se $\exists x \in R_y \mid b_{i,y,x} = 1$ (ônibus chega durante uma fase vermelha), a Equação (4) se torna $\sigma_{i,y} = \phi_{y,x+1} + \delta_{y,x+1} - \alpha_{i,y}$. Ao contrário, se $b_{i,y,x} = 0 \forall x \in R_y$ (ônibus chega durante uma fase verde), então (4) equivale a $\sigma_{i,y} = 0$. As desigualdades (6) e (7) definem a fase na qual o ônibus i chega com base em $\alpha_{i,y}$, enquanto a restrição (5) impõe que um ônibus pode cruzar a interseção durante somente uma fase.

3.2.3 Restrições de limite

O tempo de viagem dos ônibus são limitados:

$$\tau_y^{\min} \leq \tau_{i,y} \leq \tau_y^{\max} \quad \forall y \in Y_k, \quad (8)$$

com os parâmetros τ_y^{\min} e τ_y^{\max} sendo o mínimo e máximo tempo de viagem, respectivamente, obtidos considerando que o ônibus i viaja através da seção y com velocidade máxima e mínima.

As magnitudes da antecipação e adiamento do início de fases também são limitadas:

$$-\delta_y^{\text{ant}} \leq \delta_{y,x} \leq \delta_y^{\text{pst}} \quad \forall x \in \Phi_y, y \in S_k. \quad (9)$$

Os parâmetros δ_y^{ant} , δ_y^{pst} são a antecipação máxima e o adiamento máximo no semáforo da seção y , respectivamente.

Um tempo máximo de retenção h_k^{\max} na estação k é imposto:

$$0 \leq h_{i,k} \leq h_k^{\max}. \quad (10)$$

O modelo para a trajetória do ônibus é então definido por (1), (2), e (4)–(10). Esta formulação permite uma decisão centralizada para distribuição das ações de controle entre os atuadores de retenção, controle de velocidade e controle semafórico. Ela também não restringe o número de semáforos controlados no segmento.

3.3 OBJETIVOS PARA OTIMIZAÇÃO

O modelo de trajetória de ônibus na Seção 3.2 descreve a região factível do problema de geração de trajetória. Dadas as atuações de controle consideradas, nos semáforos, na velocidade, e na retenção dos ônibus, então $\delta_{y,x}$, $\tau_{i,y}$, e $h_{i,k}$ se tornam variáveis de decisão neste problema de otimização. Propõe-se agora uma série de objetivos envolvendo essas variáveis que devem ser minimizados e podem ser combinados em uma abordagem multiobjetivo.

Esses objetivos podem então ser empregados para explorar a liberdade de atuação na construção da trajetória que atinja o objetivo principal, ou seja, o instante alvo de chegada $\hat{a}_{i,k+1}$ prescrito pelo Controlador de Intervalos.

3.3.1 Instante alvo de chegada

A chegada do ônibus i ao fim do segmento no instante alvo de chegada $\hat{a}_{i,k+1}$ pode ser alcançado adicionando ao modelo a restrição $a_{i,k+1} = \hat{a}_{i,k+1}$. Porém, se for imposta uma restrição tão rigorosa, o problema pode se tornar infactível devido a condições de tráfego não controláveis. Portanto, formula-se a seguinte função erro a ser minimizada:

$$f_1 = (a_{i,k+1} - \hat{a}_{i,k+1})^2. \quad (11)$$

Note que o instante $a_{i,k+1}$ no qual o ônibus chega na estação $k + 1$ não aparece explicitamente no modelo apresentado na Seção 3.2. De fato, ele é igual a $\alpha_{i,|Y_k|}$, o instante de chegada do ônibus i ao fim da última seção do segmento, que é a estação $k + 1$ por definição [ver Figura 2(b)].

O problema é sempre factível com a formulação proposta pois sempre há uma trajetória que leva o ônibus da estação k para a estação $k + 1$. Erros no cumprimento do instante alvo de chegada são perturbações comuns na operação de ônibus devido a efeitos de tráfego não controláveis (apropriadamente) por controladores de intervalo. Tais erros são tratados pelo Controlador de Intervalos na próxima iteração, ou seja, na próxima estação em que um instante alvo de chegada é calculado para a estação a frente.

3.3.2 Tempos semafóricos

O efeito dos ajustes nos tempos semafóricos sobre o restante do tráfego é tratado através da minimização das variações dos tempos semafóricos:

$$f_2 = \sum_{y \in S_k} \sum_{x \in \Phi_y} \delta_{y,x}^2. \quad (12)$$

Adota-se a abordagem na qual entende-se que quanto menores forem as variações em torno dos instantes nominais de início de fase, menores serão os impactos no tráfego geral (ANDERSON; DAGANZO, 2019; BIE *et al.*, 2020). Além disso, nesta abordagem, a requisição para ajuste dos tempos semafóricos só ocorre caso provoque uma melhora na trajetória do ônibus. De qualquer forma, um objetivo mais elaborado poderia ser idealizado se dados em tempo real sobre o tráfego em geral estivessem disponíveis, minimizando assim o atraso de todo o sistema de tráfego. Mesmo assim, pode ser uma questão de política priorizar o transporte público ao invés de carros, caso em que a abordagem apresentada é suficiente.

Uma preocupação operacional surge no caso de requisições frequentes de prioridade para ônibus, principalmente em sistemas bidirecionais. Neste caso, pode-se desabilitar a atuação do ônibus sobre o semáforo por um ou mais ciclos para evitar conflito com uma requisição em andamento feita por outro ônibus ou para permitir uma recuperação completa do sistema de tráfego antes de conceder prioridade novamente.

3.3.3 Tempo de retenção

Os usuários podem se incomodar com a não partida imediata do ônibus da estação após o término do embarque e desembarque; assim os tempos de espera dos ônibus nas estações são levados em consideração pelo objetivo:

$$f_3 = h_{i,k}^2. \quad (13)$$

Se o sistema de ônibus estiver equipado com Contadores Automáticos de Passageiros, esse objetivo pode ser refinado para incluir o número de usuários a bordo como parâmetro de ponderação (LIMA *et al.*, 2021). O dispositivo também seria potencialmente benéfico para o bloco Controlador de Intervalos do sistema (DELGADO; MUNOZ; GIESEN, 2012; SÁNCHEZ-MARTÍNEZ; KOUTSOPOULOS; WILSON, 2016).

3.3.4 Atraso nas interseções

O tempo gasto nas interseções pode ser modelado minimizando o atraso como

$$f_4 = \sum_{y \in S_k} \sigma_{i,y}^2. \quad (14)$$

Dada a prioridade certa, o objetivo f_4 também evita que os ônibus acelerem desnecessariamente ao seguir em direção a um sinal vermelho no próximo cruzamento.

3.3.5 Velocidade constante

Para o conforto dos usuários e para reduzir o consumo de combustível, o ônibus deve manter uma velocidade constante dentro do trecho sempre que possível. Este objetivo pode ser formulado com a minimização da diferença do inverso das velocidades em cada trecho:

$$f_5 = \sum_{y \in Y_k} \left(\frac{\tau_{i,y+1}}{u_{y+1}} - \frac{\tau_{i,y}}{u_y} \right)^2, \quad (15)$$

em que u_y é o comprimento da seção y . O objetivo f_5 deve ter baixa prioridade para não prejudicar o cumprimento do instante alvo de chegada. Para ter a mesma unidade que os outros objetivos apresentados, é utilizado o inverso da velocidade. Isso se justifica pelo fato de que, tendo u_y como um valor fixo, os únicos termos que variam são $\tau_{i,y+1}$ e $\tau_{i,y}$ (em segundos).

A orientação de velocidade é delegada ao Atuador de Velocidade instalado no ônibus responsável por lidar com perturbações que podem afetar o tempo de viagem, bem como as restrições de limite discutidas na Seção 3.2.3 que podem resultar em saturação se, para um determinado segmento, o ônibus está operando próximo ou na velocidade máxima da via.

3.4 EFEITOS DE CADA OBJETIVO NA SOLUÇÃO

Discute-se agora como os diferentes objetivos moldam a solução da trajetória resultante do problema de otimização de atuação. As funções objetivo apresentadas têm forma quadrática para melhor orientar a solução para a operação pretendida e para desvincular soluções de valor semelhante. Por exemplo, considere dois casos possíveis para uma instância com duas seções. No primeiro caso, a diferença entre o instante de chegada ao final de cada trecho é de 1 minuto. No segundo caso, o ônibus chega ao final do primeiro trecho exatamente no instante previsto, mas chega ao final do segmento com 2 minutos de diferença. Com um objetivo linear o custo total seria de 2 minutos para ambos os casos. No entanto, devido à forma quadrática das funções, o primeiro caso gera um custo de $1^2 + 1^2 = 2$, enquanto o segundo gera um custo de $0^2 + 2^2 = 4$. Assim, essa formulação tolera pequenos desvios e penaliza grandes desvios, o que é melhor para a operação. A mesma lógica se aplica a todos os outros objetivos. A forma quadrática também contorna problemas de continuidade da derivada da função objetivo que surgiriam caso fosse usada a função módulo para garantia de valores positivos do objetivo a minimizar.

O objetivo principal é cumprir o instante alvo de chegada $\hat{a}_{i,k+1}$ prescrito pelo Controlador de Intervalos, medido por f_1 . No entanto, o objetivo f_1 sozinho não é suficiente para produzir uma trajetória. Suponha o caso em que o controle não está saturado e o modelo atinge precisamente o alvo, ou seja, $f_1 = 0$. Existem infinitas soluções para atingir o alvo. Por exemplo, se o Controlador de Intervalos determinar que o ônibus deve ser

atrasado em t segundos após o embarque e desembarque terminarem na estação k e antes de chegar na estação $k + 1$, diferentes maneiras de fazer isso são: i) reter o ônibus por t segundos na estação de embarque; ou ii) atrasar o ônibus t segundos em um semáforo; ou iii) diminuir a velocidade do ônibus, aumentando o tempo de viagem em t segundos; ou iv) qualquer combinação dessas medidas anteriores.

Os Objetivos (12)–(15) fornecem ao operador várias opções para se beneficiar das muitas soluções possíveis. Conforme formulado acima, os objetivos visam diminuir a perturbação do tráfego nos ajustes de tempos semafóricos (f_2), diminuir a espera nas estações (f_3), diminuir os atrasos nos cruzamentos (f_4) e evitar variações na velocidade do ônibus (f_5). Como os objetivos f_2 a f_5 sozinhos criariam soluções sem controle algum para o objetivo central f_1 , cada objetivo f_2 – f_5 agora é analisado como objetivos complementares a f_1 , ou seja, analisar $f_1 + f_z$, $z = 2, 3, 4, 5$.

Com o objetivo f_2 evitamos o ajuste de tempos semafóricos nas interseções, implicando em menos perturbações ao tráfego do entorno e preservando a coordenação semafórica no corredor. No exemplo dado acima, o objetivo f_1 minimizaria os desvios em relação ao alvo. Enquanto isso, f_2 penalizaria os ajustes semafóricos, permitindo que o controle atuasse livremente na velocidade e na retenção, reduzindo a liberdade de soluções possíveis sem comprometer a flexibilidade do modelo. Devido à forma quadrática de f_2 , um ajuste de início de fase de t segundos em uma interseção custa mais (na função objetivo) do que dois ajustes de $t/2$ segundos em duas interseções diferentes. Isso está de acordo com o desejo de evitar perturbar o tráfego ao redor, o que é alcançado pela suavização dos ajustes semafóricos ao longo do corredor.

Os objetivos f_3 e f_4 também reduzem a liberdade de soluções possíveis ao penalizar a espera nas estações e os atrasos nos semáforos, respectivamente. Esses objetivos devem ter diferentes níveis de importância, pois os usuários valorizam seu tempo de forma diferente durante a viagem, e sua percepção de atraso devido à retenção pode ser diferente do sinal vermelho (CEDER, 2007). No entanto, em combinação com outros objetivos e devido ao formato de nossas funções, pequenos atrasos nas estações ou semáforos, devidamente parametrizados em termos de custos, podem ser benéficos para o sistema. O objetivo f_4 também gera economia de combustível, evitando que os ônibus se apressem inadvertidamente para o sinal vermelho.

Por fim, o objetivo f_5 desempenha um triplo papel: (i) economiza combustível evitando acelerações e desacelerações; (ii) aumenta o conforto dos usuários a bordo; e (iii) reduz a liberdade de possíveis soluções que poderiam ser obtidas ajustando a velocidade de um ônibus para atingir um determinado alvo.

No geral, a combinação dos cinco objetivos permite a modelagem de trajetórias de ônibus melhores e mais consistentes do que seria possível simplesmente satisfazendo o instante alvo de chegada em cada segmento, ao mesmo tempo em que diminui o distúrbio do tráfego geral, aumenta o conforto dos usuários e diminui o consumo de combustível.

3.5 FORMULAÇÃO MULTIOBJETIVO

Para a combinação dos objetivos parciais, propõe-se uma forma lexicográfica pura (HWANG; MASUD, 2012), que resolve cada objetivo separadamente sempre respeitando o conjunto de soluções que otimiza objetivos hierárquicos superiores:

$$\begin{aligned} & \text{lex min} && (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5) \\ & \text{sujeito a:} && (1), (2), \text{ e } (4)\text{--}(10). \end{aligned} \tag{16}$$

Esta ordem hierárquica prioriza a chegada do ônibus à próxima estação no instante alvo (f_1) sobre todos os outros objetivos e tenta fazê-lo alterando minimamente os tempos semafóricos (f_2), o segundo objetivo mais importante. Também penaliza a retenção nas estações (f_3) mais do que o atraso nas interseções (f_4). Manter a velocidade constante (f_5) é colocado como o objetivo menos importante, pois melhora os critérios fora de foco do modelo apresentado. Como o objetivo f_1 é otimizado primeiro, uma solução de erro zero para o tempo de chegada é garantida pelo projeto se tal solução existir; caso contrário, a solução é de erro mínimo com o instante de chegada o mais próximo possível do alvo.

Com a ordem de prioridade dos objetivos proposta, a busca por uma trajetória ótima pode ser interpretada da seguinte forma: encontra todas as trajetórias que forneçam um instante de chegada na estação seguinte o mais próximo possível do instante alvo; dentre estas, seleciona as trajetórias que exijam a menor atuação semafórica possível, ou seja, a atuação semafórica será usada se e somente se não existir trajetória que utilize apenas controle de velocidade e/ou retenção; dentre estas, seleciona as trajetórias que demandem o menor tempo de retenção possível, ou seja, o tempo de retenção será usado se e somente se não existir trajetória que utilize apenas controle de velocidade; dentre estas, seleciona aquelas que minimizem o tempo parado nos semáforos, ou seja, o atraso semafórico será usado se e somente se não existir trajetória que respeite o limite mínimo de velocidade nas seções; dentre estas, seleciona a trajetória que apresenta menor variação de velocidade no segmento.

A tarefa de ajustar a ordem de prioridade desses objetivos pode ser delegada ao operador do sistema de ônibus, que deve levar em consideração como os usuários valorizam seu tempo em diferentes situações de atraso, como baixa velocidade, retenção em estações e parada devido a um sinal vermelho.

Diferentes abordagens podem ser consideradas combinando todos os objetivos ou subconjuntos de objetivos em uma soma ponderada, por exemplo, via escalarização (HWANG; MASUD, 2012). Isso pode ser útil para situações em que o operador não pode decidir uma hierarquia para os objetivos ou relaxa deliberadamente a minimização de um objetivo hierarquicamente superior em favor de outros objetivos.

3.6 ANÁLISE NUMÉRICA DE UM SEGMENTO

Para avaliar as características das atuações da abordagem proposta, dada pelo modelo (16) e doravante identificada como [T], *Trajectory Control*, é apresentada uma comparação com a aplicação apenas de retenção nas estações, [H], *Holding Control*.

3.6.1 Configuração do cenário

Um único segmento de 1165 metros de uma via arterial fornece o cenário para esta análise numérica. Entre suas duas estações, com índices 1 e 2, existem três semáforos, a 192 m, 557 m e 899 m da estação 1. Os semáforos de todas as interseções operam com um plano semaforico que pode ser atuado pelo ônibus, com tempo de ciclo predefinido de 150 s, 84 s de verde, 66 s de vermelho no sentido dos ônibus. As defasagens de início de fase são +12 e +24 s, respectivamente, para o segundo e terceiro semáforos em relação ao primeiro, e foram projetadas para conceder ondas verdes para o tráfego de mesmo sentido dos ônibus. Considerando uma velocidade de cruzeiro de 70 km/h a largura da banda de passagem (LITTLE, 1966), ou seja, o intervalo de tempo no qual os veículos cruzam os três semáforos na fase verde, é de 72 s. O tempo médio de travessia do segmento, \bar{t}_1 , levando em consideração a presença de semáforos e nenhum sistema de controle de intervalos entre ônibus, é de 83 s. As velocidades máxima e mínima permitidas são 70 km/h e 45 km/h, respectivamente, quando o [T] é aplicado, e a velocidade é fixada em 70 km/h quando o [H] é aplicado. Os parâmetros δ_y^{ant} e δ_y^{pst} são definidos para 20 s e h_1^{max} a 50 s.

Os instantes alvo de chegada são escolhidos arbitrariamente para fins de comparações numéricas. Dois experimentos são realizados no mesmo cenário, diferindo apenas pelo instante alvo de chegada na estação 2, $\hat{a}_{i,2}$. No Experimento A, espera-se que os ônibus cheguem à estação 2 após 83 s da partida da estação 1, ou seja, cruzem o segmento no tempo médio, \bar{t}_1 . No Experimento B, espera-se que os ônibus cheguem à estação 2 133 s após partirem da estação 1, ou seja, cruzem o trecho com um atraso de 50 s sobre \bar{t}_1 .

O efeito dos semáforos no desempenho da atuação de [T] pode influenciar os resultados, pois seus estados dependem do instante no qual o ônibus está pronto para sair da estação 1. Para contornar isso, [H] e [T] são avaliados executando 150 replicações diferentes, cada uma com um valor diferente de tempo parado na estação 1. Assim, $s_{i,1}$ varia de 1 s a 150 s (o tempo de ciclo) em passos de 1 s, enquanto $a_{i,1}$ é mantido como 0. Desta forma cobrem-se todas as combinações possíveis de instante de chegada aos semáforos entre a estação 1 e 2, dado o passo de 1 s.

O *solver* Gurobi (GUROBI OPTIMIZATION, 2020) foi usado para resolver o modelo [T]. Como este *solver* exige que as funções objetivo sejam lineares na abordagem multiobjetivo, as equações (11)–(15) foram linearizadas (GLOVER; WOOLSEY, 1974) sem perda de precisão. O tempo gasto pelo Gurobi para encontrar a solução ótima foi semelhante em ambos os experimentos: 0,2 s em média com um máximo de 0,6 s, em um

processador Intel i7-9700K de 3.6 GHz, e 32 GB de memória RAM.

Devido à condição inicial variável, o desempenho das abordagens no cumprimento do instante de chegada à estação 2 será avaliado analisando $t_{i,1}$, ou seja, o intervalo entre o momento em que o ônibus está pronto para sair da estação k (fim do tempo de permanência) até o momento em que o ônibus chega à estação $k + 1$, em relação ao tempo esperado (ou alvo) de viagem $\hat{t}_{i,1}$, em vez de $a_{i,2}$. Os resultados são apresentados na Tabela 1, na qual Média absoluta é a média dos valores absolutos das diferenças.

3.6.2 Tempo esperado de viagem igual ao tempo médio de viagem

Os resultados apresentados na Tabela 1 para o Experimento A mostram que o [H] não aplica retenção e os ônibus chegam à estação 2 após 83 s, em média. Mas a média absoluta dos erros de chegada na Tabela 1 mostram que na atuação [H] as chegadas são mais dispersas do que em [T]. Pode-se observar também que [T] não utilizou retenção na estação em nenhuma replicação.

Observa-se que [H] aplica retenção zero neste experimento porque o tempo esperado de viagem é igual ao tempo médio de viagem no segmento. As variações em torno da média são causadas, neste exemplo, pelos semáforos. Se o ônibus chega no verde de todos os três semáforos, ele percorre o segmento no menor tempo de viagem possível, que é de 60 s, que é o valor da abscissa da primeira barra do histograma de [H] apresentado na Figura 3. A probabilidade associada a esse tempo de viagem é de 0,48, dada pela razão entre a banda de passagem e o tempo de ciclo semafórico. Por outro lado, se o ônibus encontra o sinal vermelho no caminho, a viagem no segmento pode demorar mais do que a média. Nesse experimento, o tempo de viagem mais longo é de cerca de 126 s (última barra na Figura 3).

A existência de erros de chegada com [T], que busca minimizar este critério antes de qualquer outro, indica que foi infactível cumprir o tempo de chegada previsto para algumas instâncias. Tal infactibilidade pode ser atribuída ao valor de referência de $\hat{t}_{i,1}$ para esta análise, 83 s, que é uma média considerando que os ônibus trafegam com a velocidade máxima permitida. O histograma da Figura 3 mostra que [T], em comparação com [H], foi capaz de atrasar viagens que sem otimização de trajetória seriam concluídas em menos tempo que $\hat{t}_{i,1}$. Por outro lado, [T] não teve a mesma eficiência para antecipar viagens que, sem controle, seriam concluídas em tempo superior a $\hat{t}_{i,1}$, devido às limitações de velocidade máxima e prioridade semafórica.

Como exemplo, a Figura 4 apresenta duas trajetórias, uma para o [T] e outra para o [H], ambas com $s_{i,1} = 54$ s. Essas trajetórias são selecionadas para ilustrar que, mesmo com pequenas ações, o [T] pode ter um desempenho consideravelmente melhor que o [H]. Neste exemplo, o [T] teve que atrasar em 5 s o início de uma fase vermelha na terceira interseção para evitar que o ônibus fosse atrasado de forma ineficaz como ocorreu com o [H]. O erro em cumprir o instante de chegada neste exemplo foi 0 s para o [T] e 48 s para

Tabela 1 – Análise numérica de um segmento. Experimento A: $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 = 83$. Experimento B: $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 + 50 = 133$ s.

Indicador de desempenho	Experimento A		Experimento B	
	[H]	[T]	[H]	[T]
Média absoluta do erro de chegada (s)	24.0	5.0	24.0	0.4
Ajustes semafóricos absolutos (s)	-	12.0	-	4.8
Retenção média (s)	0.0	0.0	50.0	0.0
Atraso semafórico médio (s)	24.0	8.1	24.0	21.0

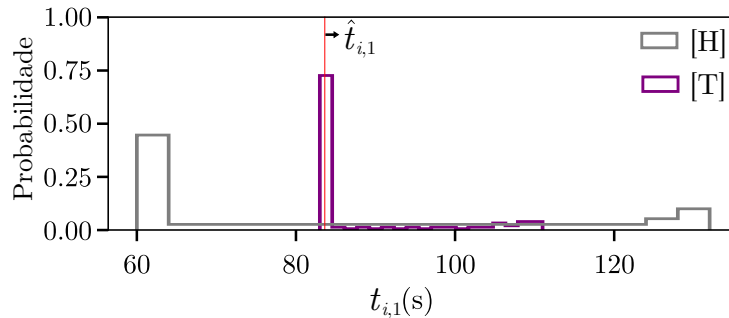


Figura 3 – Distribuição de probabilidade do instante de chegada do ônibus na estação 2 para o experimento A, em que $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 = 83$ s

o [H].

3.6.3 Tempo esperado de viagem 50 s maior que tempo médio de viagem

Os resultados apresentados na Tabela 1 para o Experimento B mostram que [H], que não possui informação sobre o segmento à frente, corrige totalmente o intervalo (na estação 1), aplicando 50 s de retenção em todas as replicações. Não surpreende que o seu desempenho seja o mesmo do experimento anterior, uma vez que as trajetórias são iguais, mas atrasadas em 50 s.

Por outro lado, [T] tem um desempenho melhor do que no experimento anterior (Tabela 1), apresentando uma menor variação de tempos de viagem com menor uso de TSC (*Transit Signal Control*). Mesmo com o atraso necessário de 50 s, o [T] não utilizou retenção na estação para nenhuma replicação. Tais ações devem-se à aplicação de TSC e ao fato de que a retenção é infinitamente mais custosa do que o atraso nos cruzamentos dada a formulação lexicográfica.

Os histogramas da Figura 5 mostram o mesmo resultado para o [H], mas defasado em +50 s, em relação ao histograma da Figura 3, e um resultado diferente para o [T]. Neste caso, a capacidade do Otimizador de Trajetória em acertar precisamente o instante alvo de chegada foi maior, atingindo 90%. A maior precisão se deve à necessidade de atraso na trajetória, aumentando a região de trajetórias factíveis. As chegadas fora do alvo, que somam 10% do total, têm distribuição constante, algumas antes outras depois

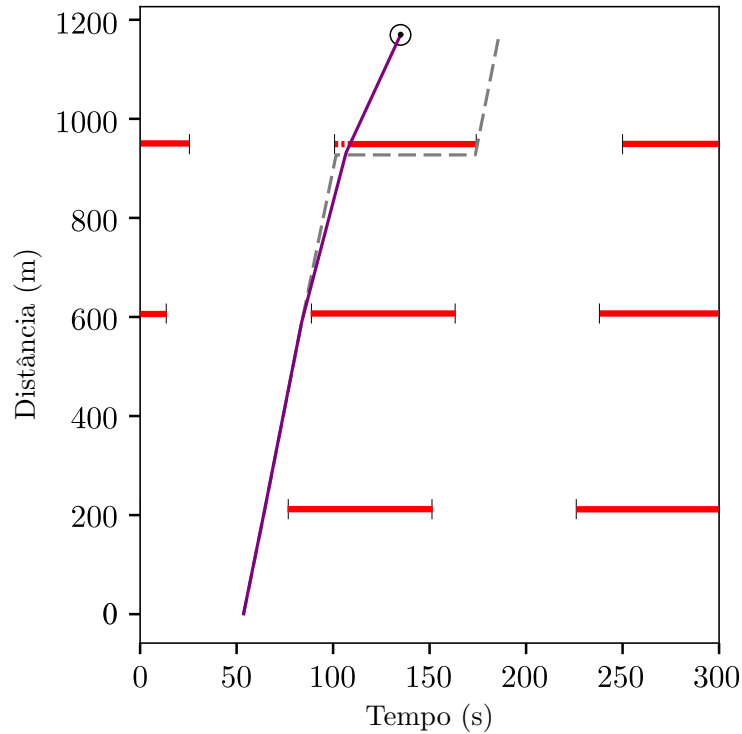


Figura 4 – Diagrama espaço-tempo exemplificando duas trajetórias de ônibus do experimento A: em roxo o resultado de [T] e em cinza o resultado do [H]. Ambas as trajetórias com $s_{i,1} = 54$ s e $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 = 83$ s. O instante alvo de chegada (137 s) está representado pelo círculo preto na ordenada próxima de 1.200 m.

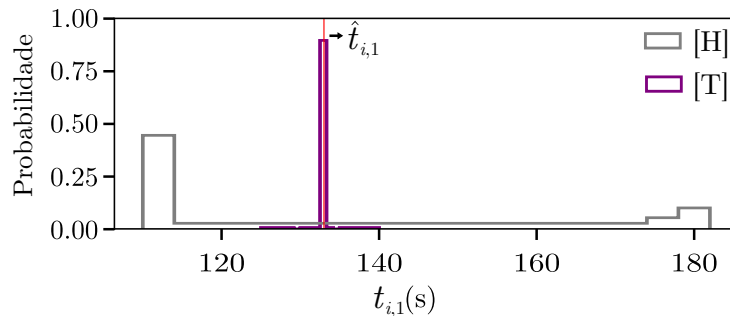


Figura 5 – Distribuição de probabilidade do instante de chegada do ônibus na estação 2 para o experimento B, em que $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 + 50 = 133$ s.

do instante alvo, não ultrapassando 8 s de desvio.

Como exemplo, a Figura 6 apresenta duas trajetórias, uma para o [H] e outra para o [T], ambas com $s_{i,1} = 80$ s. O cumprimento de $\hat{t}_{i,1}$ foi semelhante para ambos os casos neste experimento. A diferença poderia ser facilmente corrigida com um pequeno ajuste na velocidade do ônibus, para que [H] acertasse o alvo precisamente. No entanto, os dois apresentaram atuações bastante diferente no início do segmento. [H] aplicou 50 s de espera na estação e o ônibus ainda chegou ao primeiro cruzamento em uma fase vermelha. [T], por sua vez, tendo a ciência de que é mais vantajoso fazer o ônibus esperar em uma fase vermelha predefinida do semáforo, não aplicou retenção na estação.

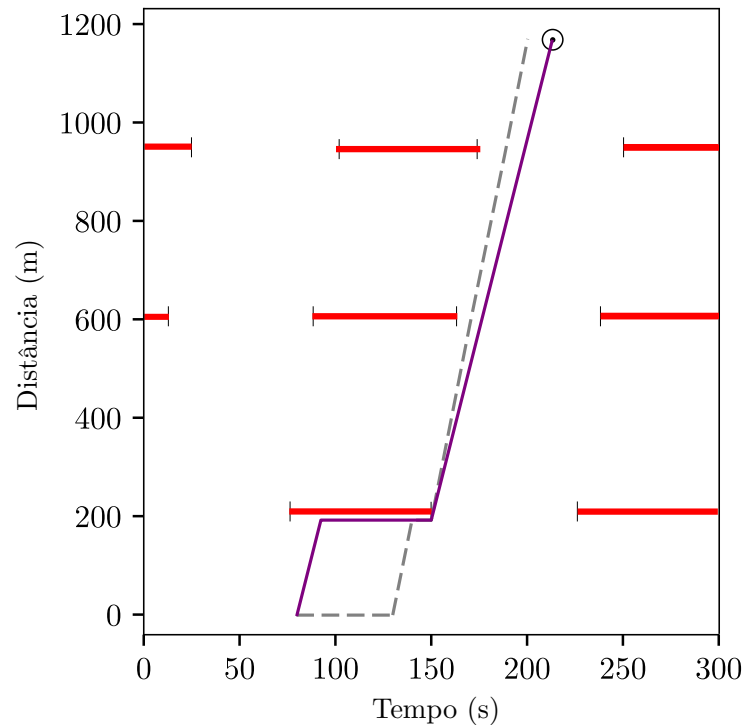


Figura 6 – Diagrama espaço-tempo exemplificando duas trajetórias de ônibus do experimento B: em roxo o resultado de [T] e em cinza o resultado do [H]. Ambas as trajetórias com $s_{i,1} = 80$ s e $\hat{t}_{i,1} = \bar{t}_1 + 50 = 133$ s. O instante alvo de chegada (213 s) está representado pelo círculo preto na ordenada próxima de 1.200 m.

Os testes realizados neste capítulo demonstram a capacidade do modelo em otimizar a trajetória de um ônibus entre duas estações segundo os objetivos considerados, mas não permitem concluir sobre a utilização desse modelo no controle de intervalos entre ônibus. O capítulo seguinte apresenta a aplicação do modelo com dois métodos distintos de cálculo para regularização de intervalos, para que no Capítulo 5 estas aplicações sejam testadas para o controle de intervalos de linhas de ônibus completas.

4 APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO DA TRAJETÓRIA COM CONTROLE DE INTERVALOS

Com um modelo capaz de atuar de forma ótima para controle de intervalos entre ônibus, como o apresentado no capítulo anterior, o presente capítulo se limita a discutir a aplicação do modelo apresentado com métodos de cálculo de tempo de regulagem. Estes métodos, selecionados da literatura, correspondem ao bloco Controlador de Intervalos (ver Figura 1) e fornecem para o Otimizador de Trajetória o instante alvo de chegada $\hat{a}_{i,k+1}$ para o ônibus i na estação $k + 1$. Dois dos métodos apresentados no Capítulo 2 são detalhados neste capítulo. Eles serão aplicados e testados junto ao Otimizador de Trajetória. Um deles utiliza uma técnica de controle realimentado com ganho proporcional e resolve o problema de intervalos localmente, ou seja, observando apenas o intervalo do ônibus a ser controlado naquele evento. É um dos métodos mais simples encontrados na literatura, e esse é o principal motivo de sua seleção para os testes.

Deseja-se analisar também o desempenho do modelo de otimização de trajetória quando aplicado com um método de controle de intervalos mais complexo, e que, em geral, apresenta resultados melhores na regularização de intervalos (ZIMMERMANN *et al.*, 2016). O método selecionado utiliza técnica de controle preditivo e resolve o problema globalmente, ou seja, observando os intervalos entre todos os ônibus em todos os eventos. A aplicação com este método é apresentada primeiro na forma sequencial, onde o controle preditivo de intervalos fornece um valor de $\hat{a}_{i,k+1}$ para o Otimizador de Trajetória. Por fim, a Seção 4.3 propõe um modelo que integra as restrições do modelo da trajetória ao modelo preditivo de controle de intervalos.

4.1 APLICAÇÃO COM CONTROLE PROPORCIONAL DE INTERVALOS

O controle proporcional de intervalos utilizado nesta aplicação calcula um tempo de regulagem, $r_{i,k}$, no intuito de atrasar (se for positivo) ou adiantar (se for negativo) o ônibus i , para que siga seu intervalo planejado, H_i , definido previamente:

$$r_{i,k} = K_c(H_i - (a_{i,k} + s_{i,k} - d_{i-1,k})), \quad (17)$$

em que K_c é um ganho proporcional. O valor de $\hat{a}_{i,k+1}$, variável de entrada para o Otimizador de Trajetória, é obtido através de:

$$\hat{a}_{i,k+1} = a_{i,k} + s_{i,k} + \bar{t}_{i,k} + r_{i,k} \quad (18)$$

Em (18) garante-se que o ônibus i chegue à estação $k+1$ com ajuste de $r_{i,k}$ segundos sobre o tempo médio de viagem, $\bar{t}_{i,k}$. A lei de controle (17) é baseada em um método de controle por realimentação (DAGANZO, 2009) desenvolvido originalmente para atuar através de retenção. Esse método inclui um tempo limite que serve como margem para o avanço de ônibus atrasados, aplicando um tempo de retenção para ônibus que estão no

horário. Como a otimização da trajetória pelo método aqui proposto é capaz de avançar os ônibus, o cálculo de (17) é adaptado para desconsiderar o tempo limite e permitir que $r_{i,k}$ seja tanto negativo quanto positivo. A escolha de (17) se deu por sua simplicidade e abrangência de uso, mas qualquer outro sistema de controle de intervalos, por exemplo aqueles propostos por Turnquist (1982) e Cats *et al.* (2011), poderia ter sido usado. As equações (18) e (17) definem o bloco *Controlador de Intervalos* na Figura 1 para este caso.

O cálculo de $r_{i,k}$ por (17) é diferente de zero sempre que o ônibus i termina o processo de embarque e desembarque com um intervalo para o ônibus da frente diferente do intervalo planejado. Definir $K_C = 1$ implica em uma aderência estrita ao intervalo planejado. Entretanto, na literatura, sugere-se $K_C < 1$ para evitar regulagens muito bruscas em um único evento (CATS *et al.*, 2011).

4.2 APLICAÇÃO COM CONTROLE PREDITIVO DE INTERVALOS

O método de controle preditivo implementado neste trabalho é baseado no modelo de programação matemática apresentado por Koehler, Kraus e Camponogara (2011). Esse método dispensa o valor de intervalo planejado previamente, mas assume a disponibilidade dos seguintes dados históricos:

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

O modelo é baseado nas seguintes premissas:

- capacidade do ônibus é infinita;
- tempo de viagem dos ônibus entre estações é igual à média histórica;
- tempos de embarque e desembarque podem ser definidos por um funções lineares e deterministas;
- não existe ultrapassagem entre os ônibus.

No modelo determinístico proposto pelos autores, a função objetivo do modelo considera todos os ônibus do sistema e um número limitado de estações no horizonte de cada ônibus. Ou seja, para cada ônibus i parando em uma estação k são computados três custos, os quais são somados para todos os ônibus no sistema ($i \in I$), e as estações que estão contidas no horizonte de predição N_i de cada ônibus i ($k \in N_i$):

$$f_d = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} \frac{\lambda_k}{2} (\hat{d}_{i,k} - \hat{d}_{i-1,k})^2, \quad (19)$$

$$f_s = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} (1 - \hat{q}_k) \tilde{l}_{i,k-1} (\hat{s}_{i,k} + \hat{h}_{i,k}), \quad (20)$$

$$f_t = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} \tilde{l}_{i,k} \hat{t}_{i,k}, \quad (21)$$

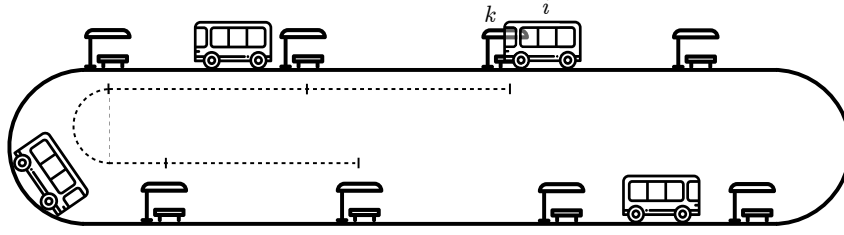
em que λ_k é a taxa de chegada de usuários na estação k , \hat{q}_k é a fração de desembarque de usuários na estação k , ambos estimados, $\hat{h}_{i,k}$ é o tempo calculado de retenção do ônibus i na estação k , $\hat{t}_{i,k}$ é o tempo esperado de viagem do ônibus i desde a partida da estação k até a chegada na estação $k+1$, e $\hat{\cdot}$ denota valores esperados, visto que os valores calculados a priori pelo modelo não são necessariamente aqueles de fato observados a posteriori, e $\tilde{l}_{i,k}$ é computado iterativamente através do método de Koehler, Kraus e Camponogara (2011) para garantir a convexidade da função.

O custo f_d representa a espera dos usuários na estação, calculado considerando que estes chegam à estação a uma taxa constante desde a partida de um ônibus até a partida do ônibus seguinte. O custo f_s representa o tempo de espera dos usuários embarcados enquanto o ônibus está parado na estação, em que o termo $(1 - \hat{q}_k) \tilde{l}_{i,k-1}$ é a estimativa da quantidade de usuários que continuam embarcados após o processo de desembarque nesta estação. O custo f_t não pertence ao modelo original, e foi adicionado neste trabalho para contabilizar o tempo de viagem de todos os usuários do ônibus i desde a partida da estação k até a chegada na estação $k+1$. O objetivo do modelo é minimizar a soma dos três custos para todo o horizonte de predição:

$$\min f = f_d + f_s + f_t. \quad (22)$$

A Figura 7 ilustra um caso em que o ônibus i está prestes a sair da estação k e N_i é igual a cinco. Apesar da ilustração do horizonte de predição apenas para o ônibus i , a função objetivo considera o horizonte de predição de todos os ônibus no sistema. Nota-se que, considerando o mesmo tamanho de horizonte de predição para todos os ônibus, de cinco estações, na Figura 7 tem-se a inclusão de todas as estações do itinerário na formulação do problema.

Figura 7 – Horizonte de previsão utilizado pelo modelo do controle preditivo, exemplificado com 5 estações no horizonte de previsão.



As restrições deste modelo são dadas para todo $i \in I$ e $k \in N_i$ por:

$$\hat{a}_{i,k} = \hat{d}_{i,k-1} + \hat{t}_{i,k-1}, \quad (23)$$

$$\hat{s}_{i,k} = \frac{nC_0 + C_1\lambda_k \left[(\hat{a}_{i,k} - \hat{d}_{i-1,k}) + C_2\hat{q}_k\hat{l}_{i,k-1} \right]}{(n - C_1\lambda_k)}, \quad (24)$$

$$\hat{d}_{i,k} = \hat{a}_{i,k} + \hat{s}_{i,k} + \hat{h}_{i,k}, \quad (25)$$

$$\hat{l}_{i,k} = \lambda_k(\hat{d}_{i,k} - \hat{d}_{i-1,k}) + (1 - \hat{q}_k)\hat{l}_{i,k-1}, \quad (26)$$

$$\hat{d}_{i,k} \geq \hat{d}_{i,k}, \quad (27)$$

$$0 \leq \hat{h}_{i,k} \leq h_k^{\max}, \quad (28)$$

$$t_k^{\min} \leq \hat{t}_{i,k} \leq t_k^{\max}, \quad (29)$$

$$\hat{a}_{i,k}, \hat{s}_{i,k}, \hat{d}_{i,k}, \hat{l}_{i,k} \geq 0. \quad (30)$$

Em (23) é restringido o instante de chegada de um ônibus a uma estação pelo instante de partida deste da estação anterior e pelo tempo de viagem entre estas estações, $\hat{t}_{i,k}$. Em (24) é definido o tempo de parada do ônibus em função da quantidade de usuários querendo embarcar e desembarcar, em que C_0 é o atraso de tempo para início do processo de embarque e desembarque, C_1 é o tempo de embarque por usuário, C_2 é o tempo de desembarque por usuário, e n é o número de portas do veículo. É considerado que o embarque e desembarque ocorrem sequencialmente, em todas as portas do veículo. Em (25) define-se o instante de partida do ônibus i da estação k como sendo a soma do instante de chegada, com o tempo para embarque e desembarque e com o tempo de retenção deste ônibus nesta estação. em (26) define-se o número de usuários embarcados em função da quantidade de usuários embarcando e desembarcando. Em (27) garante-se que não há ultrapassagem. Em (29) são definidos os limites superior e inferior dos tempos de viagem.

O método de Koehler, Kraus e Camponogara (2011) permite transformar as funções não convexas, $\hat{l}_{i,k-1}(\hat{s}_{i,k} + \hat{h}_{i,k})$ e $\hat{l}_{i,k}\hat{t}_{i,k}$, em convexas, fixando os valores do conjunto de variáveis de decisão \hat{l} , no valor calculado na iteração anterior. Esta estimativa é chamada \tilde{l} . Na primeira iteração $\tilde{l}_{i,k} = 0$, nas iterações seguintes $\tilde{l}_{i,k}$ é igual a $\hat{l}_{i,k}$ da iteração anterior, sempre $\forall i \in I$ e $k \in N_i$. O processo finaliza quando a diferença do valor de custo global, f , da iteração atual em relação ao da iteração anterior é igual ou menor a 1%.

A diferença entre este conjunto de restrições e aquele apresentado no trabalho original tratam de transformar o que era um parâmetro em uma variável de decisão: $\hat{t}_{i,k}$. No modelo original, o tempo de viagem não era considerado uma variável de decisão como neste, e sim um dado histórico, tipicamente $\bar{t}_{i,k}$. Esta adaptação é crucial para que o modelo permita tanto o atraso quanto o adiantamento dos ônibus. O limite t_k^{\min} foi definido como o tempo para cruzar o segmento da estação k em velocidade máxima sem qualquer atraso em semáforos, e t_k^{\max} foi definido como $\bar{t}_{i,k}$. Assim, a única possibilidade do modelo para atrasar os ônibus é fazendo $\hat{h}_{i,k} > 0$.

Dado que o modelo é representado pela minimização da função objetivo convexa (22), sujeito às restrições lineares (23) à (30), o problema resultante é da classe de programação quadrática. Este tipo de problema pode ser resolvido por programas disponíveis comercialmente em tempo real. A variável $\hat{a}_{i,k+1}$ é expressa explicitamente no modelo, podendo então ser utilizada diretamente como entrada no bloco Otimizador de Trajetória (ver Figura 1). Sendo assim, é negligenciada a informação de controle mais detalhada calculada por este modelo, que é a distinção entre o tempo a ser aplicado em retenção, $\hat{h}_{i,k}$, e o ajuste a ser aplicado ao tempo de viagem após a partida da estação k até a chegada em $k + 1$. A distribuição das ações entre os atuadores de controle fica toda a cargo do Otimizador de Trajetória.

O problema de otimização é solucionado a cada vez que um ônibus termina o processo de embarque e desembarque e está pronto para partir de uma estação. Apesar do horizonte de predição tipicamente cobrir múltiplas estações para todos os ônibus do sistema, a decisão de controle passada para o bloco Otimizador de Trajetória é apenas aquela a ser aplicada ao ônibus que está prestes a partir. As decisões de controle calculadas para as demais estações pertencentes ao horizonte de predição não são implementadas. Quando ocorre um novo evento, o estado do sistema é atualizado com dados relativos às últimas estações visitadas pelos ônibus, o horizonte de predição é deslocado para frente e uma nova decisão de controle é calculada resolvendo o problema (22)–(30).

Os autores desenvolveram este modelo adaptado a linhas circulares, e neste trabalho será mantida essa particularidade do modelo. Portanto, a definição do conjunto de estações no horizonte de predição é dado da seguinte forma. Caso o número de estações no horizonte de predição seja maior do que o restante de estações existentes até o fim do itinerário, adiciona-se ao conjunto de estações as primeiras estações da volta seguinte. Por exemplo, considere um itinerário com 30 estações, um horizonte de predição de 20 estações, e que um dos ônibus está prestes a chegar na estação 15. Então no horizonte de predição deste ônibus estarão as estações 15 à 30, e as estações 1 à 4.

No Capítulo 5 as estratégias são testadas em cenário com linha circular e em cenário com linha não circular. Entretanto, os métodos baseados em controle preditivo, tanto o apresentado nesta seção quanto o apresentado na seção seguinte, serão testados apenas em cenário com linha circular.

4.3 MODELO INTEGRADO DE CONTROLE DE INTERVALOS E DE TRAJETÓRIAS

O controle preditivo de intervalos apresentado na seção anterior, por calcular o tempo de regulação através de um modelo matemático, permite uma integração com o modelo de otimização da trajetória. Desta forma, com base no estado do sistema, ao invés de um instante alvo, o modelo retornaria diretamente a atuação ótima, distribuída em retenção na estação, ajuste de velocidade e ajuste de tempos semafóricos, para todos os ônibus e para todas as estações no horizonte de predição. Com um modelo integrado, o esquema de controle dos ônibus difere um pouco daquele apresentado na Figura 1, e fica como apresentado na Figura 8.

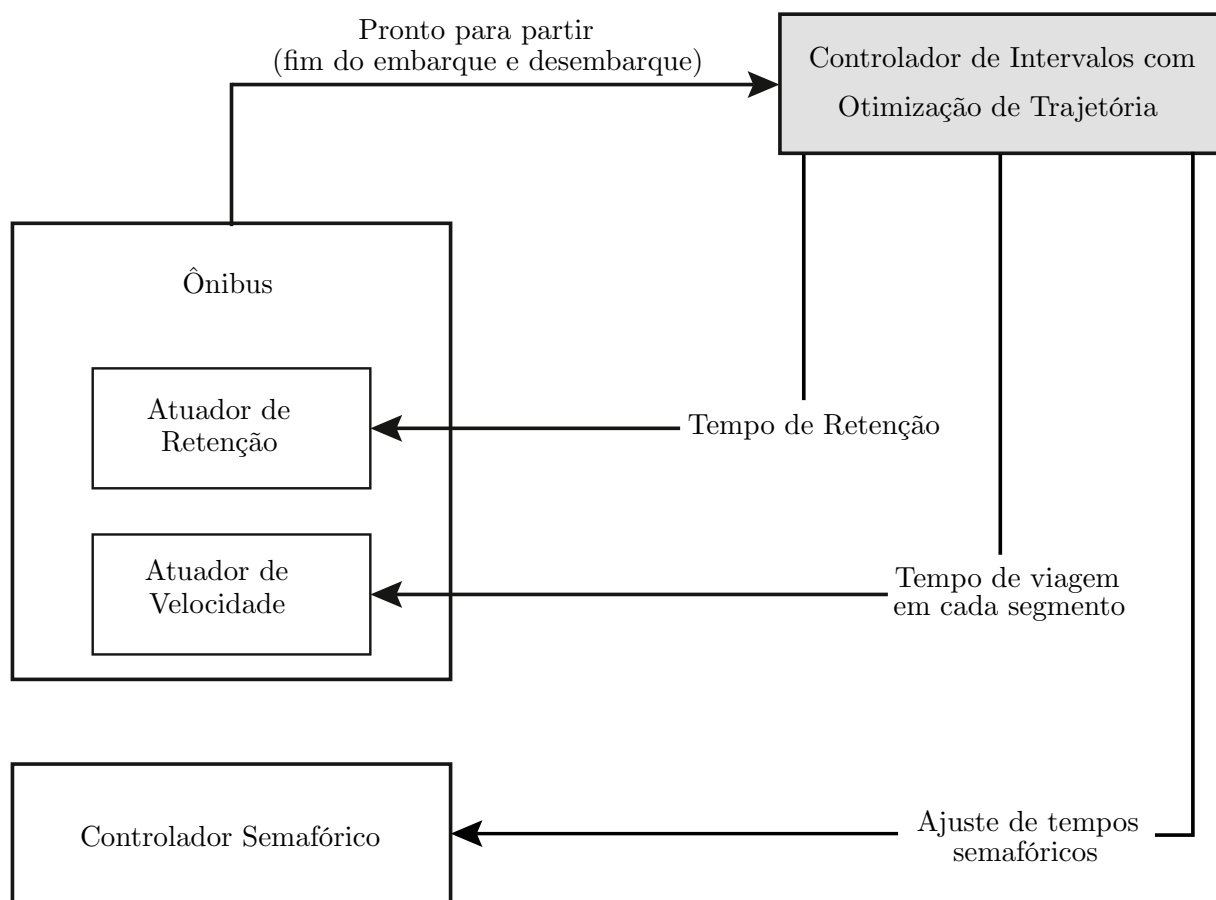


Figura 8 – Esquema do sistema de controle dos ônibus, no qual: “Controlador de Intervalos com Otimização de Trajetória” refere-se ao modelo apresentado neste capítulo; “Ônibus” representa todos os ônibus no sistema, os quais são equipados com um atuador de velocidade e um atuador de retenção; “Controlador Semafórico” estão nos semáforos em cada interseção.

Neste caso, o bloco a ser apresentado nesta seção é o Controlador de Intervalos com Otimização de Trajetória. O modelo que compõe o bloco é apresentado na íntegra abaixo para apresentação das modificações necessárias para integração dos modelos apresentados previamente:

$$\min f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} \left[\frac{\lambda_k}{2} (\hat{d}_{i,k} - \hat{d}_{i-1,k})^2 + (1 - \hat{q}_k) \tilde{l}_{i,k-1} (\hat{s}_{i,k} + \hat{h}_{i,k}) + \tilde{l}_{i,k} \hat{t}_{i,k} \right], \quad (31)$$

sujeito às restrições para definição dos tempos relacionados à parada na estação, dadas para todo $i \in I$ e $k \in N_i$:

$$\hat{a}_{i,k} = \hat{d}_{i,k-1} + \hat{t}_{i,k-1}, \quad (32)$$

$$\hat{s}_{i,k} = \frac{nC_0 + C_1 \lambda_k \left[(\hat{a}_{i,k} - \hat{d}_{i-1,k}) + C_2 \hat{q}_k \hat{l}_{i,k-1} \right]}{(n - C_1 \lambda_k)}, \quad (33)$$

$$\hat{d}_{i,k} = \hat{a}_{i,k} + \hat{s}_{i,k} + \hat{h}_{i,k}, \quad (34)$$

$$\hat{l}_{i,k} = \lambda_k (\hat{d}_{i,k} - \hat{d}_{i-1,k}) + (1 - \hat{q}_k) \hat{l}_{i,k-1}, \quad (35)$$

$$\hat{d}_{i,k} \geq \hat{d}_{i-1,k}, \quad (36)$$

$$0 \leq \hat{h}_{i,k} \leq h_k^{\max}, \quad (37)$$

$$\hat{a}_{i,k}, \hat{s}_{i,k}, \hat{d}_{i,k}, \hat{l}_{i,k} \geq 0, \quad (38)$$

e sujeito às restrições para definição das trajetórias nos segmentos, dadas para todo $i \in I$ e $k \in N_i$:

$$\hat{t}_{i,k} = \sum_{y \in Y_k} \hat{\tau}_{i,k,y} + \sum_{y \in S_k} \hat{\sigma}_{i,k,y}, \quad (39)$$

$$\hat{\alpha}_{i,k,y} = \hat{d}_{i,k} + \sum_{j=1}^{y-1} \hat{\sigma}_{i,k,y} + \sum_{j=1}^y \hat{\tau}_{i,k,y} \quad \forall y \in Y_k, \quad (40)$$

$$\hat{\sigma}_{i,k,y} = \sum_{x \in R_y} (\phi_{k,y,x+1} + \hat{\delta}_{y,x+1} - \hat{\alpha}_{i,k,y}) \hat{b}_{i,k,y,x} \quad \forall y \in S_k, \quad (41)$$

$$\sum_{x \in \Phi_y} \hat{b}_{i,k,y,x} = 1 \quad \forall y \in S_k, \quad (42)$$

$$\hat{\alpha}_{i,k,y} \leq (\phi_{k,y,x+1} + \hat{\delta}_{k,y,x+1}) \hat{b}_{i,k,y,x} + M(1 - \hat{b}_{i,k,y,x}) \quad \forall x \in \Phi_y \quad \forall y \in S_k, \quad (43)$$

$$\hat{\alpha}_{i,k,y} \geq (\phi_{y,x} + \hat{\delta}_{k,y,x}) \hat{b}_{i,k,y,x} \quad \forall x \in \Phi_y \quad \forall y \in S_k, \quad (44)$$

$$\tau_y^{\min} \leq \hat{\tau}_{i,k,y} \leq \tau_y^{\max} \quad \forall y \in Y_k, \quad (45)$$

$$-\delta_y^{\text{ant}} \leq \hat{\delta}_{k,y,x} \leq \delta_y^{\text{pst}} \quad \forall x \in \Phi_y \quad \forall y \in S_k. \quad (46)$$

Por simplicidade, a função objetivo é definida apenas por (31) que é idêntica à (22); entretanto, diferentes objetivos, como aqueles apresentados na Seção 3.3, poderiam ser considerados também para este modelo. Considerando apenas o objetivo (31), é minimizado o tempo de viagem total dos usuários da linha de ônibus controlada, e são negligenciados os atrasos impostos nos semáforos ao restante do tráfego.

O conjunto de restrições (32)–(37) é igual ao conjunto de restrições (23)–(28). A Equação (39) é apresentada para integrar os dois modelos. O tempo de viagem esperado

para cruzar o segmento da estação k , $\hat{t}_{i,k}$, que no modelo da Seção 4.2 era uma variável de decisão independente, agora é uma variável dependente de todo o conjunto de restrições (39)–(46). E as variáveis de decisão independentes passam a ser diretamente: $\hat{h}_{i,k}$ (para Atuador de Retenção), $\hat{\tau}_{i,k,y}$ (para Atuador de Velocidade), e $\hat{\delta}_{k,y,x}$ (para Controlador Semafórico).

O conjunto de restrições (40)–(46) é semelhante ao conjunto de restrições (1), (4)–(9). A diferença é a modificação dos índices das variáveis. Se fez necessário incluir o índice k , indicando a qual estação pertence o segmento, visto que neste modelo, a mesma instância calcula as trajetórias dos ônibus para todos os segmentos das estações no horizonte de predição. As variáveis que utilizam a denotação $\hat{\cdot}$, indicam valores calculados pelo modelo, que não necessariamente serão aplicados ao controle dos ônibus de fato, pois assim como na estratégia apresentada na seção anterior, as informações passadas para os atuadores são apenas aquelas para controle do ônibus que está prestes a partir.

Para cenários em que a mesma linha passa por semáforos no sentido de ida e de volta, é necessário definir que a fase semaforica de um semáforo em um segmento é a mesma fase semaforica do mesmo semáforo, em outro segmento. Assim, o ajuste semaforico em uma fase, automaticamente implica em um ajuste semaforico na outra fase:

$$\hat{\delta}_{k_1,y_1,x} = \hat{\delta}_{k_2,y_2,x} \quad \forall x \in \Phi_{y_1} \quad \forall (k_1,y_1),(k_2,y_2) \in \Omega, \quad (47)$$

em que, Ω é o conjunto de tuplas que identificam quais semáforos são os mesmos fisicamente.

Neste trabalho é considerado que o início de uma fase não pode ser ajustado mais de uma vez:

$$\hat{\delta}_{k,y,x} = 0 \quad \forall (k,y,x) \in \Psi, \quad (48)$$

em que, Ψ é o conjunto que registra as fases que sofreram ajustes em eventos anteriores.

A formulação resultante, apesar de ser da mesma ordem de complexidade daquela em (16), é resolvida para instâncias maiores. A região para trajetórias factíveis cresce, e o número de fases semaforicas na região factível cresce aproximadamente com o quadrado do número de estações no horizonte de predição, $|N_i|$, e para cada fase semaforica é atribuída uma variável binária, $\hat{b}_{i,k,y,x}$. E ainda, a solução do modelo integrado está sujeita ao método iterativo de Koehler, Kraus e Camponogara (2011) que repete a busca do ponto ótimo múltiplas vezes (tipicamente 3 a 4 vezes). Portanto, para aplicações práticas, este modelo pode ficar limitado a poucas estações no horizonte de predição ou não ser aplicável em tempo real. Esta questão é tratada em detalhes na Seção 5.3.

5 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Para avaliar o desempenho do modelo proposto para a regularização de intervalos de sistemas de ônibus foram executados testes em simulador comercial e em simulador próprio. Em simulador comercial, foi modelada e calibrada com dados de campo uma linha de ônibus da Cidade de Quebec, Canadá. Neste experimento o Otimizador de Trajetória é testado aplicado com o controle proporcional de intervalos e comparado com estratégias que utilizam o mesmo método de cálculo mas atuam apenas por retenção ou por retenção com prioridade semafórica.

Em um segundo momento, em um simulador próprio, uma linha de ônibus genérica de operação circular é implementada. Neste experimento o Otimizador de Trajetória é testado confrontando as aplicações com o controle proporcional e com controle preditivo de intervalos. Também são obtidos resultados variando parâmetros dos controladores, provendo um entendimento mais amplo do comportamento destes.

Por fim, o Controlador de Intervalos com Otimização de Trajetória é testado também no simulador próprio, mas suscitando uma discussão enviesada a questões de complexidade computacional, pois o horizonte de predição utilizado para apresentação deste modelo não é aquele que resulta no melhor desempenho, mas sim aquele possível de ser executado em tempo hábil.

5.1 TESTES DA APLICAÇÃO COM CONTROLE PROPORCIONAL DE INTERVALOS

Para teste da aplicação apresentada na Seção 4.1, uma linha de ônibus foi modelada e simulada com o programa de microsimulação Aimsun (TSS, 2017). A Interface para Programação de Aplicações (API) deste programa permite atuar sobre os semáforos, definir tempos de parada e velocidades em tempo real. Os detalhes desta plataforma de simulação bem como a modelagem da linha escolhida são apresentados no Apêndice A.

5.1.1 Cenário de simulação

A linha de ônibus 800, sentido Pointe-de-Sainte-Foy faz parte do sistema de ônibus da Cidade de Quebec, Canadá (Figura 9). Ela opera um itinerário de 25 km com 59 estações e 91 interseções controladas. A partida de ônibus da primeira estação é dada conforme planejado pela agência operadora. A operação é simulada das 6 h às 10 h, para incluir o horário de pico da manhã. Os intervalos entre ônibus no período estudado variam de 5 a 13 minutos, com intervalo médio de 7,8 minutos. A demanda é simulada de acordo com dados operacionais obtidos da agência operadora, e a qualidade da representação computacional desta linha é atestada comparando as trajetórias simuladas com aquelas registradas em GPS pela agência operadora, demonstrada na Seção A.2.



Figura 9 – Linha de ônibus 800, sentido Pointe-de-Sainte-Foy da Cidade de Quebec, Canadá. Os pontos roxos são as estações e os números entre elas são a quantidade de interseções controladas no segmento. Sem número significa um segmento sem semáforo.

Embarque (pax/h)	Station																																																															
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58																																			
6:00 à 7:00	19	5	6	7	8	4	4	6	7	7	4	4	5	8	4	7	8	8	12	36	15	17	11	7	10	7	1	3	7	4	6	15	5	7	5	6	6	4	7	12	3	3	3	3	3	2	1	1	2	2	1	1	1	0	1	3	2	0	0					
7:00 à 8:00	38	11	14	9	10	12	9	8	13	9	9	7	12	18	9	6	13	16	25	75	34	46	29	19	32	21	3	10	12	9	14	29	11	23	23	20	25	20	18	44	11	13	12	9	10	22	3	6	5	5	1	4	3	4	8	10	12	1	0					
8:00 à 9:00	37	7	7	7	8	8	9	7	10	7	5	5	8	13	5	4	10	15	19	71	31	43	28	19	32	15	2	11	12	12	21	54	15	33	29	25	31	25	30	54	16	25	17	11	18	14	5	7	5	4	2	3	8	5	7	8	2	0	0					
9:00 à 10:00	18	5	5	4	5	4	4	4	5	5	2	3	6	11	5	5	6	8	12	50	17	21	16	11	15	7	2	6	7	8	8	29	8	15	12	19	24	14	17	25	8	13	10	7	9	2	3	3	2	2	1	1	2	2	5	5	1	0	0					
Desembarque (%)	Station																																																															
6:00 à 7:00	0	0	0	0	0	0	2	0	9	0	0	12	0	0	0	0	0	0	27	1	31	80	82	47	11	0	63	0	4	0	15	23	54	93	25	14	24	20	13	16	12	24	21	49	75	0	26	13	58	44	17	0	19	38	0	59	11	0	47	34	50	100		
7:00 à 8:00	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	7	0	0	0	24	15	78	0	28	0	17	63	88	92	11	11	76	14	0	47	32	23	39	47	18	63	87	79	70	43	28	66	17	16	32	12	31	36	24	34	23	55	20	31	22	13	20	36	46	56	100			
8:00 à 9:00	0	15	1	25	0	29	17	0	0	0	18	0	2	0	7	0	3	0	9	12	0	9	2	31	34	67	58	0	7	49	12	1	32	15	15	39	31	8	37	41	27	25	79	17	19	14	14	53	17	43	30	25	46	51	45	12	31	14	30	39	42	34	51	100
9:00 à 10:00	0	0	0	0	0	14	14	12	18	0	0	0	35	15	0	4	13	3	0	8	2	52	56	99	92	0	5	16	0	2	26	79	11	68	25	53	59	30	34	36	58	26	20	75	35	2	0	35	23	52	59	14	22	15	11	45	0	40	29	24	24	100		

Figura 10 – Estimativa de demanda e fração de passageiros a bordo que desembarcam em cada estação da Linha 800, Cidade de Quebec, Canadá.

As taxas de chegada de passageiros por hora são a média de distribuições de Poisson, enquanto a fração de passageiros que desembarcam é normalmente distribuída com um desvio padrão igual à metade da média (Figura 10). Os parâmetros da simulação são detalhados na Seção A.2.

5.1.2 Estratégias simuladas

Para avaliar o desempenho da otimização de trajetória proposta aplicada com o controle proporcional de intervalos (FH.T - *Forward Headway - Trajectory*), também são simulados o caso sem controle de intervalos e duas outras estratégias com o mesmo método de controle de intervalos, mas uma atua apenas com retenção nas estações, e outra com retenção nas estações e TSP.

No caso sem controle (NOC - *No Control*), os ônibus circulam livremente, saindo das estações assim que o processo de desembarque/embarque termina. Nenhuma ação é tomada para evitar o pareamento ou para conceder prioridade semafórica. No caso de controle por retenção (FH.H - *Forward Headway - Holding*), os ônibus são controlados apenas nas estações, e retidos, se necessário, após o processo de desembarque/embarque. Nenhum TSP ou controle de velocidade é aplicado. O tempo de retenção é obtido diretamente de (17), em que todo o tempo de regulagem é aplicado como retenção, ou seja, $h_{i,k} = r_{i,k}$, e apenas valores positivos são considerados. A Equação (10) é aplicada para restringir o tempo máximo de retenção. O caso de retenção mais TSP (FH.P - *Forward Headway - Priority*) usa a mesma estratégia de controle de intervalos que o FH.H, mas também

concede verde em cada interseção controlada para o primeiro ônibus que chega em cada ciclo semafórico, respeitando a restrição (9).

Para NOC, FH.H e FH.P a velocidade dos ônibus quando em movimento é sempre a velocidade máxima permitida no corredor de ônibus. Para FH.T, $\hat{t}_{i,k}$ é limitado por $\bar{t}_{i,k} \pm 40$ s; para todas as estratégias h_k^{\max} é definido como 40 s; δ_y^{ant} e δ_y^{pst} são definidos como 20 s; e K_c é definido como 0,7. Todas as demais variáveis de entrada apresentadas na formulação do problema são obtidas diretamente da simulação.

5.1.3 Síntese dos Resultados

Os resultados estão resumidos na Tabela 2 e mostram que a estratégia de controle FH.T, que inclui otimização de trajetória, teve um desempenho consideravelmente melhor do que os outros casos controlados (FH.H e FH.P) e o caso não controlado (NOC). As chegadas pontuais representaram 83% no FH.T e 50% no FH.H e FH.P. Para tanto, o uso de ajustes semafóricos do FH.T foi quase o dobro daquele usado pelo FH.P. Existe distinção no perfil do tempo de viagem dos ônibus, dependendo da estratégia de controle adotada. Em particular, o FH.T apresentou tempos de retenção quase nulos e tempos de espera em sinal vermelho significativamente reduzidos, o que resultou em quase todo o tempo de viagem sendo preenchido por tempo em movimento.

5.1.4 Detalhamento dos Resultados de Simulação

Devido à estocasticidade na demanda e nas características dos ônibus, os resultados são baseados na média de 10 replicações. Isso resultou em 240 viagens de ônibus completas, que desencadearam 15.340 decisões de controle de intervalo (toda vez que um ônibus para em qualquer estação). A Tabela 2 resume o desempenho de todos os casos simulados.

Tabela 2 – Desempenho de todos os casos simulados para a linha 800.

Critérios de desempenho	NOC	FH.H	FH.P	FH.T
Desvios absolutos de intervalo (min)	3.2	0.6	0.4	0.2
Ajustes semafóricos absolutos (s)	-	-	0.9	1.6
Retenções por viagem (min)	-	3.7	5.2	0.7
Velocidades comerciais (km/h)	21.5	19.7	21.6	22.3

Os desvios absolutos de intervalo são obtidos pela média aritmética da diferença absoluta entre o intervalo planejado e o intervalo observado, sempre medido nas estações, antes da retenção. O FH.T teve um desempenho consideravelmente melhor do que os outros casos controlados (FH.H e FH.P), e todos eles tiveram um desempenho melhor do que o caso não controlado (NOC). Histogramas de todos os desvios de intervalo observados são apresentados na Figura 11. Na figura, o resultado do caso não controlado (NOC) demonstra a dificuldade dos ônibus em manter o intervalo regular sem a presença de

um controlador. São mais frequentes os intervalos com desvios superiores a ± 5 minutos do que os intervalos pontuais (desvio inferior a ± 15 s). FH.H e FH.P apresentaram aproximadamente 50% dos intervalos pontuais, enquanto FH.T apresentou 83% dos intervalos pontuais. Notavelmente, 95% dos intervalos estão dentro de 0,57 min de desvio no FH.T, e dentro de 2,28 min no FH.H e dentro de 1,44 min no FH.P. Uma adaptação que aumentaria a eficiência do FH.H na prevenção de grandes atrasos seria adotar um tempo limite (ver Seção 2.1), normalmente aplicado para aumentar a controlabilidade. No entanto, um tempo limite deterioraria significativamente a velocidade comercial.

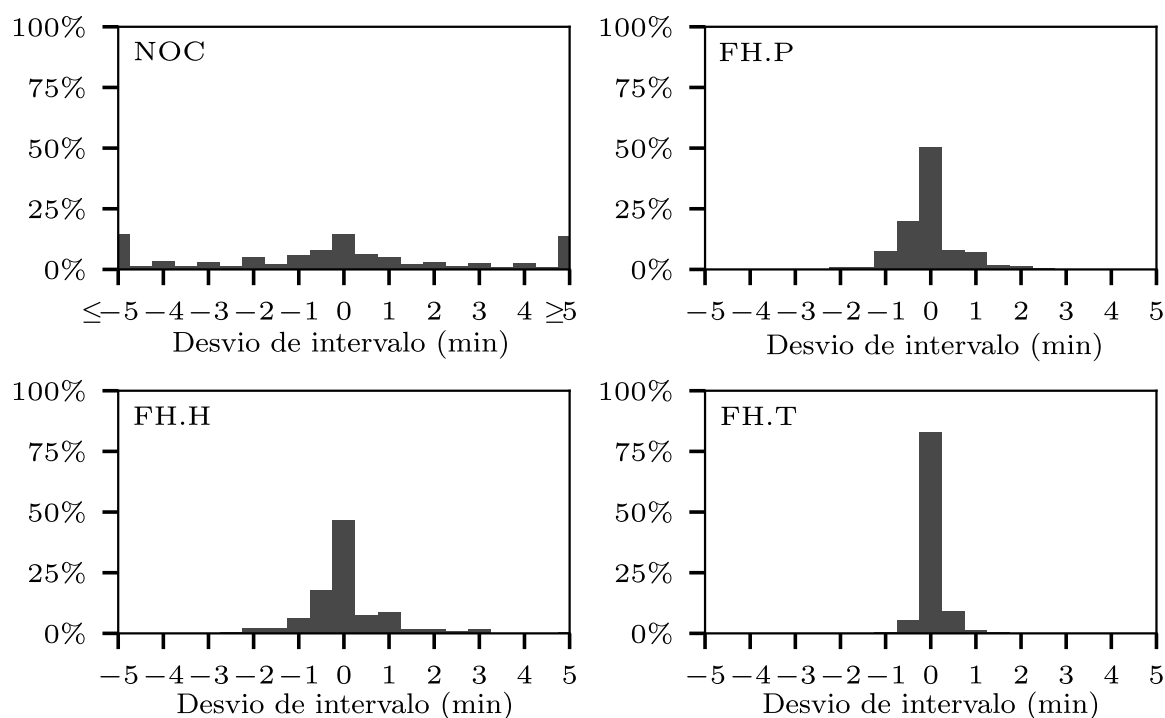


Figura 11 – Histograma dos desvios de intervalos observados nas estações para cada caso simulado. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória.

Os ajustes semafóricos absolutos, apresentados na Tabela 2 para os dois casos que usam TSP e TSC, é dado pela média dos tempos de ajuste semafórico absoluto por interseção por ciclo. FH.T usou quase o dobro do tempo de ajuste semafórico usado por FH.P, principalmente por causa do controle de velocidade, o que dá ao FH.T uma chance maior de alcançar interseções dentro dos limites de ajustes de semáforo do que ao FH.P. Além disso, o FH.T também tem permissão para ajustar fases para atrasar os ônibus, embora tal atuação represente apenas 1% de todas as atuações semafóricas.

O ajuste médio de 1,6 s no caso do FH.T corresponde a 1,3% de um tempo de ciclo de 120 s. Sendo ele um ajuste de valor baixo, incapaz de causar perturbações significativas no restante do tráfego, e ainda de fácil compensação nos tempos das demais aproximações da interseção.

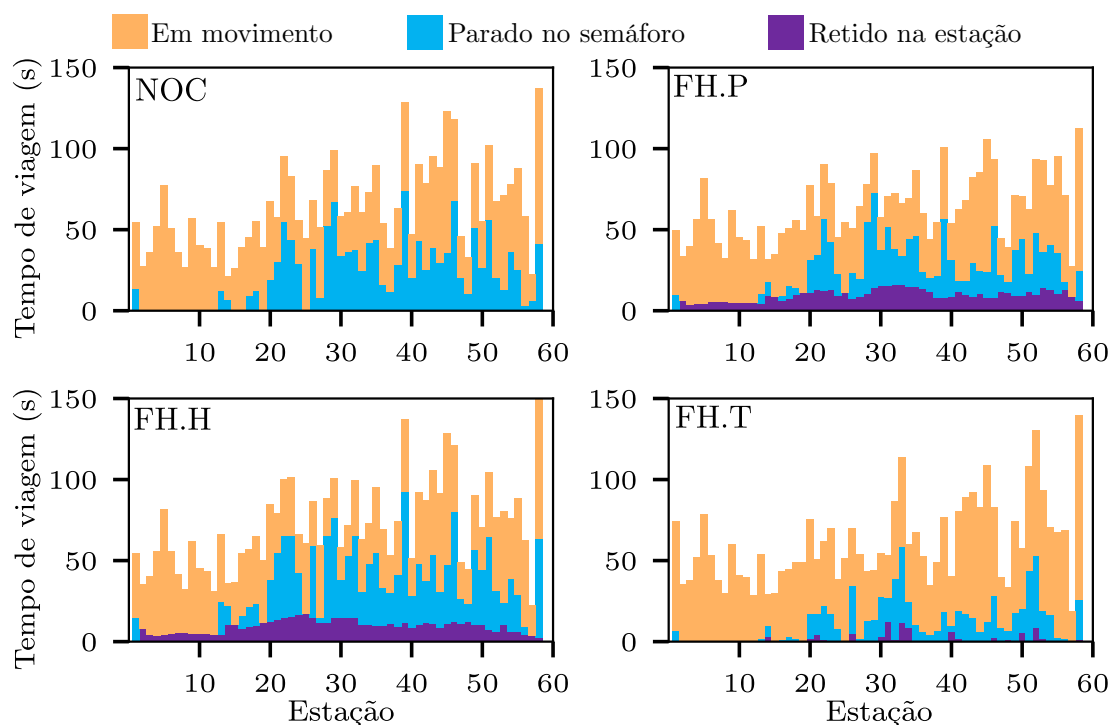


Figura 12 – Composição do tempo médio de viagem no segmento de cada estação. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória.

A Figura 12 apresenta a composição do tempo médio de viagem em cada segmento entre duas estações. As barras que indicam o tempo em movimento são aproximadamente iguais para NOC, FH.H e FH.P, uma vez que nenhum controle de velocidade é aplicado nesses casos. Comparando as áreas desses gráficos, a composição mais alaranjada do FH.T indica que os ônibus passaram a maior parte do tempo de viagem em movimento ao invés de parados. O tempo de movimento é o mais alto para o FH.T, enquanto o tempo parado nos semáforos é o mais baixo em geral, e o tempo de retenção é o mais baixo entre os casos controlados.

As retenções por viagem, apresentada na Tabela 2 para os três casos que usam retenção, destaca que o FH.T aplicou significativamente menos retenção do que FH.H e FH.P. Isso se deve à precedência da minimização da retenção nas estações sobre a minimização de atraso nas interseções (ver Equação (16)). A Figura 12 também apresenta a quantidade média de retenção aplicada em cada estação. Tanto o FH.T quanto o FH.H mostram uma redução na necessidade de aplicação de retenção à medida que os ônibus avançam ao longo do itinerário, apesar de terem valores totais de retenção muito diferentes. Isso indica que nestes casos está ocorrendo uma estabilização dos tempos de intervalo, enquanto FH.P não apresenta tal redução.

A velocidade comercial apresentada na Tabela 2 é obtida dividindo-se o compri-

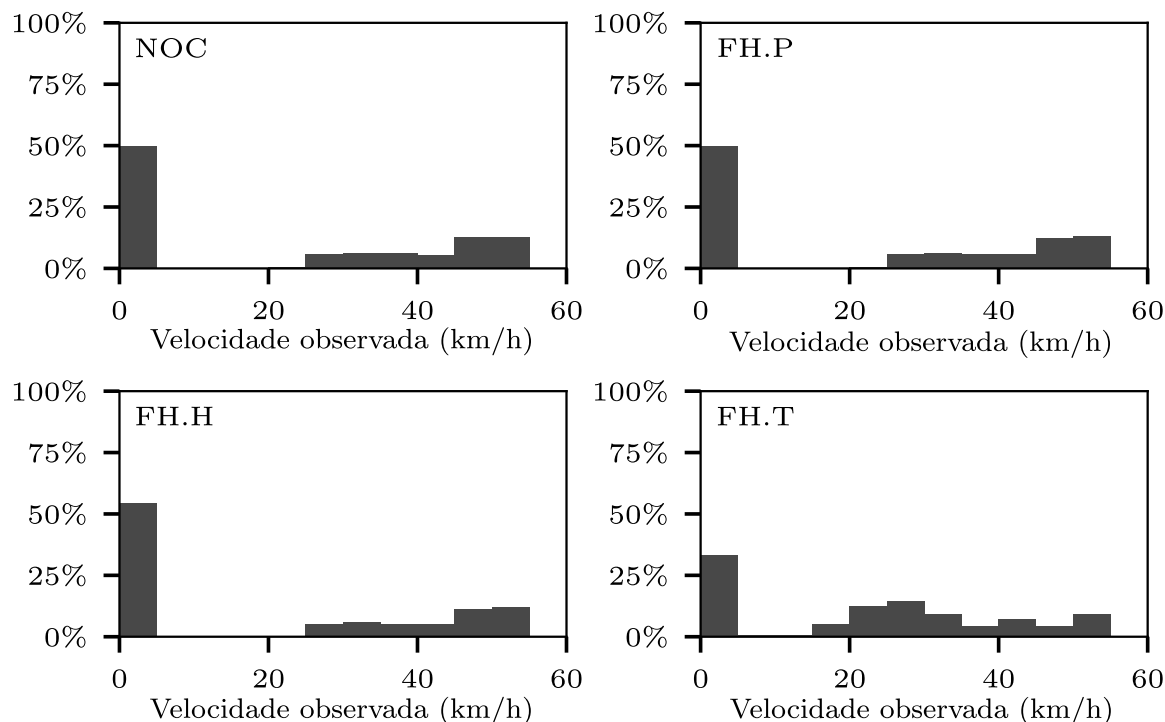


Figura 13 – Histogramas das velocidades observadas para todos os casos simulados; a velocidade instantânea de cada ônibus foi medida a cada 10 segundos. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória.

mento do itinerário da linha pelo tempo que um ônibus leva para completá-la. O caso FH.T apresentou a maior velocidade comercial, ainda maior que a NOC, mostrando que o adiantamento permitido pela TSC mais do que compensou o atraso causado pela retenção, controle de velocidade e retenção nos semáforos. O caso FH.P apresentou velocidade comercial semelhante ao NOC, enquanto FH.H, que só pode controlar os intervalos atrasando os ônibus, apresentou a menor velocidade comercial.

A Figura 13 apresenta os histogramas das velocidades observadas. É evidente que os ônibus tiveram velocidades semelhantes enquanto em movimento (velocidade maior que 0) nos casos NOC, FH.H e FH.P, uma vez que o controle de velocidade não é aplicado. O que explica a diferença entre esses casos em relação à velocidade comercial é o tempo que os ônibus ficaram parados (primeira barra de cada histograma). O FH.H foi aquele que manteve os ônibus parados por mais tempo. Devido ao controle de velocidade do ônibus, o caso FH.T apresentou um histograma diferente, com velocidades mais baixas e uma quantidade significativamente menor de tempo parado. O histograma apresentado pelo FH.T é provavelmente o mais desejável, pois afeta positivamente a percepção de tempo dos passageiros, que se importunam mais com o tempo que o ônibus passa parado do que com o tempo que passa em movimento (CEDER, 2007; CARREL *et al.*, 2016).

5.2 TESTES DA APLICAÇÃO COM CONTROLE PREDITIVO DE INTERVALOS

Para teste da aplicação apresentada na Seção 4.2, um simulador próprio foi desenvolvido posteriormente ao domínio da ferramenta Aimsun. Os benefícios são: ser computacionalmente mais eficiente que o simulador comercial (por ser um simulador específico para essa tarefa), implementar cenários de linhas de ônibus circulares e mais rapidamente (o Aimsun não aceita linhas circulares, os cenários precisam ser desenhados, e parâmetros irrelevantes para este estudo precisam ser definidos), o acesso irrestrito às informações resultantes da simulação (o acesso de variáveis no Aimsun é limitado àquelas implementadas na API por seus desenvolvedores). Para esse estudo, decidiu-se por um simulador orientado a evento (CATS *et al.*, 2010) (o passo de simulação é dado toda a vez que um ônibus chega à uma estação) diferentemente do Aimsun, que é orientado a tempo (o passo ocorre a cada 0,8 s). Esta mudança também garante a diminuição no tempo de execução das replicações, sem comprometer a qualidade do teste. O simulador próprio é apresentado em detalhes no Apêndice B.

5.2.1 Cenário de simulação

Uma linha de ônibus genérica, projetada para testar o Otimizador de Trajetória aplicado com diferentes métodos de controle de intervalos, foi implementada no simulador desenvolvido. São 10 estações igualmente espaçadas em um itinerário de 20 km, ou seja com 2 km entre estações. A Figura Figura 14 ilustra este cenário.

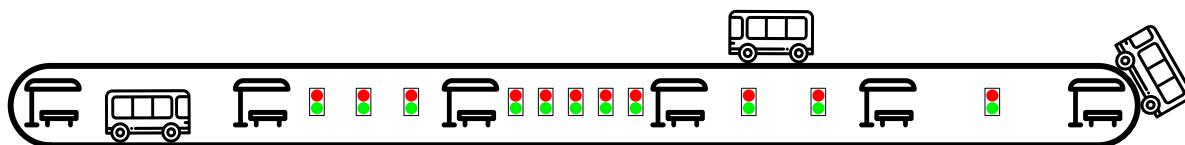


Figura 14 – Cenário implementado para testes no simulador desenvolvido. Os símbolos vermelho e verde entre estações identificam a presença de semáforos.

O itinerário começa na estação mais à esquerda da figura, passando por um segmento sem semáforos, seguindo para um segmento com três semáforos, cinco semáforos, dois semáforos, um semáforo, chegando à sexta estação (mais à direita na figura), de onde o ônibus retorna pela pista de sentido contrário a que foi, parando novamente em todas as estações e cruzando as mesmas interseções da ida. A volta termina no instante em que este chega na estação mais à esquerda novamente, completando o itinerário de 10 estações, 20 km, e 22 semáforos. O instante de chegada na estação mais à esquerda define o início da volta seguinte. No caso sem controle, não há controle de intervalo algum, inclusive no início de uma nova volta. A distribuição de semáforos ao longo do itinerário foi determinada para testar o Otimizador de Trajetória em diferentes situações, variando de zero à cinco semáforos por segmento. Em cada segmento todos os semáforos são equidistantes. Todos

os semáforos são atuados pelos ônibus, cada semáforo permite uma atuação por ciclo, independente do sentido do ônibus.

Os valores médios de taxas de chegada de passageiros às estações e os valores médios da fração de passageiros que desembarcam são uniformes ao longo do itinerário. Em todas as estações chegam, em média, 180 pax/h e desembarcam, em média, 15% dos embarcados. A chegada de usuários à estação segue uma distribuição exponencial de média 180, e a taxa de desembarque efetiva é obtida de uma distribuição normal de média 15% e desvio padrão de metade da média (processo detalhado na Seção B.2.3). O longo espaçamento entre estações e as altas taxas de chegada de passageiros foram escolhidos para caracterizar um sistema BRT de alta capacidade (ALPKOKIN; ERGUN, 2012). A velocidade máxima permitida é 45 km/h. Os demais parâmetros deste cenário são apresentados na Seção B.2.1.

A simulação desse cenário sem nenhum tipo de controle de intervalos apresenta um intervalo médio entre os ônibus de 3,2 minutos e ocupação média dos ônibus de 61 passageiros. Cada replicação simula a operação deste cenário ao longo de 2 horas.

5.2.2 Estratégias simuladas

Neste cenário poderão ser comparadas as aplicações da otimização de trajetória com o controle proporcional (FH.T) e com o controle preditivo (OPT.T - *Optimal Predictive Control - Trajectory*). Também são apresentados os casos sem controle (NOC), controle proporcional por retenção (FH.H), controle proporcional por retenção mais TSP (FH.P), e controle preditivo por retenção (OPT.H).

O OPT.T trata da implementação do modelo apresentado na Seção 4.2. Já o OPT.H utiliza o mesmo modelo de controle de intervalos que o OPT.T, porém $\hat{t}_{i,k}$ deixa de ser uma variável de decisão e passa a ser um parâmetro, pré-calculado, como explicado na Seção B.2.2. A atuação, por sua vez, ocorre apenas por retenção aplicando o valor de $\hat{h}_{i,k}$ obtido pela otimização. Os demais controles são implementados da mesma forma como descritos na Seção 5.1.2, a não ser pelos parâmetros δ_y^{ant} e δ_y^{pst} que neste cenário são definidos como 10 s.

O ganho proporcional, K_c , dos controles proporcionais, FH.H, FH.P e FH.T, é definido como 0,7. O horizonte de predição do controle preditivo OPT.H é definido em 8 estações e do OPT.T em 10 estações. Esses valores foram selecionados por serem aqueles que fornecem melhores resultados na intenção de manter o equilíbrio entre a regularidade de serviço e a velocidade da operação. O resultado de simulações considerando diferentes valores para K_c e para diferentes horizontes de predição é apresentado na Seção 5.2.6, cabendo lá uma discussão mais ampla sobre o ajuste destes parâmetros.

5.2.3 Síntese dos resultados

A Tabela 3 resume o desempenho de todos os casos simulados, mostrando que todas as estratégias de controle apresentaram desvios de intervalos consideravelmente menores em comparação ao caso não controlado (NOC), no critério de desvio absoluto de intervalo, medido em relação ao intervalo médio. Destaca-se o desempenho dos casos FH.H, FH.P e FH.T que utilizaram diferentes formas de atuação, mas têm em comum o uso do método FH, visando à manutenção estrita do intervalo planejado, e apresentaram a melhor regularidade de intervalos, com aproximadamente 30% dos intervalos estritamente pontuais. Os casos que utilizaram o método de cálculo OPT, que busca minimizar o tempo de viagem dos usuários, e não a regularização dos intervalos, mantiveram menor regularidade de intervalos, mas apresentaram as maiores velocidades comerciais, o que está em concordância com seu objetivo de minimização do tempo total de viagem. Os ajustes semafóricos absolutos indicaram que quanto mais complexa a estratégia dentre as que envolve atuação semafórica, maior o uso de controle semafórico. Portanto, o OPT.T atuou mais do que o FH.T, que por sua vez atuou mais do que o FH.

5.2.4 Detalhamento dos Resultados de Simulação

Os resultados seguintes são baseados na média de 12 replicações, totalizando 24 horas de operação. Isso resultou em 312 viagens completas, que desencadearam 4.440 decisões de controle de intervalo (toda vez que um ônibus para em qualquer estação). A Tabela 3 resume o desempenho de todos os casos simulados.

Tabela 3 – Desempenho de todos os casos simulados no cenário base.

Crítérios de desempenho	NOC	FH.H	FH.P	FH.T	OPT.H	OPT.T
Desvios absolutos de intervalo (min)	2.3	0.6	0.5	0.5	0.8	0.9
Ajustes semafóricos absolutos (s)	-	-	0.9	2.0	-	3.0
Retenções por viagem (min)	-	1.9	2.0	0.0	1.4	0.0
Velocidades comerciais (km/h)	36.5	34.0	35.1	35.2	34.5	36.6
Intervalo médio (min)	3.2	3.5	3.4	3.4	3.5	3.3

No critério de desvio absoluto de intervalo, que aqui é medido em relação ao intervalo médio, todas as estratégias de controle apresentaram desvios de intervalos consideravelmente menor do que o caso sem controle (NOC). Destaca-se o FH.H, o FH.P e o FH.T que, embora utilizem diferentes formas de atuação, têm em comum o uso do método FH que tem como objetivo a manutenção estrita do intervalo planejado. Histogramas de todos os desvios de intervalo observados são apresentados na Figura 15. Na figura, o resultado do caso não controlado (NOC) demonstra a dificuldade dos ônibus em manter o intervalo regular sem a presença de um controlador. Os casos FH foram aqueles que obtiveram melhor regularidade de intervalos, todos apresentando aproximadamente 30%

dos intervalos estritamente pontuais (desvio inferior a ± 15 s). O método de cálculo OPT busca minimizar o tempo de viagem dos usuários, e não a regularização dos intervalos diretamente, e assim, tanto o OPT.H quanto o OPT.T, mantiveram menor regularidade de intervalos.

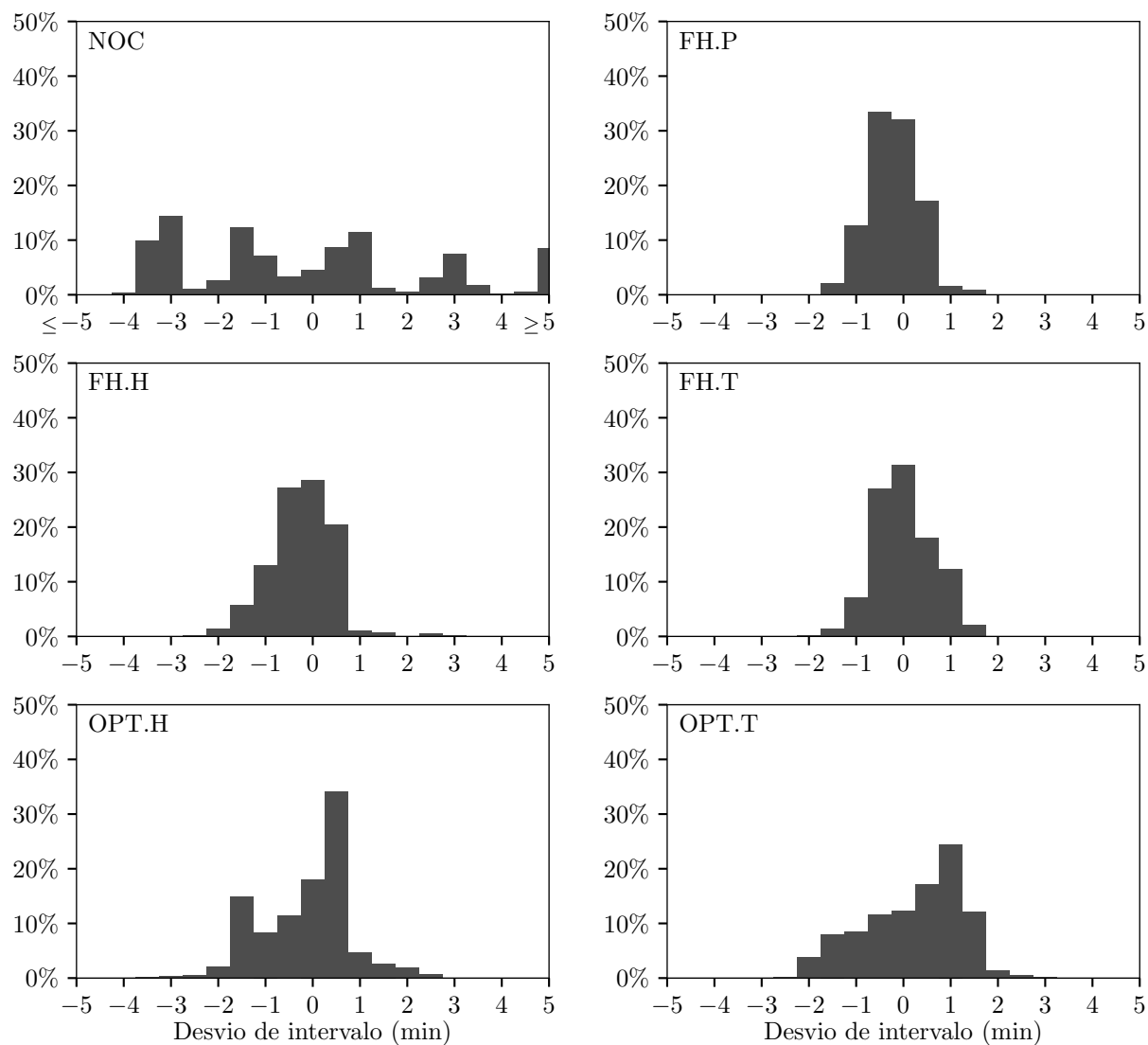


Figura 15 – Histograma dos desvios de intervalos observados nas estações para cada caso simulado no cenário base. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.

Os ajustes semaforicos absolutos, apresentados na Tabela 3 para os três casos que usam TSP ou TSC, indica que quanto mais complexo o método de atuação semaforica, maior o uso de controle semaforico. A otimização de trajetória, tanto aplicada em FH.T quanto em OPT.T usou mais desta atuação em relação ao FH.P, devido ao controle de velocidade, o que dá à eles uma chance maior de alcançar interseções dentro dos limites

de ajustes de semáforo do que ao FH.P. O OPT.T para além do controle de velocidade, tem como objetivo a minimização do tempo de viagem dos passageiros, o que justifica o uso de mais prioridade semaforica.

A Figura 16 apresenta a composição do tempo médio de viagem em cada segmento entre duas estações. As barras que indicam o tempo em movimento são aproximadamente iguais para NOC, FH.H, FH.P e OPT.H, uma vez que nenhum controle de velocidade é aplicado nesses casos. Comparando as áreas desses gráficos, a composição completamente alaranjada do FH.T e OPT.T indica que os ônibus estavam em movimento durante praticamente todo o tempo no segmento, sem parada por retenção e praticamente sem paradas semaforicas. O OPT.T, que tem o objetivo de diminuir o tempo de viagem dos usuários, conseguiu elevar a velocidade dos ônibus, baixando o tempo médio em movimento em quase todos os segmentos em relação ao FH.T (menos nos segmentos das estações 0 e 9, onde não há semáforos).

A média das retenções por viagem, apresentada na Tabela 3 para os cinco casos que usam retenção, destaca que o FH.T e o OPT.T não usaram nenhuma retenção. Isso se deve à precedência da minimização da retenção nas estações sobre a minimização de atraso nas interseções em (16). A Figura 16 também apresenta a quantidade média de retenção aplicada em cada estação, o OPT.H foi a estratégia que menos precisou atuar na retenção dos ônibus para cumprir seus objetivos.

A velocidade comercial apresentada na Tabela 3 mostra que o OPT.T teve a maior velocidade comercial, e foi o único superior à velocidade do NOC. O FH.T teve velocidade comercial 1,4 km/h abaixo da alcançada pelo OPT.T, se assemelhando mais ao FH.P neste critério. Nota-se portanto, que o FH.P, mesmo aplicando retenção e concedendo menos prioridade semaforica, teve velocidade praticamente igual ao FH.T por não reduzir a velocidade dos ônibus.

A Figura 17 apresenta os histogramas das velocidades observadas. É evidente que os ônibus tiveram velocidades semelhantes enquanto em movimento (velocidade maior que 0) nos casos NOC, FH.H, FH.P e OPT.H, uma vez que o controle de velocidade não é aplicado. O que explica a diferença entre esses casos em relação à velocidade comercial (apresentada na Tabela 3) é o tempo que os ônibus ficaram parados (primeira barra de cada histograma). O FH.H e o OPT.H foram aqueles que mantiveram os ônibus parados por mais tempo. O FH.T e o OPT.T apresentaram histogramas diferentes, com velocidades observadas mais baixas, devido ao controle de velocidade, e uma quantidade significativamente menor de tempo parado, devido à prioridade semaforica e a não utilização de retenção. O OPT.T, com o objetivo de acelerar a operação, encontrou trajetórias capazes de impedir paradas com velocidades mais próximas à velocidade máxima, apresentando uma velocidade comercial destacada dos demais casos.

O intervalo médio, apresentado na Tabela 3, é a média de todos os intervalos entre ônibus observados nas estações, e demonstra como os atrasos adicionados pelo controle da

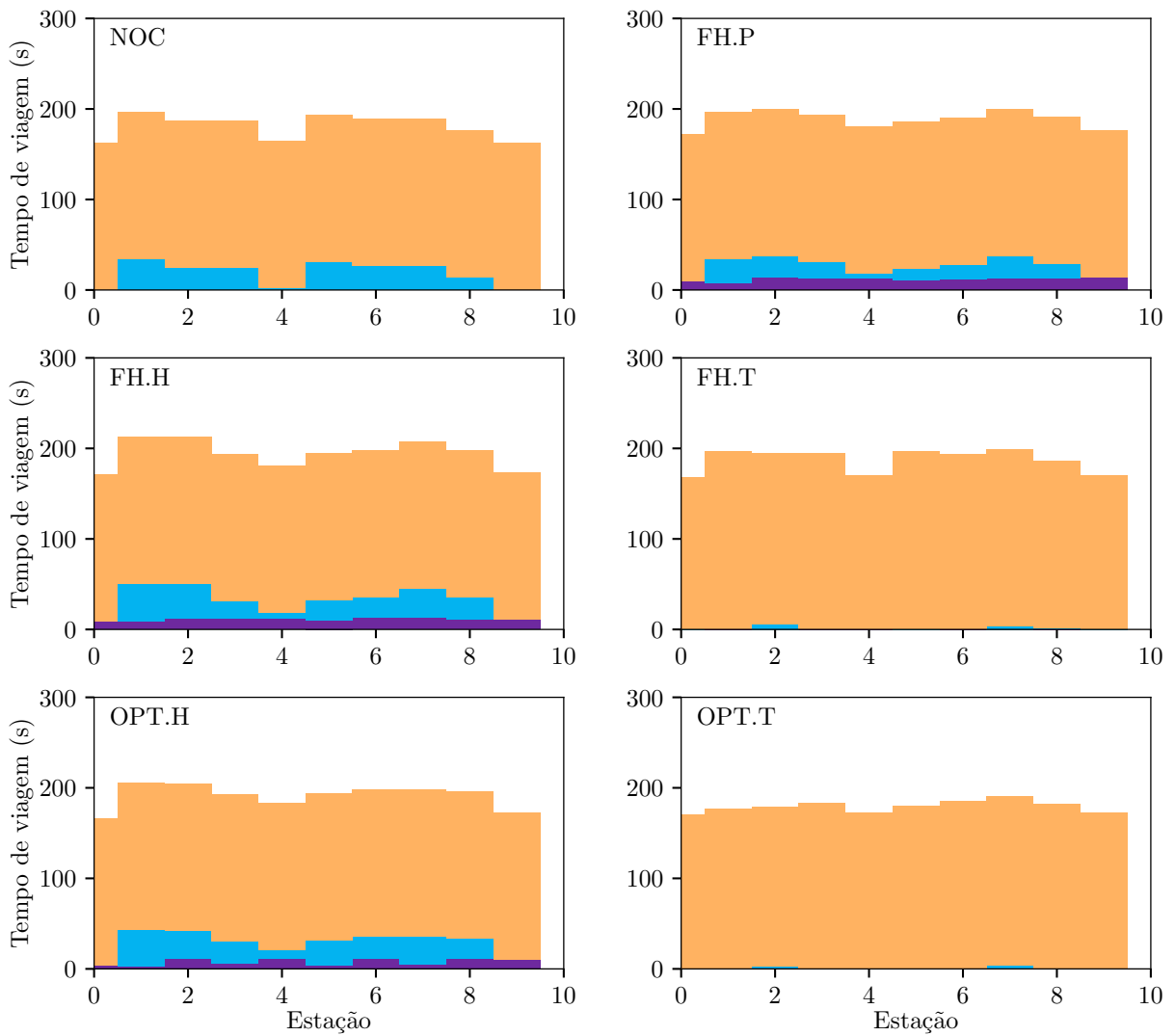


Figura 16 – Composição do tempo médio de viagem no segmento de cada estação para cada caso simulado no cenário base. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.

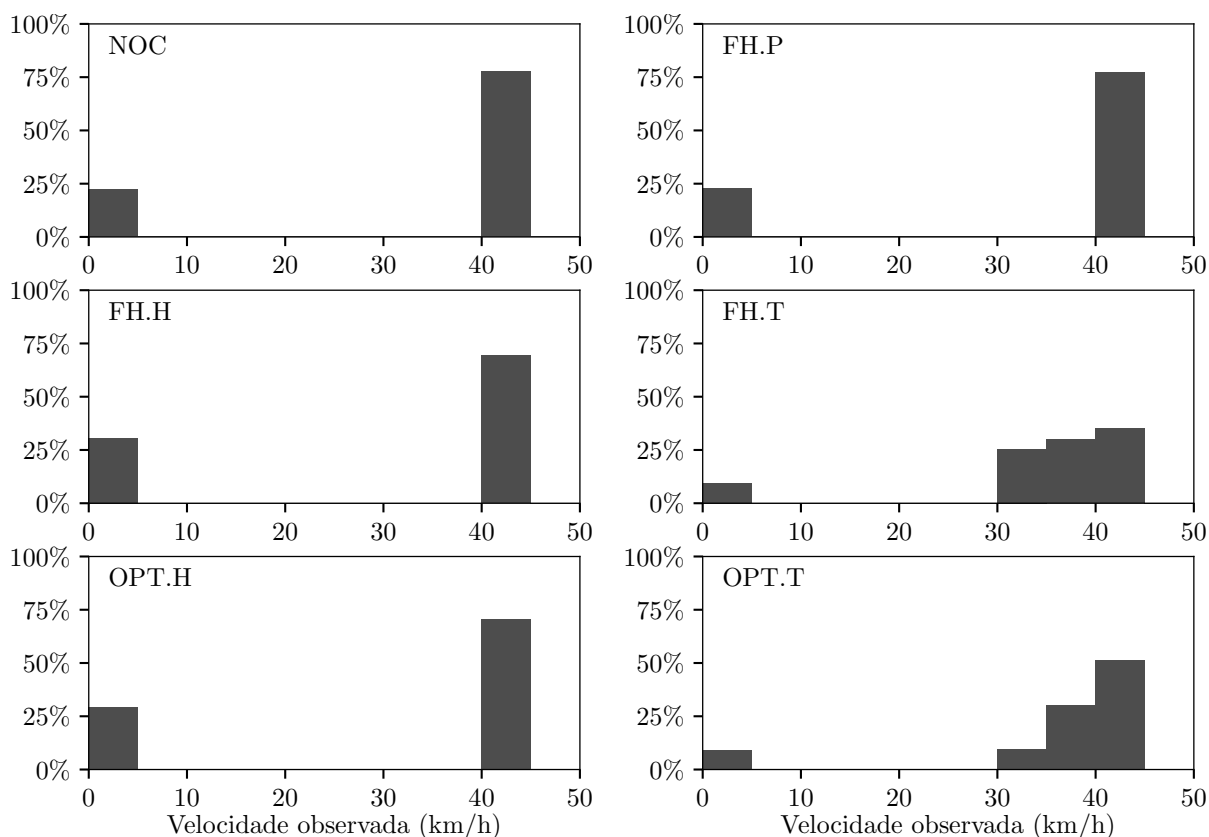


Figura 17 – Histogramas das velocidades observadas para cada caso simulado no cenário base; a velocidade instantânea de cada ônibus foi medida a cada 10 segundos. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.

operação influenciam no intervalo nominal da operação. Os casos que controlam a operação apenas atrasando os veículos adiantados, FH.H e OPT.H, foram os que apresentaram maior aumento de intervalo médio; 0,29 min do FH.H em relação ao NOC. Enquanto o caso que apresentou maior velocidade comercial, OPT.T, aumentou 0,04 min. O intervalo de variação desses valores observados aqui, acredita-se, causa uma variação insignificante na experiência dos usuários.

A Figura 18 apresenta os gráficos de marcha, isto é, as trajetórias de cada ônibus ao longo de toda a operação de uma replicação selecionada, para cada caso simulado. Os principais detalhes a serem reparados nesses gráficos são a inclinação das linhas, que indicam a velocidade da operação; as distâncias entre elas, que indicam a regularidade de intervalos ao longo da operação; e a proporção de trechos horizontais nas linhas de trajetória, indicando a proporção de tempo parado despendido pelos ônibus. Todos os gráficos apresentados são gerados com a mesma replicação, variando apenas a estratégia de controle utilizada.

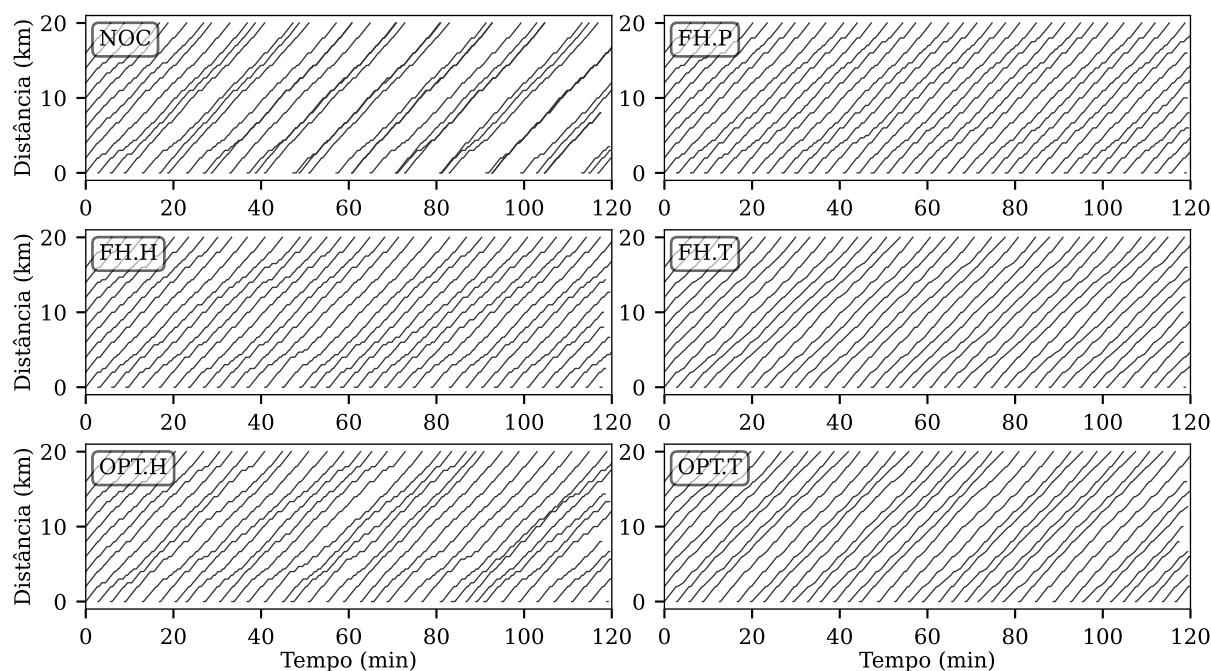


Figura 18 – Gráficos de marcha de uma replicação selecionada para cada caso simulado no cenário base. NOC significa caso não controlado, FH indica o uso de controle proporcional, sendo FH.H a atuação por retenção, FH.P a atuação por retenção e TSP, e FH.T a aplicação com otimização de trajetória; OPT indica o uso de controle preditivo, sendo OPT.H a atuação por retenção e OPT.T a aplicação com otimização de trajetória.

O caso NOC apresenta uma rápida e progressiva deterioração da operação, com pareamento dos ônibus ocorrendo a partir de 30 min de simulação e perdurando por todo o tempo de simulação. Todos os casos em que há controle de intervalos se mantiveram com regularidade aproximadamente constante ao longo da operação, em alguns casos mais regulares em outros menos. Mais paradas são observadas nos casos em que não há otimização de trajetória, FH.P, FH.H e OPT.H, enquanto que nos casos FH.T e OPT.T, o que se observa são inclinações variadas ao longo de cada trajetória, indicando o uso do controle de velocidade para evitar paradas.

De modo geral, o controle preditivo de intervalos, quando aplicado com a otimização de trajetória, OPT.T, apresentou o melhor desempenho, a velocidade comercial mais alta com regularidade de intervalos satisfatória. O Otimizador de Trajetória, aplicado com qualquer um dos controles de intervalo, garantiu um aumento da regularidade dos intervalos e da velocidade comercial, comparativamente à atuação clássica por retenção.

O tempo computacional daqueles casos que utilizam o *solver* foi, para cada evento em média, 0,06 s para o FH.T, 0,05 s para o OPT.H, e 0,12 s para o OPT.T. Todos executados em um processador Intel i7-9700K de 3.6 GHz, e 32 GB de memória RAM.

5.2.5 Discussão dos resultados do simulador próprio em relação aos resultados do simulador comercial

Em relação ao cenário implementado no simulador comercial, a linha 800 da cidade de Quebec, Canadá, o cenário base apresentado nesta seção possui as estações e semáforos mais espaçados (10 estações e 22 semáforos em um trajeto de 20 km aqui, contra 59 estações e 91 semáforos em um trajeto de 25 km lá). A operação aqui ocorre com intervalo menor (3,2 contra 7,8) para atender uma demanda que é constante e uniforme ao longo do itinerário, diferentemente de lá.

Analisando ambos resultados obtidos na simulação do caso sem controle (NOC), observa-se a influência das características do cenário e do simulador utilizado. O desvio de intervalos lá é maior que aqui, porém quando visto proporcionalmente em relação ao intervalo médio, o desvio médio lá era de 28% e o desvio médio aqui é de 69%. Essa diferença é explicada, principalmente, pelo itinerário circular, utilizado aqui, sem nenhum controle de intervalo no início de uma nova volta, causando o acúmulo dos desvios de intervalo ao longo da operação, como mostra a Figura 18, enquanto lá, cada viagem iniciava no horário programado, sem desvio de intervalo.

Nas Figuras 11 e 15, os resultados apresentados pelo FH.T mostram que, apesar do desempenho satisfatório em regularizar os intervalos em ambos os cenários, lá a regularização foi mais precisa, atingindo 83% de intervalos estritamente pontuais, enquanto aqui a mesma estratégia atingiu 31% de intervalos estritamente pontuais. Este efeito é explicado, em grande parte, pela diferença nos parâmetros δ_y^{ant} e δ_y^{pst} que lá era 20 s e aqui 10 s. Com maior espaço para ajustes semafóricos, a otimização de trajetória é capaz de diminuir o erro no instante de chegada do ônibus ao fim do segmento, em relação ao instante alvo de chegada. A diferença entre estes dois histogramas motivou a análise de variação dos parâmetros δ_y^{ant} e δ_y^{pst} , que será apresentada na Seção 5.2.7.

O caso FH.P apresentou lá, dificuldade de regularizar os intervalos, gerando a necessidade do controlador atuar intensamente ao longo de toda a operação. Caso este mesmo efeito fosse observado aqui no cenário base, estaria demonstrado no valor de retenções por viagem, na Tabela 3. O que se observou foi uma retenção semelhante a do caso FH.H, indicando que neste cenário, a presença de prioridade semafórica não causou tal efeito.

Uma diferença nos resultados causada pelo uso de diferentes simuladores pode ser observada comparando as Figura 13 e 17. Nos casos em que não há controle de velocidade, as velocidades observadas, na Figura 17, são sempre 0 ou no intervalo 40–45 km/h, enquanto que na Figura 13 são observados valores mais distribuídos. Isso se deve ao fato de que o simulador comercial utilizado é microscópico, portanto simula a aceleração e desaceleração dos veículos. Porém essa característica diferente nos simuladores utilizados, acredita-se, que pouco influencia a comparação entre as estratégias de controle.

Importantes conclusões são corroboradas pelas simulações em ambos os cenários:

- Quando o controle de intervalos atua utilizando a otimização de trajetória, em comparação à atuação clássica por retenção, há uma diminuição do tempo parado dos ônibus em estações e semáforos e um melhor desempenho geral é obtido tanto na regularidade do serviço quanto na velocidade comercial;
- Com a otimização de trajetória é possível obter velocidades comerciais mais altas do que no caso sem controle;
- Com a ordem de prioridade dos objetivos definidos pela Equação (16) e em cenários com presença de semáforos na maior parte dos segmentos, o atuador de retenção se torna dispensável;
- O uso da otimização de trajetória implica em mais ajustes de tempos semafóricos comparado ao uso de prioridade semafórica incondicional.

Outros resultados permanecem divergentes quando comparados ambos os cenários. Com o objetivo de resolver estas divergências e entender a influência de parâmetros e de características do cenário nos critérios de desempenho analisados, a seção seguinte propõe a variação de parâmetros e características selecionados.

5.2.6 Variação de ganho proporcional e horizonte de predição

Os resultados até então foram apresentados com todas as estratégias sendo representadas com ajustes selecionados para os parâmetros de ganho proporcional (aplicação com controle proporcional de intervalos) e horizonte de predição (aplicação com controle preditivo de intervalos). Esta seção apresenta os resultados de todas as estratégias com diferentes valores de ganho ou horizonte de predição. O ganho, K_c , é apresentado variando de 0,1 à 1,0 para FH.H, FH.P e FH.T. O horizonte de predição, para OPT.H e OPT.T, é variado de 2 a 20 estações. O resultado para cada ajuste de parâmetro é sempre a média de 12 replicações.

A Figura 19 apresenta o resultado desta análise resumida em dois gráficos: (a) desvios absolutos de intervalo e (b) velocidade comercial. O eixo das abscissas, em ambos os gráficos, traz tanto a variação do ganho proporcional (embaixo) quanto a de horizonte de predição (em cima), para que todas as estratégias de controle possam ser comparadas no mesmo gráfico.

Os desvios de intervalo diminuem com o aumento da intensidade de controle, tanto com o aumento de ganho proporcional quanto com o aumento do horizonte de predição. Apenas o caso FH.T apresenta comportamento distinto dos demais, diminuindo os desvios de intervalo conforme o ganho aumenta até 0,3 e, acima disso, aumenta os desvios progressivamente. Entretanto, o caso FH.T também foi aquele que demonstrou menor sensibilidade ao ajuste do ganho. O resultado satisfatório do FH.T mesmo com ganhos tão baixos quanto 0,1 se deve ao fato do Otimizador de Trajetória, mesmo recebendo como entrada tempo de regulagem igual a zero por parte do Controlador de Intervalos,

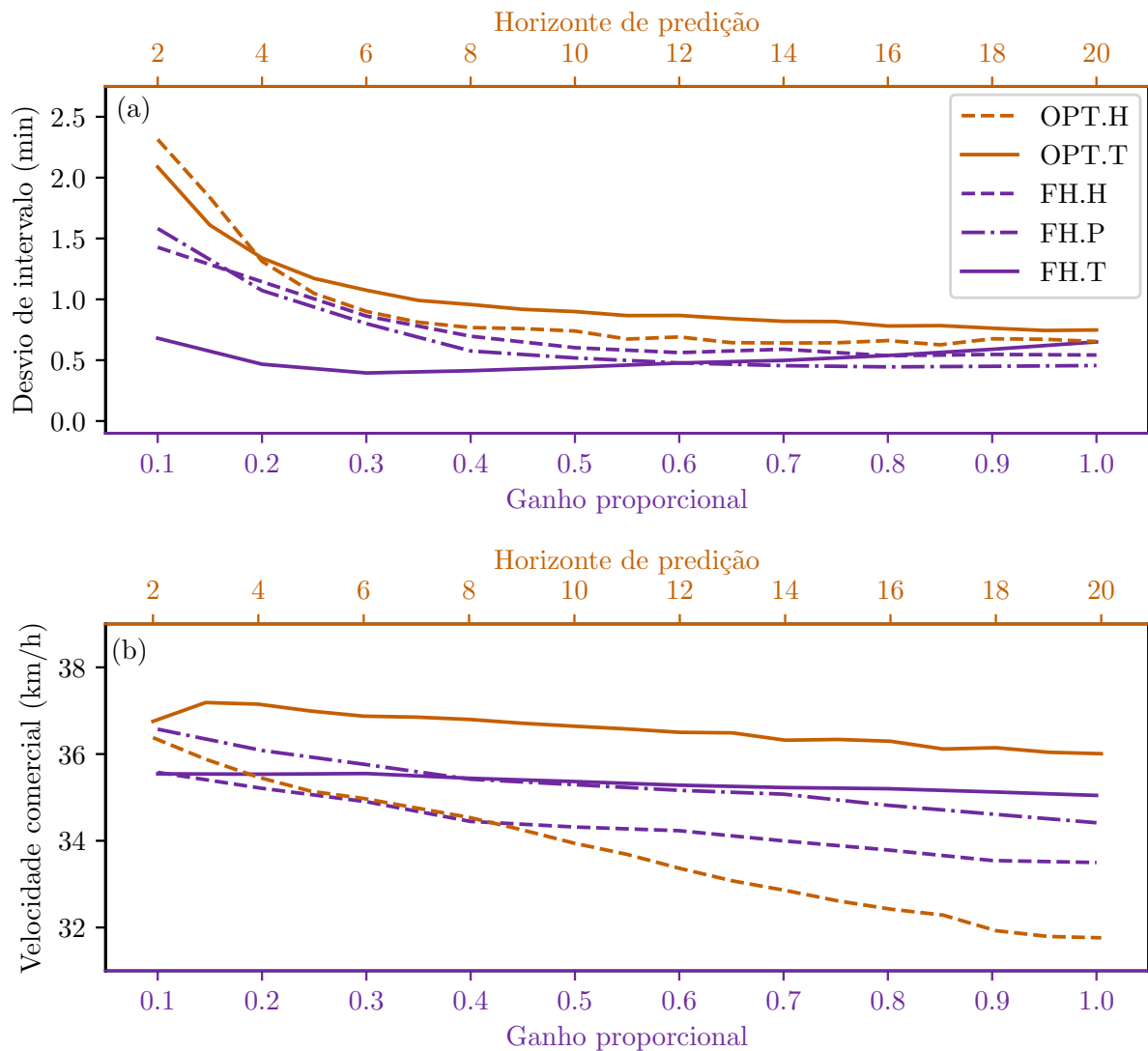


Figura 19 – Desvio de intervalo e velocidade comercial em função da variação do ganho proporcional, K_c , para os casos FH.H, FH.P e FH.T e em função da variação do horizonte de previsão para os casos OPT.H e OPT.T.

comanda velocidades e ajustes semafóricos que mantenham o tempo de viagem no segmento próximo ao valor médio para todos os ônibus (ver Equação (18)). Já nos casos FH.H e FH.P se for passado tempo de regulação igual a zero aos atuadores, eles simplesmente não retêm os ônibus.

A Figura 19(b) mostra que todos os controles deterioram a velocidade comercial com o aumento do ganho ou do horizonte de previsão. Os casos FH.T e OPT.T, em que há otimização de trajetória, são aqueles em que a velocidade comercial é menos sensível com a variação destes parâmetros, e até mesmo se beneficia com o aumento destes na região de valores mais baixos (ganho até 0,3 para o FH.T), indicando que nesta região, mais controle implica em mais celeridade na operação. O OPT.H foi aquele que apresentou maior sensibilidade nesta análise, sendo essencial o ajuste correto do horizonte de previsão para este controlador.

A escolha do melhor ajuste de parâmetro de cada controlador para apresentação dos resultados na Seção 5.2.4 se deu seguindo alguns princípios: Para os casos FH.H e FH.P, a regularidade do serviço foi critério decisivo. Foi definido o valor do ganho, a partir do qual nenhuma diminuição relevante dos desvios de intervalo é observada: ganho de 0,7. Um valor maior do que esse não traria benefícios para a regularidade do serviço e causaria a deterioração da velocidade comercial. Para os casos OPT.H e OPT.T, a regularidade do serviço deve ser observada, mas não estritamente desejada, visto que não é um objetivo direto do controlador OPT. Portanto exclui-se aquela região em que o desvio de intervalo é muito sensível ao ajuste do horizonte de predição: horizonte menor do que 8 estações. O horizonte de predição do OPT.H foi definido justamente em 8 estações devido à forte deterioração da velocidade comercial caso este valor fosse aumentado. Já no caso OPT.T, por não apresentar deterioração da velocidade tão brusca, o horizonte de predição foi definido em 10 estações, onde há um ganho na regularidade de intervalos em relação ao horizonte de 8 estações. Já o caso FH.T, por esses critérios, tem o ponto ótimo de operação com ganho 0,3, onde o desvio de intervalo é mínimo e a velocidade comercial é máxima. Mas devido à baixa sensibilidade em ambos os critérios, foi preferido manter o ganho deste controlador em 0,7, igual ao ganho dos casos que utilizam o mesmo Controlador de Intervalos.

A escolha destes parâmetros neste trabalho teve o propósito de permitir a comparação destas estratégias. Em uma implementação prática é importante o operador conhecer as curvas apresentadas na Figura 19 para o cenário em questão, e assim definir um ajuste com base no ponto de operação desejado.

5.2.7 Variação do ajuste semafórico máximo

Nesta seção é analisado o efeito dos parâmetros do cenário, δ_y^{ant} e δ_y^{pst} , que limitam, respectivamente, o tempo de antecipação máxima e de adiamento máximo de início das fases semafóricas. Estes parâmetros definem o quanto de ajuste semafórico é permitido. É considerado sempre o mesmo valor para ambos os parâmetros, que na Seção 5.2.2 fora definido em 10 s, aqui será variado de 0 a 30 s, sendo 0 a não permissão de ajuste semafórico, e 30 s a permissão total de ajuste semafórico (tempo de ciclo é 120 s). Por ser considerado o mesmo valor para ambos os parâmetros, esta seção fará referência a este valor sempre como Ajuste semafórico máximo. Todos os demais parâmetros de simulação são fixados nos valores definidos na Seção 5.2.2, e os resultados são sempre a média de 12 replicações.

A Figura 20 apresenta o resultado desta análise através de três gráficos. O gráfico (a), para os desvios de intervalo, indica a diminuição destes desvios com o aumento da permissão de ajuste semafórico em todos os casos simulados. Esta diminuição é mais acentuada nos casos em que o ajuste de tempos semafóricos é utilizado de forma integrada ao objetivo de regularização da operação, FH.T e OPT.T, com destaque ao FH.T, que

tem este como objetivo exclusivo. O gráfico (b), para as velocidades comerciais, também mostra a mesma tendência de melhora com o aumento do ajuste semafórico máximo. Neste critério o caso OPT.T tem grande destaque em relação aos outros dois. O caso FH.P apresenta velocidade comercial mais alta que o FH.T para ajustes semafóricos máximos maiores que 25 s. O resultado apresentado no gráfico (c), para os ajustes semafóricos absolutos, está fortemente relacionado ao resultado apresentado no gráfico (b), quanto mais controle semafórico, maior a velocidade comercial.

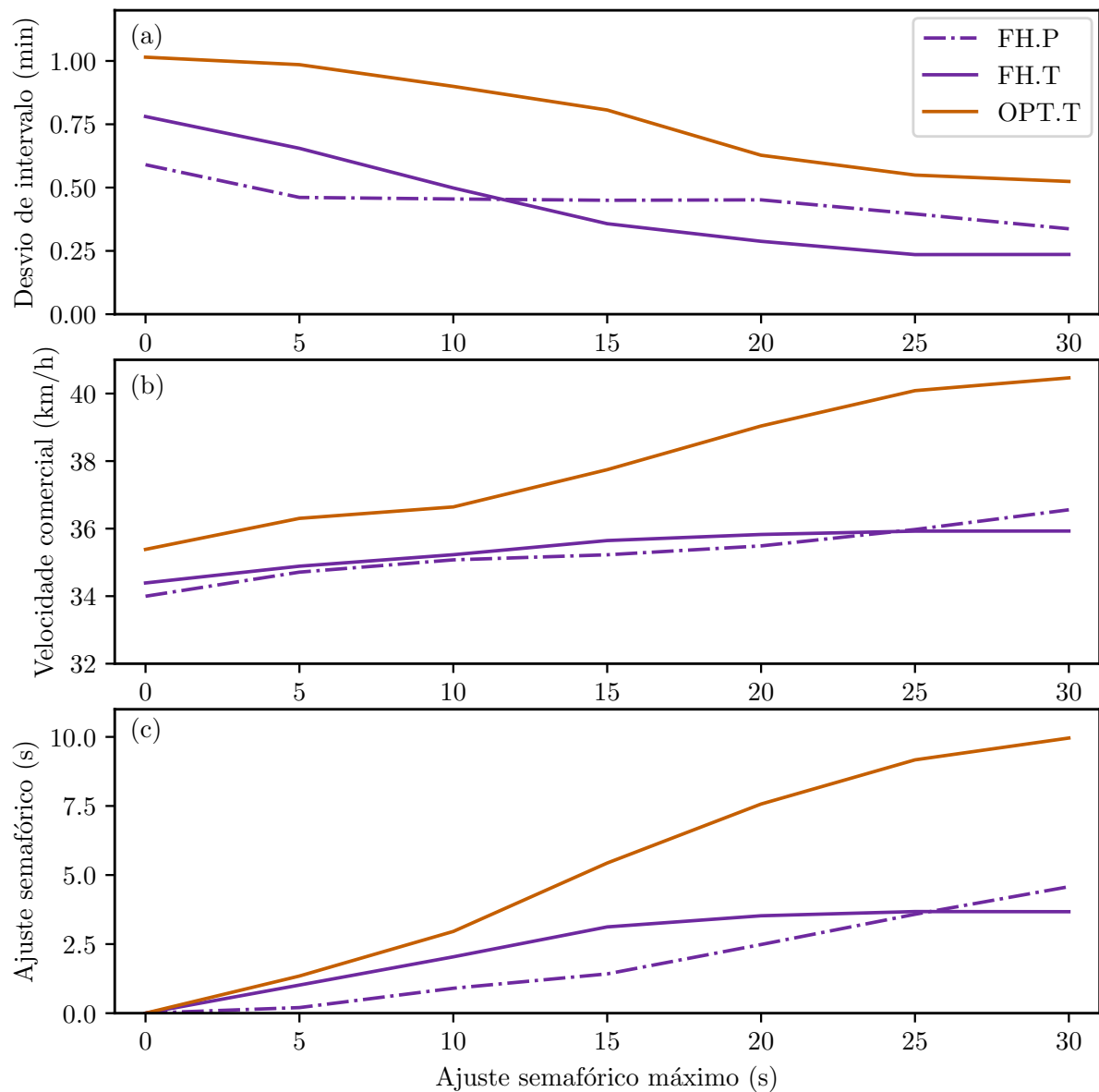


Figura 20 – Desvio absoluto de intervalo, velocidade comercial, e ajuste semafórico em função da variação do ajuste semafórico máximo, para os três casos que atuam sobre os tempos semafóricos.

Em todos os três gráficos, para os casos em que há otimização de trajetória, observa-se uma tendência de estabilização dos critérios analisados. No caso FH.T, conforme o controlador encontra uma limitação em reduzir os desvios de intervalo, mais ajustes se-

mafóricos são indesejáveis, devido ao seu objetivo secundário de minimizar os ajustes semafóricos. A estagnação de ajustes semafóricos acarreta também numa estagnação da velocidade comercial. O caso OPT.T, por outro lado, mesmo tendendo a uma estagnação dos desvios de intervalo, segue utilizando mais ajuste semafórico para garantir uma velocidade comercial maior, como consequência do seu objetivo de minimizar o tempo de viagem dos passageiros embarcados. A tendência de estabilização dos ajustes semafóricos e da velocidade comercial no caso OPT.T se deve a limitações do cenário. Com 30 s de ajuste semafórico máximo, a velocidade comercial do OPT.T se aproximou da velocidade comercial máxima teórica deste cenário, 41,03 km/h como apresentado na Seção B.5. Para isto, foi necessário utilizar, em média, 10 s de ajuste por ciclo semafórico.

A diminuição dos desvios de intervalo no caso FH.P, que não utiliza prioridade semafórica para regularizar intervalos, se deu ao custo de um aumento na atuação do Controlador de Intervalos. Com 0 s de ajuste semafórico máximo, foi aplicado 1,9 min de retenção por viagem, com 10 s de ajuste semafórico máximo, 2,0 min de retenção por viagem, com 30 s de ajuste semafórico máximo, 2,7 min de retenção por viagem. Apesar do aumento da retenção, a prioridade semafórica compensou estes atrasos e o caso FH.P apresentou um aumento contínuo da velocidade comercial com o aumento do ajuste semafórico máximo.

Este experimento também resulta na confirmação da hipótese de que um aumento no ajuste semafórico máximo exerce grande influência no aumento das chegadas estritamente pontuais dos ônibus nas estações, suscitada na Seção 5.2.5. No caso FH.T, quando o ajuste semafórico máximo era 10 s, as chegadas estritamente pontuais correspondiam a 31% de todas as chegadas. Elevando o ajuste semafórico máximo para 30 s, esta taxa passa para 63%.

Com os resultados destas duas análises de variação de parâmetros é possível complementar as conclusões do trabalho, inferindo que:

- O desempenho do controle proporcional de intervalos quando atua com otimização de trajetória (FH.T) é superior ao desempenho do mesmo controlador atuado por retenção (FH.H), mesmo quando combinado com TSP (FH.P) em relação a regularidade de intervalos e velocidade comercial, desde que ajustado adequadamente o valor de ganho proporcional;
- A aplicação do Otimizador de Trajetória com o controle preditivo de intervalos é aquela que resulta na velocidade comercial mais alta, e na regularidade de intervalos mais baixa, porém, satisfatória;
- A presença de prioridade semafórica incondicional, não integrada ao controle de intervalos, demanda maior atuação por parte do Controlador de Intervalos, o que causa maior distúrbio ao restante do tráfego.

5.3 TESTE DO MODELO INTEGRADO DE CONTROLE DE INTERVALOS E DE TRAJETÓRIAS

No simulador próprio, apresentado no Apêndice B, também foi testado o controle da mesma linha de ônibus, descrita na Seção 5.2.1, através da estratégia que utiliza o modelo integrado de controle de intervalos e de trajetórias (G.T – *Global Optimal Trajectory Control*), descrito na Seção 4.3. O horizonte de predição considerado para este caso é 4 estações. Este não é o horizonte que apresenta o melhor resultado, mas sim aquele que gera instâncias solucionáveis em tempo hábil com o poder computacional disponível neste trabalho.

Para análise dos ajustes semaforicos, notou-se que o modelo da forma como descrito não impõe custo algum a estes ajustes, podendo gerar soluções ótimas que atuem em ajustes semaforicos sem que estes influenciem na trajetória dos ônibus. Para impedir este comportamento, foi somado à função objetivo (31) a função objetivo (12) multiplicada por 0,001, que retorna um valor irrelevante quando somado à (31), mas suficiente para descartar trajetórias que façam ajustes semaforicos sem utilidade para os ônibus.

No método de Koehler, Kraus e Camponogara (2011), o erro de referência para fim do processo iterativo é definido em 1%, e em nenhuma replicação foi observado uma diferença menor do que esta ser atingida em menos que 3 iterações. Sendo assim, pode-se tirar vantagem deste fato e reduzir consideravelmente o tempo computacional diminuindo a precisão do *solver* nas primeiras iterações. Esta precisão, *MIPGap* (GUROBI OPTIMIZATION, 2020), define o momento de parada do algoritmo de busca, analisando a diferença entre o menor limite superior e o maior limite inferior dentre as soluções factíveis encontradas. Nos testes realizados foram usados os seguintes valores de *MIPGap*: 10% na primeira; 3% na segunda; e 0,1% (valor padrão) a partir da terceira iteração do método de Koehler, Kraus e Camponogara (2011).

Com o mesmo objetivo, também foi ajustado o foco do algoritmo de busca do *solver*, *MIPFocus* (GUROBI OPTIMIZATION, 2020), para cada iteração do método de Koehler, Kraus e Camponogara (2011). Na primeira iteração o foco é encontrar prioritariamente soluções factíveis, com menor preocupação pela otimalidade ($MIPFocus = 1$); a partir da segunda iteração é definido o foco de busca padrão do *solver*, que foca no balanço entre a busca por novas soluções factíveis e a constante comprovação de otimalidade das soluções encontradas ($MIPFocus = 0$).

Com estes ajustes implementados para tornar a busca da solução ótima mais eficiente, ao executar uma replicação no simulador próprio com horizonte de predição de 4 estações, o tempo médio para o controlador encontrar a solução ótima em cada evento é 20 s, e 95% das soluções são encontradas em até 37 s. O tempo total de execução de uma replicação que simula 2 h de operação é de 2,1 h, em média. Foi utilizado um processador Intel i7-9700K de 3.6 GHz, e 32 GB de memória RAM.

A Tabela 4 resume o desempenho do caso G.T, e repete o resultado do caso

OPT.T, apresentado na Tabela 3, por se tratar daquela estratégia com características mais semelhantes. Os resultados são baseados na média de 12 replicações. Quanto aos desvios de intervalo, nota-se um resultado semelhante entre os dois casos, com uma pequena vantagem ao G.T. Entretanto, o OPT.T quando simulado com horizonte de predição de 4 estações, apresentou média de desvio de intervalos de 1,4 min (ver Figura 19(a)).

Tabela 4 – Desempenho do caso G.T no cenário base; desempenho do OPT.T no mesmo cenário é repetido para comparação.

Critérios de desempenho	OPT.T	G.T
Desvios absolutos de intervalo (min)	0,9	0,8
Ajustes semafóricos absolutos (s)	3,0	3,4
Retenções por viagem (min)	0,0	2,8
Velocidades comerciais (km/h)	36,6	37,3
Intervalo médio (min)	3,3	3,2

Em relação às atuações comandadas pelos controladores, corrobora-se o resultado já ressaltado, de que a estratégia que utiliza a atuação semafórica mais complexa tende a realizar mais ajustes semafóricos. O caso G.T aplicou 3,4 s por ciclo, em média, enquanto o OPT.T, aquele que apresentava o valor mais alto deste critério até então, aplicou 3,0 s. Quanto à atuação por retenção, este resultado se contrapõe àqueles previamente apresentados. O caso G.T aplicou 2,8 min de retenção por viagem nas estações, o valor mais alto visto neste cenário, e contrasta com a decisão do caso OPT.T de não aplicar retenção. A explicação desta diferença se dá pela não hierarquização dos atrasos dos ônibus, como acontece no controle OPT.T, que penaliza a retenção nas estações mais do que o atraso nas interseções e a redução de velocidade. Não havendo esta distinção para o controlador G.T, apenas o objetivo de minimizar o tempo de viagem dos passageiros no sistema, este preferiu, sempre que fosse necessário, atrasar algum ônibus, retê-lo na estação permitindo o embarque dos passageiros que chegarem, reduzindo o valor da parcela da função objetivo relativa à espera dos passageiros nas estações. Este comportamento pode ser ajustado adicionando à função objetivo do G.T a Equação (13) com a ponderação adequada.

A velocidade comercial do caso G.T foi a mais alta observada neste cenário, porém muito semelhante a velocidade do caso OPT.T, quando simulado também com 4 estações no horizonte de predição, 37,1 km/h (ver Figura 19(b)). O intervalo médio entre os ônibus foi 3,2 min, igual ao intervalo médio do caso sem controle (NOC).

A Figura 21 apresenta a composição do tempo médio de viagem em cada segmento entre duas estações, para o caso G.T, e repete o caso OPT.T, apresentado na Figura 16. Comparativamente, o resultado mostra que os tempos de viagem nos segmentos foram semelhantes em magnitude com o caso G.T, apresentando ainda mais uniformidade entre todos os segmentos, mesmo havendo segmento sem semáforos e segmento com cinco

semáforos. Na composição destes tempos de viagem, notam-se os tempos de retenção ocorrendo em todas as estações, com maior intensidade nas estações 5,6 e 7, sendo essas retenções responsáveis pelo tempo de viagem total destes segmentos maior do que nos demais.

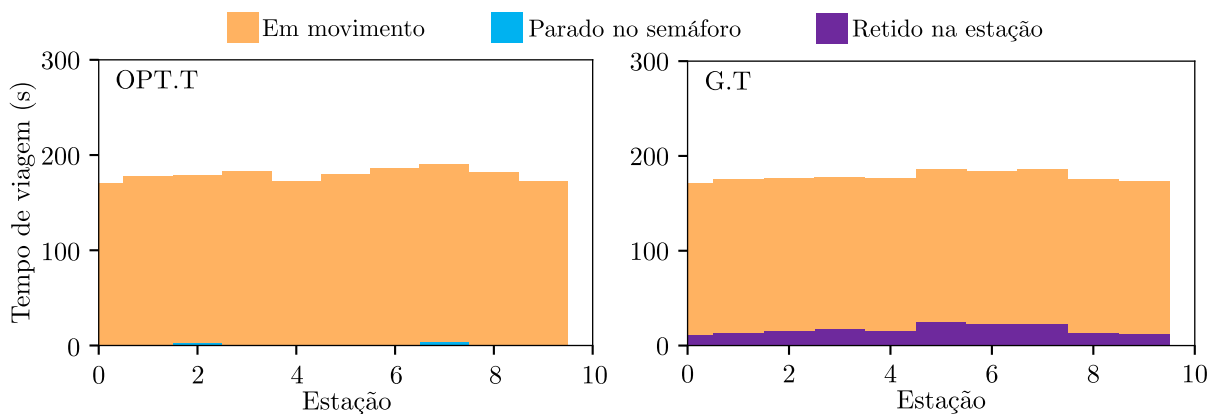


Figura 21 – Composição do tempo médio de viagem no segmento de cada estação para o caso G.T no cenário base; o resultado do caso OPT.T é repetido para comparação.

A Figura 22 apresenta os histogramas das velocidades observadas para o caso G.T e repete o caso OPT.T, apresentado na Figura 17. O caso G.T manteve as velocidades majoritariamente entre 40-45 km/h, indicando que pouco controle de velocidade foi utilizado por este controlador. As retenções na estação presentes neste caso, implicam na frequência mais elevada de observação de velocidade zero em relação ao OPT.T, que manteve os ônibus mais em movimento, mas com velocidades menores.

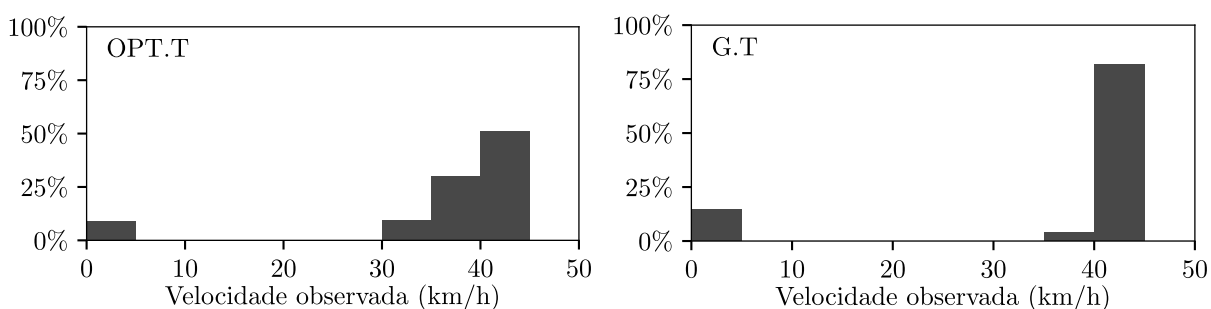


Figura 22 – Histograma das velocidades observadas para o caso G.T no cenário base; o resultado do caso OPT.T é repetido para comparação.

A limitação dos testes ao horizonte de predição de 4 estações, implica na limitação do entendimento de certas ações tomadas por parte do controlador. Um horizonte de predição maior permitiria uma compreensão mais completa do comportamento do sistema sob a estratégia G.T, expondo aqueles comportamentos que ocorrem devido à miopia do cálculo de controle e aqueles que se justificam pelo modelo em si, que ocorreriam mesmo com um horizonte de predição maior.

A Figura 23 apresenta os resultados para uma replicação selecionada do caso G.T, a mesma replicação que gerou os resultados das demais estratégias, apresentados na Figura 18. No gráfico de marcha (a), de modo geral, ao longo da operação observa-se um intervalo entre ônibus de regularidade satisfatória, a presença de tempos de parada apenas em estações, sem paradas em semáforos, e as paradas nas estações sendo longas devido à retenção. Entretanto, também apresenta um comportamento induzido pela estratégia G.T que não havia sido apresentado por nenhuma outra estratégia estudada, o pareamento deliberado de alguns ônibus por um período de operação. Ocorre em dois casos, ambos entre os minutos 30 e 50 da simulação. Em ambos os casos, o ônibus à frente experimenta seguidamente longos tempos de parada em estações enquanto o ônibus seguidor não é retido, até que ocorre o pareamento destes ônibus. O pareamento é mantido por 3 estações, e então o controlador atrasa drasticamente o ônibus seguidor (através de retenção e redução de velocidade), retomando uma regularidade de intervalo típica desta operação.

A Figura 23(b) apresenta o desvio de intervalo ao longo da operação através da média móvel com janela de 10 eventos (mesmo valor de N_i). Nota-se a influência dos dois pareamentos ocorridos também neste gráfico, com o desvio médio dos intervalos se elevando entre os minutos 30 e 50 da simulação.

A Figura 23(c) permite analisar mais diretamente a decisão por parte do controlador, apresentando o custo retornado pela função objetivo no ponto ótimo para cada evento da operação. São apresentados tanto o custo total (f - Equação (22)), quanto as suas componentes: espera dos usuários na estação (f_d - Equação (19)), espera dos usuários embarcados enquanto o ônibus está parado na estação (f_s - Equação (20)), e tempo de viagem entre estações (f_t - Equação (21)). Os dois primeiros são apresentados multiplicados por dez para visualização no mesmo gráfico. Durante o pareamento discutido, entre os minutos 30 e 50 da simulação nota-se uma elevação no valor de f_d , o que é esperado, dada a já conhecida relação direta entre o aumento do desvio de intervalo e o aumento da espera nas estações. Mas o aumento em f_d não causou nenhum aumento perceptível em f , provavelmente devido à uma compensação por parte de f_t que possui um peso aproximadamente 10 vezes maior na composição de f .

A justificativa para este comportamento de pareamento é uma questão em aberto. Foi de fato uma decisão do controlador, mas essa decisão ocorreu por conta de miopia, ou porque, de fato, independentemente do horizonte de predição esta decisão seria tomada por ser a que gera o menor custo global? Outro comportamento observado e ainda não explicado são as variações bruscas no valor de f_s ao longo de toda a operação; este comportamento também pode estar relacionado à miopia do horizonte de predição.

Uma alternativa para o teste do caso G.T com horizonte de predição maior, seria executar a otimização não no instante de ocorrência do evento, mas sim continuamente, em um processamento paralelo ao da simulação. Ou seja, sempre que uma nova operação ótima é encontrada a solução para todo o horizonte de predição é atualizada, e uma nova

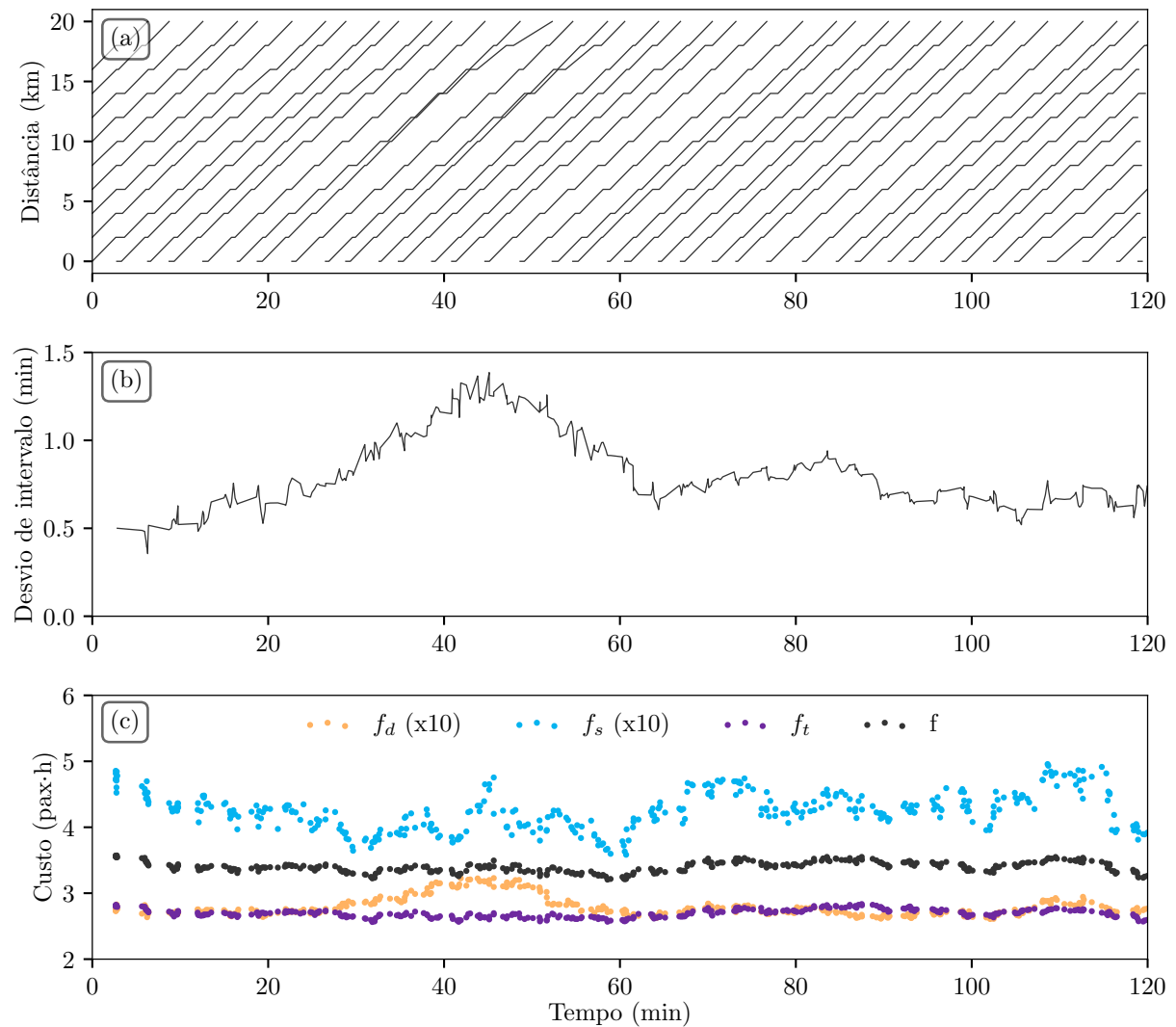


Figura 23 – Resultados para uma replicação selecionada da simulação do caso G.T no cenário base. (a) o gráfico de marcha; (b) a média móvel dos desvios de intervalo; e (c) o custo retornado por cada componente da função objetivo no ponto ótimo para cada evento da operação.

otimização é iniciada com o estado do sistema atualizado. Assim, os atuadores consultam sempre a última solução ótima encontrada para controle dos ônibus. Entretanto, devido à imprecisão nos dados de entrada do controlador causada por perturbações desconhecidas por ele, esta alternativa é viável apenas caso a solução ótima seja atualizada em um curto prazo, antes que o erro acumulado das previsões impliquem em erros graves de trajetória (por exemplo, um ônibus chegar a um semáforo alguns segundos após o fim da extensão de verde que o controlador havia planejado para ele).

No cenário base apresentado, onde o objetivo é também impor perturbações ao sistema desconhecidas pelos controladores, com o poder computacional disponível para este trabalho, o maior horizonte de previsão viável foi também de 4 estações. A partir de 5 estações, o tempo de execução de uma instância sobe para 60 s em média, sendo 95% das soluções encontradas em até 107 s, tornando essa alternativa de computação paralela

inviável, por incorrer em múltiplos erros de trajetória.

Para o teste com horizontes de predição maiores, deve ser considerado primeiramente um refinamento do modelo e a possibilidade de construção de um algoritmo próprio para solucioná-lo. Caso não ocorra uma redução considerável do tempo computacional, então a alternativa de computação paralela, descrita acima, pode ser empregada juntamente com adaptações estratégicas para aumento de robustez das atuações, p. ex.:

- Reduzir a região de controle descrita pelas restrições do modelo de otimização do controlador, mas não dos atuadores, como limites de ajuste semafóricos reduzidos ou velocidade máxima permitida menor; desta forma os atuadores têm folga para corrigir desvios de trajetória incorridos por perturbações não previstas.
- Reaplicar a otimização de trajetória apenas para o segmento à frente, sempre que um ônibus está pronto para partir de uma estação; assim as atuações são reajustadas para cumprimento do instante de chegada na estação seguinte determinado pelo Controlador de Intervalos com Otimização de Trajetória.
- Em adição ao item acima, pode-se ainda considerar um tempo de retenção obrigatório em cada estação como parte do tempo de viagem normal no modelo do Controlador de Intervalos com Otimização de Trajetória, tal qual no método do tempo limite; assim a redução desta retenção por parte de um Otimizador de Trajetória local serve como adiantamento dos ônibus atrasados por perturbações não previstas.

Diferentemente de uma solução computacional, com um algoritmo que resolvesse o problema em tempo hábil, as adaptações citadas acima não garantem o ponto ótimo de operação.

6 CONCLUSÃO

Foi apresentada uma solução eficiente para o problema de atuação do controle de intervalos entre ônibus de uma mesma linha. A solução foi alcançada através da otimização de um modelo de trajetória de ônibus que considera três tipos de ações: retenção nas estações, controle de velocidade ao longo do itinerário e ajustes de tempo nas fases dos semáforos. Os experimentos numéricos, a simulação de um cenário urbano realista, e a simulação de um cenário base mostraram que a solução proposta se mostrou mais eficiente do que os casos em que apenas retenção nas estações ou retenção e prioridade semafórica incondicional foram aplicadas.

Historicamente, as soluções para regularizar o intervalo entre ônibus iniciaram propondo o controle apenas através do atraso de ônibus adiantados, posteriormente, com avanços em sistemas de sensoriamento e controle, soluções propondo o adiantamento de ônibus atrasados foram possíveis, e mais recentemente o estado da arte trata da combinação de diferentes formas de atuação que permitem tanto o adiantamento quanto o atraso de ônibus. Estas soluções mais modernas aumentam a região de controle ao mesmo passo que diminuem as fontes de perturbação do sistema, permitindo a consideração não apenas do objetivo de regularização dos intervalos como também de aumento da velocidade de operação, diminuindo o tempo de viagem dos usuários.

Os experimentos executados em cenário base, onde as estratégias de controle puderam ser testadas extensivamente, demonstram que as estratégias que aplicam os métodos de cálculo de controle com a solução proposta de otimização de trajetória desempenham melhor tanto na regularidade dos intervalos quanto na velocidade da operação, a depender de um ajuste adequado dos parâmetros dos controladores e de permissão suficiente para controle semafórico. Conclui-se ainda que no caso do uso de prioridade semafórica incondicional, ela acaba por demandar maior atuação do controlador de intervalos em comparação com quando a prioridade semafórica é integrada à estratégia de controle de intervalos.

Ao aplicar na prática a solução proposta, o operador pode decidir como equilibrar os tipos de atuação de acordo com a experiência operacional, características da linha e preferências manifestadas pelos usuários. Inclusive, mesmo essa solução sendo aplicada sem dispor de todos os atuadores apresentados, é garantida a solução ótima dentro da região de controle limitada. Ter um sistema de controle versátil possibilita o ajuste ideal para obter um desempenho equilibrado do aumento da regularidade da operação e do conforto dos usuários.

A independência da solução apresentada foi demonstrada através da sua aplicação com dois métodos de cálculo de tempo de regulagem bastante distintos. Na entrada do modelo é informado o instante alvo de chegada do ônibus na estação seguinte, informação que pode ser concedida por métodos de cálculo de controle de intervalos desde os mais

simples até os mais complexos descritos na literatura. A solução apresentada garantiu o melhor cumprimento dos objetivos diretos de cada método de cálculo. Àquele que busca a maior regularidade de intervalos a otimização de trajetória garantiu os menores desvios de intervalo, e àquela que busca menor tempo de viagem aos usuários a otimização de trajetória garantiu as maiores velocidades comerciais entre as estratégias testadas.

No sentido contrário, também foi proposto uma estratégia codependente, que encapsula e resolve todo o sistema de controle em um modelo integrado de controle de intervalos e trajetórias, lendo o estado da operação e retornando diretamente a ação de cada atuador. Os testes desta estratégia deixaram análises inconclusivas, devido a incapacidade de execução de um modelo de tal complexidade computacional. Ainda que com ajustes de parâmetros limitados pela capacidade computacional, esta estratégia apresentou desempenho promissor, ao custo de ser a mais complexa e mais dependente de previsões assertivas sobre o comportamento futuro do sistema.

Este trabalho também torna público um ambiente de testes por simulação, para estratégias de controle de intervalos e modelos de otimização de trajetórias. Um simulador baseado em eventos que garante uma simulação mais rápida deste tipo de testes, em comparação com alternativas comerciais de microsimulação de tráfego. O ambiente foi desenvolvido de forma a se adequar facilmente a novas implementações como o controle da velocidade dos ônibus, controle das interseções semaforizadas e controle de múltiplas linhas.

Trabalhos futuros neste campo devem abordar questões em aberto para avanço do estado da arte, como a inclusão explícita do tratamento de simultaneidade das atuações com ônibus de diferentes linhas que concorrem na mesma malha urbana, possivelmente em direções e sentidos diferentes; o refinamento de modelos complexos como o de controle integrado apresentado e desenvolvimento de algoritmos de solução mais eficientes para implementação destes modelos em aplicações tempo real; modelagem de filas de veículos nas interseções para uso das estratégias para controle de linhas fora de corredores exclusivos; entre outros. Entretanto, existem ainda desafios para avanço também do estado da prática, como: o desenvolvimento de painéis de informação nos ônibus que aumente a aceitação de comandos por parte dos motoristas, aumentando a aderência à tempos de retenção e velocidades comandadas; instalação de sensores específicos e aumento da capacidade de análise dos dados dos sensores, para assim fornecer às estratégias de controle informações presentes e previsões futuras mais precisas; e conscientização do imaginário popular e convencimento dos agentes públicos da importância de um transporte público eficiente, que disponha de corredores de alta capacidade, veículos e infra estrutura de alta tecnologia, onde se justifica a implantação de estratégias de controle sofisticadas como essas apresentadas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

ABKOWITZ, Mark; TOZZI, John. Transit route characteristics and headway-based reliability control. **Transportation Research Record**, n. 1078, 1986.

ALPKOKIN, Pelin; ERGUN, Murat. Istanbul Metrobüs: first intercontinental bus rapid transit. **Journal of Transport Geography**, v. 24, p. 58–66, 2012. Special Section on Theoretical Perspectives on Climate Change Mitigation in Transport. ISSN 0966-6923.

AMPOUNTOLAS, Konstantinos; KRING, Malcolm. Mitigating bunching with bus-following models and bus-to-bus cooperation. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, IEEE, 2020.

ANDERSON, Paul; DAGANZO. Effect of transit signal priority on bus service reliability. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 38, p. 2–19, 2019.

ARGOTE-CABANERO, Juan; DAGANZO; LYNN, Jacob W. Dynamic control of complex transit systems. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 81, p. 146–160, 2015.

BALCOMBE, Richard; MACKETT, Roger; PAULLEY, Neil; PRESTON, John; SHIRES, Jeremy; TITHERIDGE, Helena; WARDMAN, Mark; WHITE, Peter. **The demand for public transport: a practical guide**. Relatório Técnico 593. Transportation Research Laboratory, 2004.

BARNETT, Arnold. On controlling randomness in transit operations. **Transportation Science**, v. 8, n. 2, p. 102–116, 1974.

BERREBI, Simon J.; WATKINS, Kari E.; LAVAL, Jorge A. A real-time bus dispatching policy to minimize passenger wait on a high frequency route. **Transportation Research Part B: Methodological**, 81, Parte 2, p. 377–389, 2015.

BIE, Yiming; XIONG, Xinyu; YAN, Yadan; QU, Xiaobo. Dynamic headway control for high-frequency bus line based on speed guidance and intersection signal adjustment. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, Wiley Online Library, v. 35, n. 1, p. 4–25, 2020.

BUENO-CADENA, C. E.; MUÑOZ, Juan Carlos. Reducing metro trip times and energy consumption through speed control, holding and boarding limits. **Transportmetrica A: Transport Science**, Taylor & Francis, v. 13, n. 9, p. 767–793, 2017.

CARLSON, Rodrigo Castelan; LUEDERS, Carolina Ensfield; DANTAS, Luciano Dionísio. PYBAND: UM APLICATIVO MULTI-PLATAFORMA PARA A COORDENAÇÃO DE VIAS ARTERIAIS SEMAFORIZADAS, 2007.

CARREL, Andre; MISHALANI, Rabi G; SENGUPTA, Raja; WALKER, Joan L. In pursuit of the happy transit rider: dissecting satisfaction using daily surveys and tracking data. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, Taylor & Francis, v. 2450, p. 1–18, 2016.

CATS, Oded; BURGHOUT, Wilco; TOLEDO, Tomer; KOUTSOPOULOS, Haris N. Mesoscopic modeling of bus public transportation. **Transportation Research Record**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2188, n. 1, p. 9–18, 2010.

CATS, Oded; LARIJANI, Anahid; KOUTSOPOULOS, Haris; BURGHOUT, Wilco. Impacts of Holding Control Strategies on Transit Performance. **Transportation Research Record**, v. 2216, p. 51–58, 2011.

CEDER, A. **Public Transit Planning and Operation: Theory, Modeling and Practice**. Burlington, Massachusetts: Butterworth-Heinemann, 2007.

CHOW, Andy HF; LI, Shuai; ZHONG, Renxin. Multi-objective optimal control formulations for bus service reliability with traffic signals. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 103, p. 248–268, 2017.

CORTÉS, Cristián E; SÁEZ, Doris; MILLA, Freddy; NÚÑEZ, Alfredo; RIQUELME, Marcela. Hybrid predictive control for real-time optimization of public transport systems' operations based on evolutionary multi-objective optimization. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier, v. 18, n. 5, p. 757–769, 2010.

DAGANZO. 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; PILACHOWSKI, Josh. Reducing bunching with bus-to-bus cooperation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 1, p. 267–277, 2011.

DELGADO, Felipe; MUNOZ, Juan Carlos; GIESEN, Ricardo. How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance? **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 9, p. 1202–1217, 2012.

DELGADO, Felipe; MUÑOZ, Juan; GIESEN, Ricardo; CIPRIANO, Aldo. Real-time control of buses in a transit corridor based on vehicle holding and boarding limits. **Transportation Research Record**, n. 2090, p. 59–67, 2009.

DELGADO, Felipe; MUÑOZ, Juan Carlos; GIESEN, Ricardo; WILSON. Integrated Real-Time Transit Signal Priority Control for High-Frequency Segregated Transit Services. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Transportation Research Board of the National Academies, n. 2533, p. 28–38, 2015.

DESAULNIERS, Guy; HICKMAN, Mark D. Chapter 2 Public Transit. *In*: BARNHART, Cynthia; LAPORTE, Gilbert (Ed.). **Transportation**. [S.l.]: Elsevier, 2007. v. 14. (Handbooks in Operations Research and Management Science). P. 69–127.

EBERLEIN, Xu Jun; WILSON; BERNSTEIN, David. Modeling real-time control strategies in public transit operations. *In*: COMPUTER-AIDED transit scheduling. Berlin: Springer, 1999. P. 325–346.

EFRATI, Amir. **Money Pit: Self-Driving Cars' \$16 Billion Cash Burn**. 2019. Disponível em: <https://www.theinformation.com/articles/money-pit-self-driving-cars-16-billion-cash-burn>. Acesso em: 30 jan. 2023.

ESTRADA, Miquel; MENSIÓN, Josep; AYMAMÍ, Josep M; TORRES, Laura. Bus control strategies in corridors with signalized intersections. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier Ltd, v. 71, p. 500–520, 2016.

FURTH, Peter; MULLER, Theo H. Conditional Bus Priority at Signalized Intersections: Better Service with Less Traffic Disruption. **Transportation Research Record**, v. 1731, n. 1, p. 23–30, 2000.

GLOVER, Fred; WOOLSEY, Eugene. Converting the 0-1 polynomial programming problem to a 0-1 linear program. **Operations research**, INFORMS, v. 22, n. 1, p. 180–182, 1974.

GUROBI OPTIMIZATION, LLC. **Gurobi Optimizer Reference Manual**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <http://www.gurobi.com>.

HENSHER, David A. Sustainable public transport systems: Moving towards a value for money and network-based approach and away from blind commitment. **Transport Policy**, v. 14, n. 1, p. 98–102, 2007.

HICKMAN, Mark D. An analytic stochastic model for the transit vehicle holding problem. **Transportation Science**, v. 35, n. 3, p. 215–237, 2001.

HOUNSELL, Nick; SHRESTHA, Birendra. A new approach for co-operative bus priority at traffic signals. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 1, p. 6–14, 2012.

HWANG, C-L; MASUD, Abu Syed Md. **Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. v. 164.

KOEHLER, Luiz Alberto; KRAUS, Werner; CAMPONOGARA, Eduardo. Iterative Quadratic Optimization for the Bus Holding Control Problem. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 4, p. 1568–1575, 2011.

LASKARIS, Georgios; SEREDYNSKI, Marcin; VITI, Francesco. Enhancing Bus Holding Control Using Cooperative ITS. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 21, n. 4, p. 1767–1778, 2020.

LIMA, Lucas Franco; CARLSON, Rodrigo Castelan; KRAUR, Werner; ZIMMERMANN, Lucas; KOEHLER, Luiz Alberto. Load-sensitive bus headway control for reducing onboard passenger waiting time. **TRANSPORTES**, v. 29, n. 3, p. 2650–2650, 2021.

LITMAN, Todd. Autonomous vehicle implementation predictions: Implications for transport planning, 2020.

- LITTLE, John DC. The synchronization of traffic signals by mixed-integer linear programming. **Operations Research**, INFORMS, v. 14, n. 4, p. 568–594, 1966.
- LORO, Antonio. **Vehicle automation and the future of transit**. 2014. Disponível em: humantransit.org/2014/03/guest-post-vehicle-automation-and-the-future-of-transit. Acesso em: 20 ago. 2018.
- LUETHI, Marco; WEIDMANN, Ulrich Alois; NASH, Andrew. Passenger arrival rates at public transport stations. *In*: 07-0635. TRANSPORTATION Research Board 86th annual meeting. Washington: Transportation Research Board, 2007.
- MARSHALL, Aarian. **Elon Musk reveals his awkward dislike of mass transit**. 2017. Disponível em: wired.com/story/elon-musk-awkward-dislike-mass-transit/. Acesso em: 20 ago. 2018.
- MCLEOD, Fraser. Headway-based selective priority to buses. *In*: MATHEMATICS in Transport Planning and Control: Proceedings of the 3rd IMA Conference on Mathematics in Transport Planning and Control. [*S.l.*: *s.n.*], 1998. cap. 7, p. 69–78.
- MÜLLER, Eduardo Rauh; CARLSON, Rodrigo Castelan; KRAUS, Werner. Time optimal scheduling of automated vehicle arrivals at urban intersections. *In*: IEEE. INTELLIGENT Transportation Systems (ITSC), 2016 IEEE 19th International Conference on. [*S.l.*: *s.n.*], 2016. P. 1174–1179.
- MUNSTER, Gene. **Auto outlook 2040: the rise of fully autonomous vehicles**. 2016. Disponível em: loupventures.com/auto-outlook-2040-the-rise-of-fully-autonomous-vehicles. Acesso em: 20 ago. 2018.
- NEWELL, G. F.; POTTS, R. B. Maintaining a bus schedule. *In*: 1. 2ND Australian Road Research Board Conference. Melbourne: Australian Road Research Board (ARRB), 1964. v. 2, p. 388–93.
- NUNEZ, Alfredo; SÁEZ, Doris; CORTÉS, Cristián E. **Hybrid Predictive Control for Dynamic Transport Problems**. London: Springer Science & Business Media, 2012.
- OSUNA, E. E.; NEWELL, G. F. Control strategies for an idealized public transportation system. **Transportation Science**, v. 6, n. 1, p. 52–72, 1972.

- PHILLIPS, William; RIO, Andrés del; MUÑOZ, Juan Carlos; DELGADO, Felipe; GIESEN, Ricardo. Quantifying the effects of driver non-compliance and communication system failure in the performance of real-time bus control strategies. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier, v. 78, p. 463–472, 2015.
- PROLO SANTOS JUNIOR, Sergio Mauricio. **Sistema Computacional para Suporte a Operação Controlada do Transporte Coletivo Urbano**. 2017. F. 58. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.
- SAE. **J3016, Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-road Motor Vehicle Automated Driving Systems**. [*S.l.: s.n.*], 2014.
- SÁNCHEZ-MARTÍNEZ, GE; KOUTSOPOULOS, HN; WILSON. Real-time holding control for high-frequency transit with dynamics. **Transportation Research Part B: Methodological**, New York, v. 83, p. 1–19, 2016.
- SEDDON, PA; DAY, MP. Bus passenger waiting times in Greater Manchester. **Traffic Engineering and Control**, v. 15, n. 9, p. 442–445, 1974.
- SEMAN, Laio Oriel; KOEHLER, Luiz Alberto; CAMPONOVARA, Eduardo; ZIMMERMANN, Lucas. Generalized Auto-Sequencing Bus Headway Control Formulation. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 23, n. 7, p. 6460–6472, 2022.
- SEMAN, Laio Oriel; KOEHLER, Luiz Alberto; CAMPONOVARA, Eduardo; ZIMMERMANN, Lucas; KRAUS, Werner. Headway Control in Bus Transit Corridors Served by Multiple Lines. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 21, n. 11, p. 4680–4692, 2020.
- SHELLEY, Susan. **Why raise taxes for mass transit when driverless cars are the future?** 2016. Disponível em: www.dailynews.com/2016/07/06/why-raise-taxes-for-mass-transit-when-driverless-cars-are-the-future. Acesso em: 5 jun. 2023.
- SHLADOVER, Steven E. Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview. **Journal of Intelligent Transportation Systems**, Taylor & Francis, v. 22, n. 3, p. 190–200, 2018.
- STRATHMAN; HOPPER. Empirical analysis of bus transit on-time performance. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 27, n. 2, p. 93–100, 1993.

STRATHMAN; KIMPEL, Thomas J.; DUEKER, Kenneth J.; GERHART, Richard L.; TURNER, Kenneth; GRIFFIN, David; CALLAS, Steve. 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.

TRANSLOC. **Will autonomous vehicles kill public transit?** 2012. Disponível em: blog.transloc.com/blog/will-autonomous-vehicles-kill-public-transit. Acesso em: 20 ago. 2018.

TSS. **AIMSUN Dynamic Simulator Users Manual v. 8**. Barcelona: Transport Simulation Systems, 2017.

TURNQUIST, M. **Strategies for Improving Bus Transit Service Reliability**. Transportation Research Record 818. Evanston, IL, 1982.

WALKER, Jarret. **Elon Musk responds!** 2017. Disponível em: humantransit.org/2017/12/elon-musk-responds. Acesso em: 20 ago. 2018.

WALKER, Jarret. **Guangzhou's First L4 Autonomous Driving Bus Line Officially Commences Operations**. 2022. Disponível em: <https://pandaily.com/guangzhous-first-l4-autonomous-driving-bus-line-officially-commences-operations/>. Acesso em: 25 jan. 2022.

WALKER, Jarret. **Will driverless cars abolish buses?** 2012. Disponível em: humantransit.org/2012/08/bus-stigma-and-driverless-cars-email-of-the-month. Acesso em: 20 ago. 2018.

WANG, Yinsong; MA, Wanjing; YIN, Wei; YANG, Xiaoguang. Implementation and testing of cooperative bus priority system in connected vehicle environment: case study in Taicang City, China. **Transportation Research Record**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2424, n. 1, p. 48–57, 2014.

WEBER, Wolfgang. **Die Reisezeit der Fahrgäste öffentlicher Verkehrsmittel in Abhängigkeit von Bahnart und Raumlage**. Stuttgart: Technische Hochschule Stuttgart, 1966.

WRIGHT, L.; HOOK, W.B. **Bus Rapid Transit Planning Guide**. Edição: hello. New York: Institute for Transportation & Development Policy, 2007.

WU, Wei; MA, Wanjing; LONG, Kejun; ZHOU, Heping; ZHANG, Yi. Designing sustainable public transportation: Integrated optimization of bus speed and holding time in a connected vehicle environment. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 8, n. 11, p. 1170, 2016.

XUAN, Yiguang; ARGOTE-CABANERO, Juan; DAGANZO. Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 10, p. 1831–1845, 2011.

YOSSI, Aloni. **Dynamic Scheduling for the Autonomous Public Transportation Era**. Optibus. Tel-Aviv, 2016.

ZIMMERMANN, Lucas. **Controle operacional em tempo real para transporte coletivo urbano**. Florianópolis, Brasil: [s.n.], 2018. Qualificação de Doutorado. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1cX1Q-_19Cs9ADt5Ajp0luHumty-njqcQ/view?usp=sharing. Acesso em: 26 jun. 2023.

ZIMMERMANN, Lucas; COELHO, Leandro C.; KRAUS, Werner; CARLSON, Rodrigo Castelan; KOEHLER, Luiz Alberto. Bus Trajectory Optimization With Holding, Speed and Traffic Signal Actuation in Controlled Transit Systems. **IEEE Access**, v. 9, p. 143284–143294, 2021.

ZIMMERMANN, Lucas; KRAUS, Werner; KOEHLER, Luiz Alberto; CAMPONOGARA, Eduardo. Holding Control of Bus Bunching without Explicit Service Headways. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 3, p. 209–214, 2016.

ZOLFAGHARI, Saeed; AZIZI, Nader; JABER, Mohamad Y. A model for holding strategy in public transit systems with real-time information. **International Journal of Transport Management**, v. 2, n. 2, p. 99–110, 2004.

APÊNDICE A – MODELAGEM DA LINHA 800 EM SIMULADOR COMERCIAL

Uma linha de ônibus foi modelada e simulada com o programa de microsimulação Aimsun (TSS, 2017). Este simulador tem a capacidade de simular interações pontuais dos veículos, e permite o controle da simulação em tempo real através da sua Interface para Programação de Aplicações (API). A aplicação programada usa linguagem Python, e foi desenvolvida em dois trabalhos: primeiramente em Zimmermann *et al.* (2016), e posteriormente teve a adição do controle de velocidade dos ônibus por Prolo Santos Junior (2017). Neste apêndice será apresentada a modelagem de uma linha de ônibus real neste simulador.

A.1 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O simulador de tráfego Aimsun (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Network*), por se tratar de um simulador microscópico, é capaz de modelar o movimento dos ônibus enquanto se deslocam pelo itinerário pré-definido. São simulados os movimentos de velocidade constante, os movimentos de aceleração e desaceleração, e o tempo de parada em cada estação de todos os ônibus. O tempo de parada na estação pode ser alterado dinamicamente durante a simulação através de sua API. A velocidade desejada para cada ônibus em cada passo de simulação também pode ser comandada pela API. Os semáforos têm sua janela de configuração própria onde são predefinidos, entre outros, os tempos de ciclo, defasagem, verde, amarelo e vermelho, mas o instante de início de cada fase semafórica também pode ser alterado via API.

O cálculo do tempo de parada na estação é realizado com base na quantidade de usuários aguardando para embarcar e a quantidade de usuários que desejam desembarcar, somado ao tempo de retenção a ser definido de acordo com a estratégia de controle selecionada. Já a implementação dos ajustes semafóricos ocorre através de uma interrupção que ativa o início de uma fase no instante comandado pela API. Este instante pode ser computado pra todo o segmento entre duas estações, caso CSP seja aplicado, ou comunicado na aproximação de um ônibus, caso TSP seja aplicado. O cálculo da velocidade desejada é feita a cada passo de simulação (0,8 s), como em Prolo Santos Junior (2017), para cada ônibus, e os valores são informados ao Aimsun. A velocidade desejada é seguida rigorosamente, a menos que exceda os limites de velocidade na seção ou o ônibus esteja em processo de aceleração ou desaceleração.

A.2 VALIDAÇÃO DA LINHA SIMULADA

Para implementação da linha 800 (ver Seção 5.1.1) no simulador comercial é necessário desenhar o seu itinerário, trabalho facilitado pelo uso de uma imagem de satélite

Tabela 5 – Parâmetros de simulação.

Ambiente	Parâmetro	Média	Desvio padrão
Aimsun	Aceleração máxima (m/s^2)	1	0,3
Aimsun	Desaceleração normal (m/s^2)	2	0,3
Aimsun	Fator de aceitação de velocidade	1	0,05
Aimsun	Intervalo de simulação (s)	0,8	0
API	Tempo de retenção máximo (s)	40	0
API	C_0 (s)	3	0
API	C_1 (s/pax)	0,5	0
API	C_2 (s/pax)	0,35	0
API	Capacidade máxima por ônibus (pax)	100	0

ao fundo. Posteriormente são informados os tempos de ciclo, defasagem, verde, amarelo e vermelho de cada interseção semaforizada. Os demais parâmetros aplicados tanto ao Aimsun quanto à API estão resumidos na Tabela 5. A aceitação de velocidade representa a disposição de um motorista em aceitar uma determinada velocidade, por exemplo, se a aceitação de velocidade for 1,05, significa que o motorista daquele ônibus irá andar 5% acima da velocidade comandada. As ultrapassagens não são permitidas e todas as estações têm baia para um veículo. Os passageiros podem embarcar enquanto os ônibus estão sendo retidos.

Dada a premissa deste trabalho da existência de corredor exclusivo ao longo de todo o itinerário, não foram adicionados à simulação outros veículos que trafegam na região. Este fato simplifica consideravelmente a validação do cenário. Porém, o itinerário da linha 800 não é todo sobre corredores exclusivos. Nas regiões periféricas, da estação 1 à 28 e da estação 53 à 59 os ônibus compartilham a via com o tráfego geral. Para imitar o efeito causado pela relação com os demais veículos, foram alterados os limites de velocidade nestes trechos afim de calibrar a simulação de acordo com a operação real da linha.

Com os parâmetros de simulação e os dados de entrada definidos, espera-se que as trajetórias dos ônibus obtidas pela simulação sejam semelhantes com aquelas observadas na prática. Para comparar as trajetórias simuladas com as observadas e fazer os ajustes de calibração necessários, 10 replicações foram simuladas considerando nenhum controle da operação. As trajetórias obtidas nestas 10 replicações foram comparadas graficamente com o registro GPS dos ônibus desta linha, em dias típicos, na mesma época na qual o levantamento de demandas apresentado na Figura 10 foi realizado. Foram selecionadas as trajetórias de 3 dias típicos. As comparações foram feitas visualmente, uma a uma, cada replicação comparada com cada um dos dias típicos, resultando em 30 gráficos comparativos. A Figura 24 apresenta 3 deles, onde as calibrações necessárias já estão implementadas. Tendo em vista que os desempenhos analisados neste trabalho são todos referenciados entre si, não se faz necessário uma calibração exata da linha. Um modelo aproximado da operação é tido como suficiente.

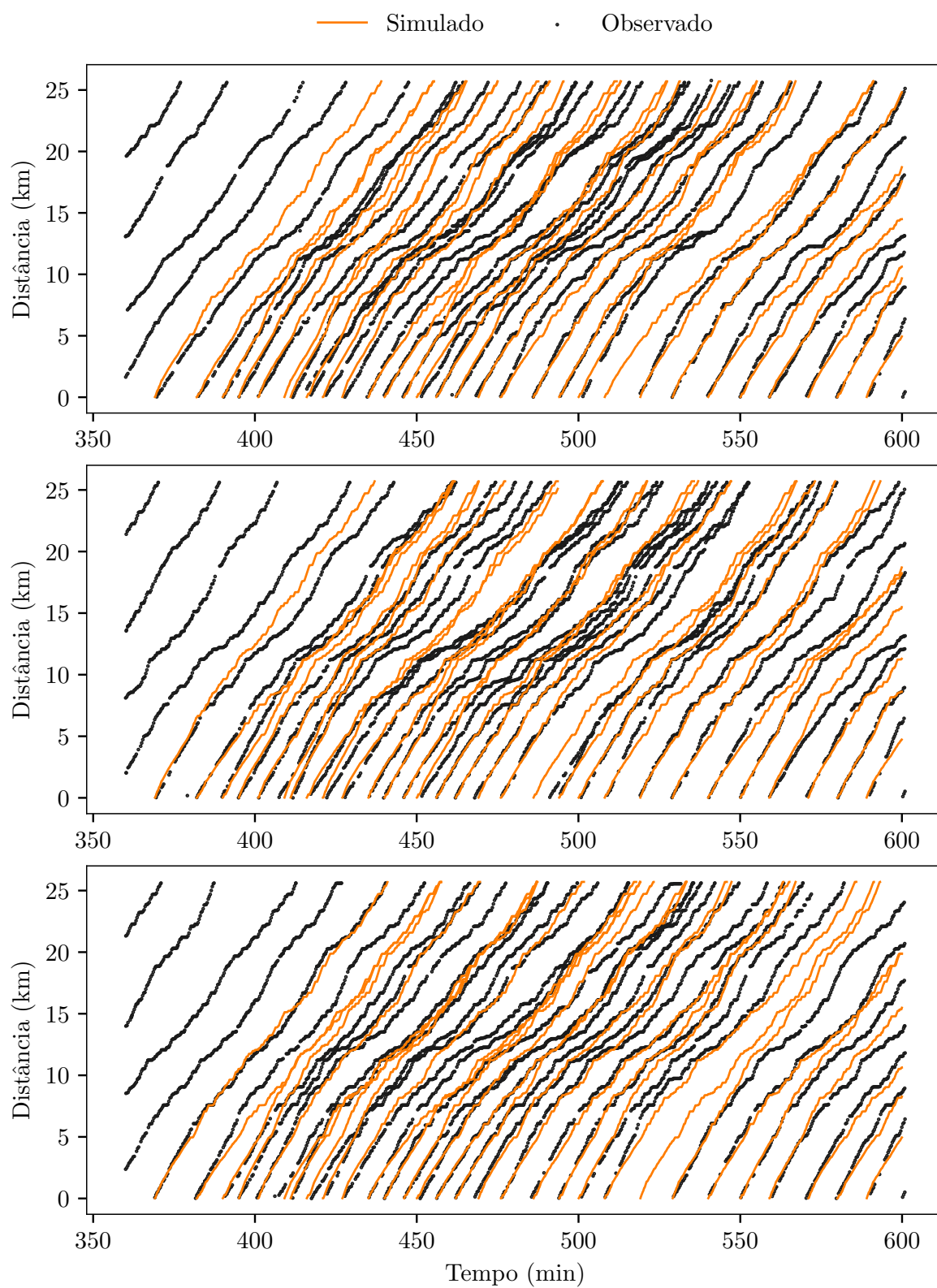


Figura 24 – falar o intervalo horário

É possível observar em todos os gráficos que há semelhança entre as trajetórias simuladas e aquelas observadas. A comparação visual não deve ser feita apenas entre trajetórias de ônibus que partem no mesmo horário, pois mesmo na comparação dos dados observados em dias diferentes, partidas do mesmo horário apresentam trajetórias distintas. O resultado da modelagem da linha 800 no Aimsun é considerado satisfatório dada a comparação geral entre as inclinações das trajetórias simuladas e observadas trecho a trecho e também por apresentarem graus semelhantes de irregularidade de intervalos.

Nos três exemplos apresentados, analisando os dados observados, existiram ônibus que não cumpriram com o quadro de horários de partida desta linha. A partida programada para o instante 510 min no primeiro exemplo e aquela programada para o instante 520 min no terceiro exemplo não ocorrem nestes dias. No segundo exemplo, a partida programada para o instante 485 min ocorreu com 5 minutos de atraso, provocando o atraso progressivo desse ônibus e um comboiamento com os ônibus que partiram na sequência. Outras partidas ocorrendo em horários diferentes dos programados podem ser observadas em todos os exemplos.

Para obtenção das trajetórias simuladas como apresentadas nesses gráficos, foi necessária uma redução da velocidade máxima permitida para os ônibus nos trechos em que não há corredor exclusivo. No trecho da estação 29 à 52, com corredor, a velocidade máxima é aquela observada na prática, 50 km/h, enquanto no trecho da estação 1 à 28 foi reduzida para 30 km/h e no trecho da estação 53 à 59 foi reduzida para 40 km/h.

APÊNDICE B – AMBIENTE DE SIMULAÇÃO PARA ESTRATÉGIAS DE CONTROLE DE INTERVALOS ENTRE ÔNIBUS

Para teste das estratégias de controle, um cenário base, descrito em detalhes no Seção 5.2.1, foi implementado em ambiente de simulação desenvolvido em linguagem Python 3.6. Este capítulo apresenta o método de geração das demandas de usuários e dos tempos de viagem dos ônibus, e o ambiente de simulação desenvolvido.

Por ser considerada uma linha circular no cenário base, a identificação da visita de uma estação por um determinado ônibus através dos índices i, k , como feito no restante deste trabalho, será substituída aqui por i, m, k' , em que m identifica a volta no circuito que o ônibus i se encontra e k' a estação. Este apêndice se aprofunda nos detalhes dos tratamentos das variáveis, inclusive quando do fim de uma volta e início de outra, portanto, variáveis como, por exemplo, $\hat{\tau}_{i,k,y}$, o tempo de viagem do ônibus i na seção y do segmento da estação k , será tratado como $\hat{\tau}_{i,m,k',y}$, o tempo de viagem do ônibus i na seção y do segmento da estação k' na volta m .

B.1 INTRODUÇÃO AO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Diferentemente do ambiente de simulação comercial, onde a simulação ocorre em passos definidos por um intervalo de tempo, neste ambiente a simulação da linha de ônibus se dá por eventos discretos, em que um evento corresponde à chegada de um ônibus em uma estação. Feito todos os cálculos para atualização do estado do sistema, ao fim do evento, o instante de chegada deste ônibus na estação seguinte é obtido, e este instante é adicionado ao dicionário de próximos eventos. A simulação segue em ordem cronológica, executando sempre o próximo evento a ocorrer no tempo. Soma-se ao instante de chegada um valor aleatório no intervalo $[0;0,01]$, com precisão de 16 dígitos, predefinido, para garantir que nenhum evento ocorra exatamente no mesmo instante. A sequência cronológica dos eventos deve ser seguida pois a atualização de estado depende de variáveis definidas em eventos anteriores (e.g.: partida do ônibus anterior nesta estação; partida deste ônibus da estação anterior).

O fluxograma da Figura 25 apresenta resumidamente o processo de simulação de uma replicação. Os blocos 1.1 e 1.2 tratam da inicialização da replicação, de onde são obtidos todos os dados de entrada. Os blocos 1.3, 1.4 e 1.11 explicam um laço de repetição *while* responsável por executar os eventos sequencialmente até que o instante de fim de simulação, predefinido, seja atingido. A variável Tempo Atual é atualizada para o instante que ocorre o próximo evento no tempo, enquanto Tempo Final é o instante predefinido que impõe o fim da simulação. Os blocos 1.5 à 1.10 atualizam o estado do sistema. Nos blocos 1.7 e 1.8 é definido o tempo de parada do ônibus na estação. No bloco 1.8 estão as leis de controle de intervalo entre ônibus, amplamente discutidas neste trabalho. O bloco 1.9 calcula a trajetória do ônibus no segmento entre esta estação e a estação seguinte,

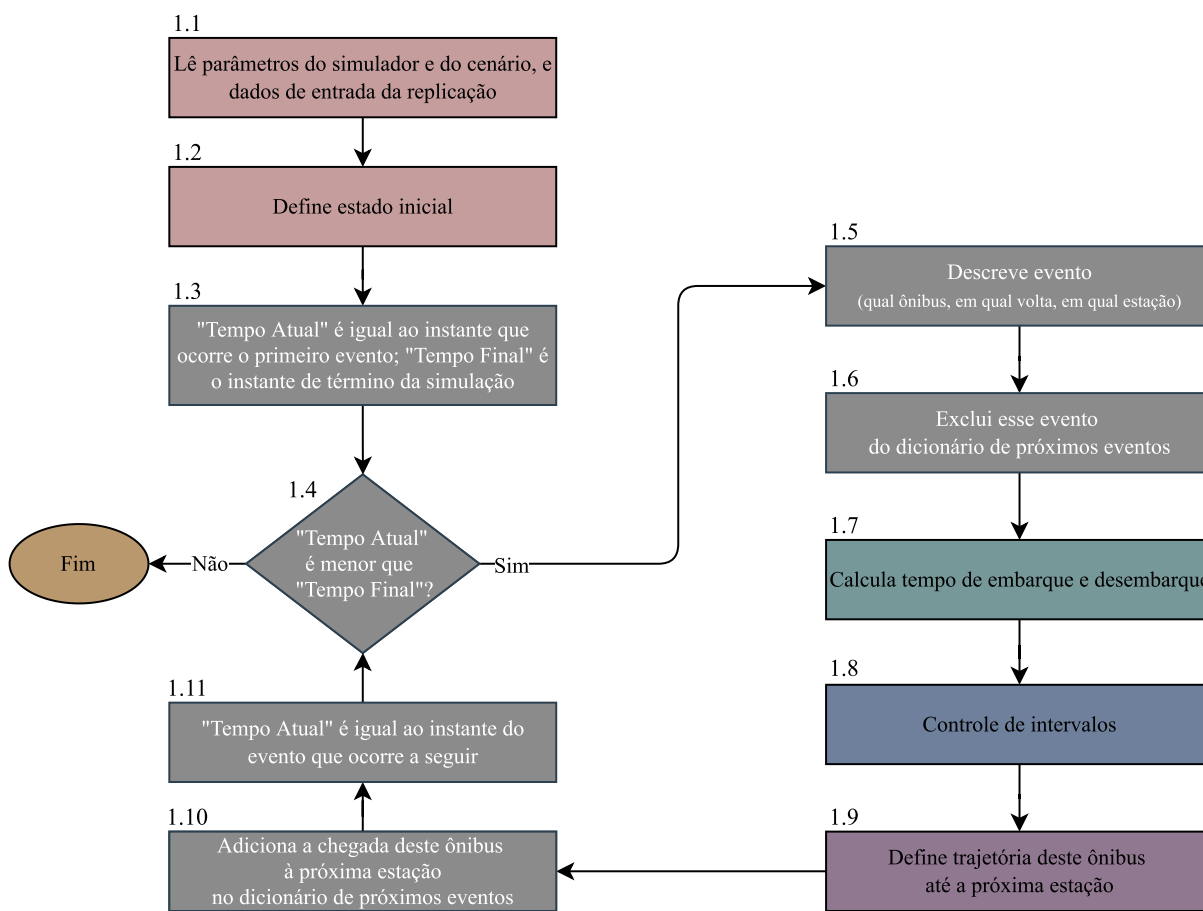


Figura 25 – Fluxograma resumido de todo o algoritmo de simulação de controle de intervalos entre ônibus de uma mesma linha.

determinando também o instante de chegada na estação seguinte, que é o próximo evento deste ônibus. Nas seções seguintes os cálculos presentes nestes blocos são explicados em detalhes.

B.2 DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada da simulação estão contidos em um arquivo. Para criação deste arquivo, implementa-se algoritmo de geração de intervalos de chegadas de usuários nas estações por sorteio aleatório da distribuição exponencial, algoritmo de geração de frações de desembarque através do sorteio aleatório da distribuição normal, bem como algoritmo de geração de tempos de viagem dos ônibus nas seções através do sorteio aleatório da distribuição normal, e determinação do início de cada fase em cada semáforo com base nas defasagens que podem ser nulas, predefinidas ou sorteadas. Portanto este arquivo, a ser lido durante a simulação, possui a informação do instante de chegada de cada usuário em cada estação, a fração de usuários que desembarcam de cada ônibus em cada estação, o tempo previsto de viagem de cada ônibus em cada seção, e o instante de início de cada fase semafórica durante o período de simulação predefinido. Por serem dados de natureza

estocástica, um novo arquivo de dados de entrada é gerado para cada replicação simulada. Nenhuma estocasticidade existe na simulação para além desta contida nos dados de entrada, portanto sempre que o mesmo arquivo de dados de entrada for importado (e for mantida a mesma estratégia de controle), o mesmo resultado final é obtido. Cada replicação pode ser executada com qualquer estratégia de controle de intervalos implementado, de forma que as estratégias sejam testados sempre em cenários exatamente iguais.

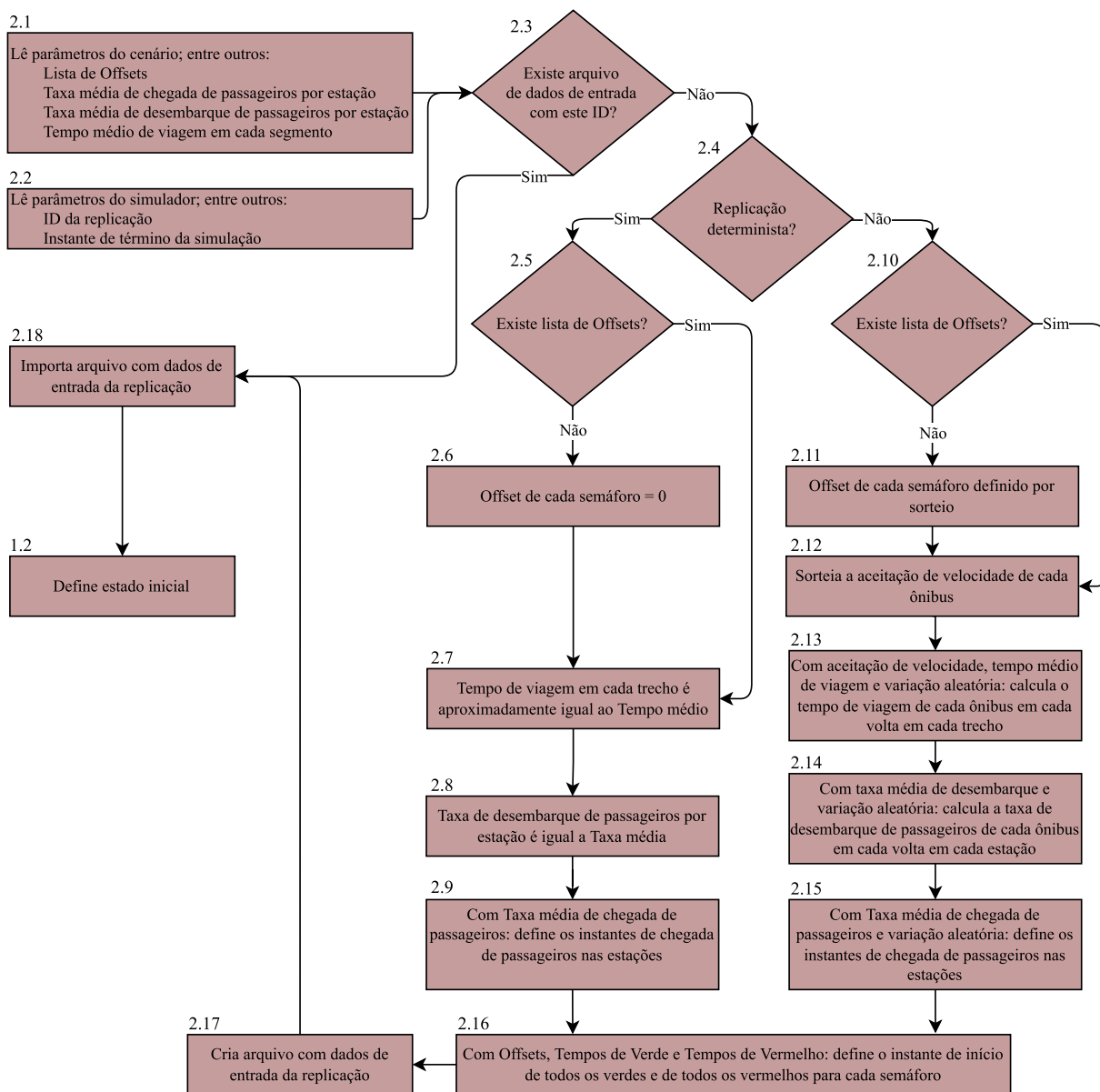


Figura 26 – Fluxograma detalhado do algoritmo de geração de arquivo com dados de entrada de uma replicação.

O fluxograma da Figura 26 expande o conteúdo do bloco 1.1 da Figura 25. As seções seguintes explicarão os blocos presentes na Figura 26 sendo identificados por “2.x”, em que x varia de 1 à 18.

O bloco 2.1 lê parâmetros do cenário, e o bloco 2.2 parâmetros do simulador, todos

descritos na Seção B.2.1. O bloco 2.3 garante que um novo arquivo com novos dados de replicação seja gerado apenas caso essa replicação não tenha sido executada antes, caso contrário, o algoritmo segue com a importação do arquivo (bloco 2.18), já criado anteriormente.

B.2.1 Parâmetros do cenário e do simulador

As defasagens semafóricas são predefinidas no caso do cenário base, e foram calculadas de forma a maximizar a banda de passagem somada de ambos os sentidos, com base no método proposto por Little (1966), utilizando o programa PYBAND (CARLSON; LUEDERS; DANTAS, 2007). A Figura 27 apresenta o resultado deste cálculo. A largura de banda de passagem resultante deste cálculo é 10% do tempo de ciclo. Todos os 11 semáforos do itinerário possuem tempo de ciclo de 120 s, sendo metade deste para verde e metade para vermelho. As linhas pontilhadas apresentam a banda de passagem, considerando um veículo trafegando com velocidade constante de 45 km/h, tanto no sentido de ida, quanto no sentido de volta.

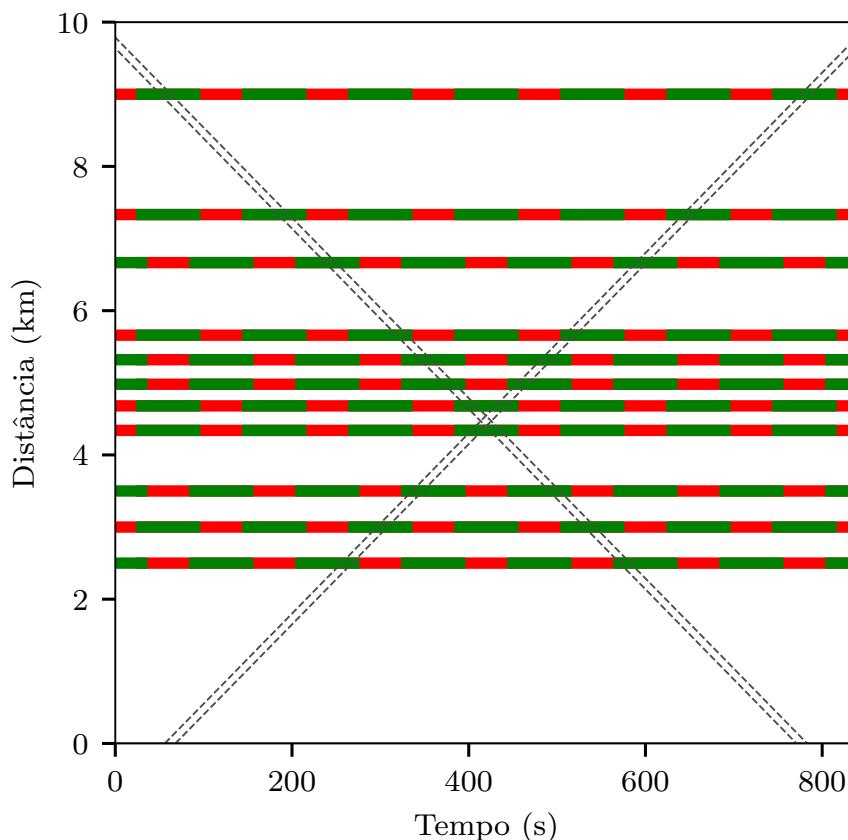


Figura 27 – Defasagens semafóricas do cenário base. Os valores de defasagem dos 11 semáforos, de baixo para cima são: 90, 30, 90, 30, 30, 90, 90, 30, 90, 30, 30 segundos.

Os valores médios de taxas de chegada de passageiros às estações e os valores médios da fração de passageiros que desembarcam são uniformes ao longo do itinerário.

Em todas as estações chegam, em média, 180 pax/h e desembarcam, em média, 15% dos embarcados.

O valor de $\bar{\tau}_{k,y}$ é obtido multiplicando a velocidade máxima do corredor pela distância da seção y da estação k . O valor de $\bar{t}_{i,k}$ é obtido executando múltiplas replicações do cenário sem estratégia de controle, sendo calculada a média do tempo de viagem para todos os ônibus que cruzaram o segmento da estação k . Os limites dos tempos de viagem nas seções, τ_y^{\min} e τ_y^{\max} , foram definidos em 100% e 200% de $\bar{\tau}_{k,y}$, respectivamente, ou seja, a velocidade máxima que pode ser comandada é a velocidade máxima do corredor, e a mínima é metade desse valor. O número de usuários embarcados inicialmente é 32 em cada ônibus. O instante final de simulação é definido em 7200 s (2 h). Demais parâmetros são definidos como os mesmos da API, apresentados na Tabela 5.

O primeiro passo da geração de um novo arquivo (bloco 2.4) é identificar se a replicação deve ser determinista ou estocástica. O ID da replicação, passado como parâmetro do simulador, é 0 para determinista, e qualquer número inteiro maior que 0 para estocástica. Se for 0, indica que para essa replicação serão usados os valores médios descritos acima, sem nenhuma aleatoriedade em torno deles. A partir destas definições iniciais pode-se efetivamente calcular os dados de entrada desta replicação.

B.2.2 Tempos de viagem

Para determinação do tempo de viagem previsto de cada ônibus em cada seção de cada volta, $\hat{\tau}_{i,m,k',y}$, antes é determinada a aceitação de velocidade de cada ônibus, que representa a complacência do motorista em aceitar o limite de velocidade, e.g., se a aceitação de velocidade for 1,05, significa que o motorista deste ônibus dirigirá 5% acima da velocidade permitida. O bloco 2.12 sorteia uma aceitação de velocidade para cada ônibus do cenário através de uma distribuição normal de média 1, desvio padrão 0,05, e truncada no intervalo [0,95;1,05]. O bloco 2.13, por sua vez, faz outro sorteio de distribuição normal de média 1, desvio padrão 0,03, e calcula o tempo de viagem previsto de cada ônibus em cada seção de cada volta:

$$\hat{\tau}_{i,m,k',y} = \bar{\tau}_{k,y} \frac{\nu_{i,m,k',y}^{\tau}}{\nu_i^{\text{acc}}}, \quad (49)$$

em que, $\nu_{i,m,k',y}^{\tau}$ é o valor aleatório sorteado neste bloco, e ν_i^{acc} é o valor aleatório de aceitação de velocidade do ônibus i , sorteado no bloco 2.12.

No caso do bloco 2.7, em que não deve haver componente aleatória significativa no tempo de viagem dos ônibus, um valor aleatório gerado tal como no bloco 2.13, mas com sua magnitude diminuída em 100 vezes é somado apenas para impedir que dois eventos (chegada de um ônibus em uma estação) ocorram exatamente no mesmo instante:

$$\hat{\tau}_{i,m,k',y} = \bar{\tau}_{k,y} + \frac{\nu_{i,m,k',y}^{\tau}}{100}. \quad (50)$$

B.2.3 Demanda de embarque e desembarque

O desembarque de usuários, calculado pelo bloco 2.8 ou bloco 2.14, é dado para cada ônibus, em cada volta, em cada estação $(q_{i,m,k'})$. No bloco 2.8, esta variável é obtida apenas definindo $q_{i,m,k'} = \hat{q}_k$ para todo i e todo m . Já no bloco 2.14, esta variável é definida por um sorteio de uma distribuição normal de média \hat{q}_k , e desvio padrão $\frac{\hat{q}_k}{2}$.

O embarque de usuários é definido durante a simulação, por ser dependente do estado do sistema no instante que ocorre o evento. A informação de entrada para cálculo do número de usuários a embarcar, a ser salva no arquivo de dados de entrada da replicação, é o instante de chegada de cada usuário em cada estação, calculada pelo bloco 2.9 ou bloco 2.15. No bloco 2.9 é considerado que os usuários chegam à estação com um intervalo uniforme entre eles, igual ao inverso de λ_k . No caso do bloco 2.15, a chegada de usuários à estação segue uma distribuição exponencial de média λ_k , a qual foi escolhida pois tal evento pode ser aproximado por um processo de Poisson (HICKMAN, 2001; DELGADO; MUNOZ; GIESEN, 2012; BERREBI; WATKINS; LAVAL, 2015).

B.2.4 Fases semaforicas

De posse dos tempos de defasagem, sejam elas predefinidas, calculadas pelo bloco 2.6, ou pelo bloco 2.11, e dos tempos de verde e vermelho de cada semáforo é determinado o instante de início de todas as fases, e salvo em listas distintas, duas para cada semáforo: lista de início de fase verde e lista de início de fase vermelha. A primeira fase de cada semáforo, que inicia ao fim do tempo de defasagem, é sempre uma fase verde. O fim da lista é definido pelo instante de fim da simulação, predefinido, somado a uma margem de segurança (500 s) devido a necessidade do modelo de otimização de trajetória (ver Seção 3.2.2) por informações de início de fases semaforicas a frente do instante de execução do evento (Tempo Atual).

B.2.5 Estado inicial

Os dados que devem ser informados para definição do estado inicial do sistema são: descrição do primeiro evento a ocorrer para cada ônibus, o instante de ocorrência, o instante de partida na última estação visitada por cada ônibus e o número de usuários embarcados neste instante de partida.

A descrição do primeiro evento a ocorrer para cada ônibus, dada por uma tupla (i,m,k') , neste caso, é obtida distribuindo os ônibus igualmente ao longo do itinerário. Por se tratar de um cenário com 10 ônibus e 10 estações, o próximo evento do ônibus 0 é parar na estação 0 da volta 1; do ônibus 1 é parar na estação 9 da volta 0; do ônibus 2 é parar na estação 8 da volta 0, e assim sucessivamente até o ônibus 9, sendo o seu próximo evento parar na estação 1 da volta 0. Esta descrição é passada como valor no dicionário de eventos, enquanto a chave do evento é o seu instante de ocorrência, dado pela soma do

instante de partida da estação anterior (a última estação visitada) com o tempo de viagem em todos as seções do segmento anterior (considera que não existe atraso semafórico no primeiro segmento percorrido por cada ônibus). Como estado inicial, é considerado que todos os ônibus partem da última estação visitada no instante 0, portanto a chave do evento é dada apenas pela soma do tempo de viagem em todos as seções do segmento anterior. Por fim, o dicionário de eventos inicial para este cenário é:

$$\{(\sum \hat{\tau}_{0,0,9}) : (0,1,0); (\sum \hat{\tau}_{1,0,8}) : (1,0,9); (\sum \hat{\tau}_{2,0,7}) : (2,0,8); (\sum \hat{\tau}_{3,0,6}) : (3,0,7);$$

$$(\sum \hat{\tau}_{4,0,5}) : (4,0,6); (\sum \hat{\tau}_{5,0,4}) : (5,0,5); (\sum \hat{\tau}_{6,0,3}) : (6,0,4); (\sum \hat{\tau}_{7,0,2}) : (7,0,3);$$

$$(\sum \hat{\tau}_{8,0,1}) : (8,0,2); (\sum \hat{\tau}_{9,0,0}) : (9,0,1)\}$$

Por exemplo: o primeiro evento do ônibus 0, que é a parada deste na estação 0, volta 1, tem sua chave calculada pela soma dos tempos de viagem deste mesmo ônibus em todas as seções do segmento 9, na volta 0.

Com todos os dados de entrada importados e o estado inicial do sistema definido, o bloco 1.3 (Figura 25) define então a variável Tempo Atual, assumida por aquele evento no dicionário que tiver o menor valor de chave, ou seja, que ocorrer primeiro. Na sequência, este elemento é excluído do dicionário (bloco 1.6), e ao fim dos cálculos deste evento, o próximo evento deste ônibus é adicionado ao dicionário junto a chave calculada.

B.3 TEMPO DE PARADA NA ESTAÇÃO

O cálculo do tempo de parada na estação é realizado com base na quantidade de usuários aguardando para embarcar e a quantidade de usuários que desejam desembarcar, somado ao tempo de retenção à ser definido de acordo com a estratégia de controle selecionada.

O fluxograma da Figura 28 expande o conteúdo dos blocos 1.7 e 1.8 da Figura 25. Esta seção explica os blocos presentes na Figura 28 sendo identificados por “3.x”, em que x varia de 1 à 16.

Para obter o tempo de embarque e desembarque de um ônibus i em uma estação k , soma-se o tempo previsto para desembarque com o tempo previsto para embarque dos usuários, por ser considerado que estes dois processos ocorrem sequencialmente nas mesmas portas, primeiro o desembarque depois o embarque. A componente de embarque é dada pela multiplicação entre o número de usuários que desejam embarcar, $\mathcal{B}_{i,m,k'}$, e o tempo de embarque de cada usuário, C_1 . A componente de desembarque é calculada de forma análoga. Assume-se que o tempo de embarque e desembarque de cada usuário é uma constante (HICKMAN, 2001), resultando em um tempo de parada linear em função do número de usuários desejando embarcar ou desembarcar, o que for maior:

$$s_{i,m,k'} = C_0 + C_2 q_{i,m,k'} l_{i,m,k'-1} + C_1 \mathcal{B}_{i,m,k'} \quad (51)$$

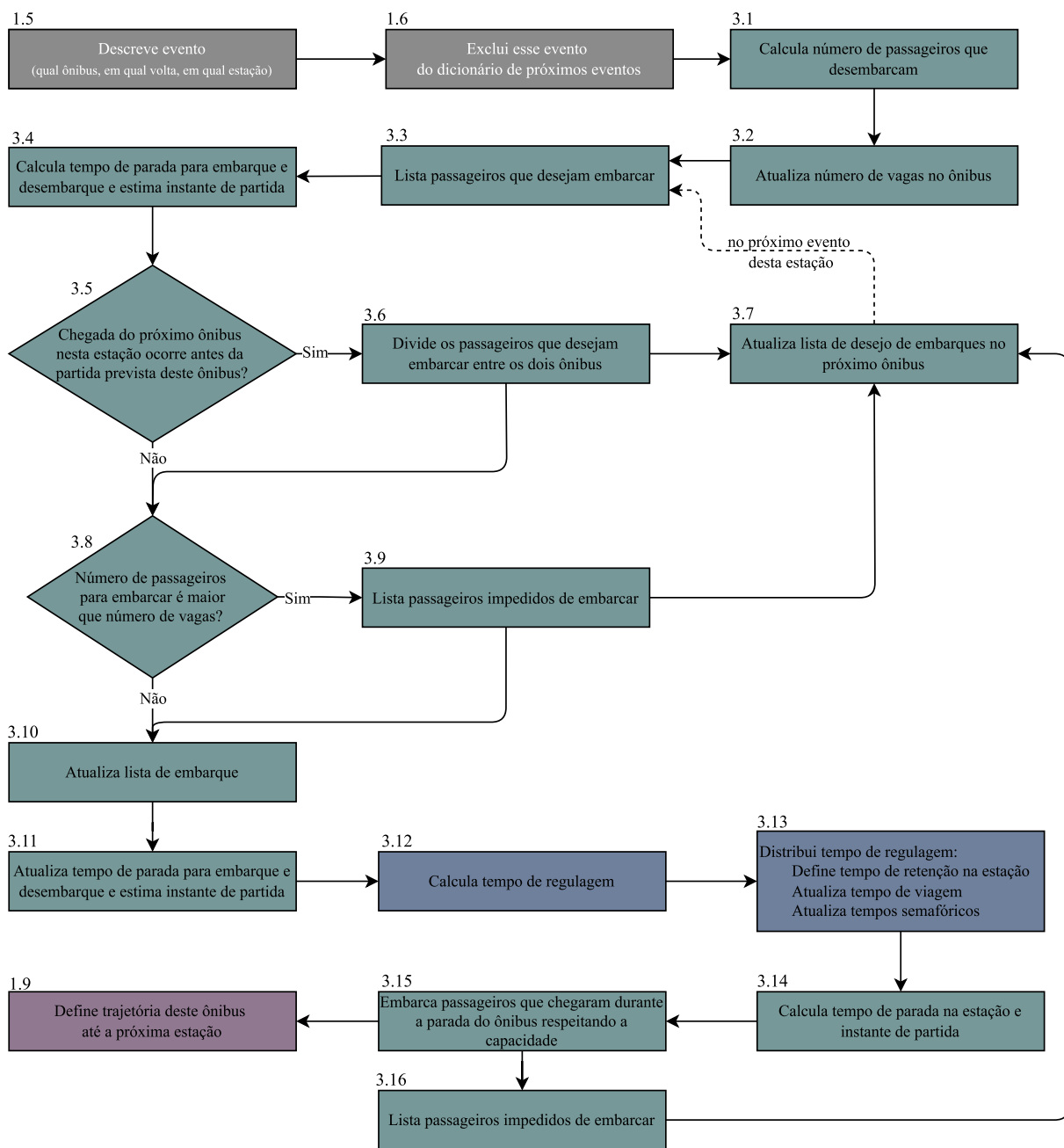


Figura 28 – Fluxograma detalhado do algoritmo de cálculo do tempo de parada de um ônibus em uma estação.

em que $l_{i,m,k'}$ é a quantidade de usuários embarcados no ônibus i no momento da partida deste da estação k' . A computação de Equação (51) é executada tanto pelo bloco 3.4 quanto pelo bloco 3.11.

Através de (51) adiciona-se ao simulador a instabilidade existente no cumprimento de horário das linhas de ônibus reais, como demonstrado por Newell e Potts (1964), pois quanto mais atrasado um ônibus estiver, mais usuários haverá na estação e mais tempo será gasto no embarque, atrasando ainda mais este ônibus. O oposto ocorre com um ônibus adiantado, adiantando-o ainda mais.

Com o arquivo de demanda gerado na Seção B.2 é possível conhecer a parcela de usuários embarcados que desejam desembarcar nesta estação, $q_{i,m,k'}$ (bloco 3.1), bem como o número exato de usuários aguardando na estação no instante de chegada de um ônibus (bloco 3.3). O valor de $\mathcal{B}_{i,m,k'}$ é obtido iterativamente através de vários blocos da Figura 28. Primeiramente o bloco 3.3 consulta a lista de instantes de chegada de usuários nas estações e soma todos os usuários que chegaram entre o instante de partida do ônibus $i - 1$ e o instante de chegada do ônibus i na estação k' . Estes são somados a possíveis usuários que chegaram antes deste período mas foram impedidos de embarcar em ônibus anteriores devido à lotação destes (bloco 3.7, executado em eventos anteriores). Assim obtém-se um valor inicial para $\mathcal{B}_{i,m,k'}$, usado para calcular uma estimativa do instante de partida deste ônibus desta estação (bloco 3.4).

Com uma primeira estimativa de instante de partida, os blocos 3.5 e 3.6 realizam uma análise de proximidade do ônibus que vem atrás deste. Caso tal ônibus tenha chegada prevista pra essa estação antes da partida deste ônibus, considera-se que parte dos usuários, ao avistarem o ônibus de trás, desistem de embarcar no ônibus que está parado na estação. Este parâmetro está definido em 50%, portanto metade dos usuários seguem desejando embarcar neste ônibus e a outra metade passa a desejar o embarque no ônibus que está parando atrás. Assim atualiza-se o valor de $\mathcal{B}_{i,m,k'}$. Sempre que um bloco atualiza o valor de $\mathcal{B}_{i,m,k'}$, executa-se também o bloco 3.7, que atualiza a lista de usuários que permanecem na estação.

Num próximo passo, os blocos 3.8, 3.9 e 3.10 verificam se $\mathcal{B}_{i,m,k'}$ é menor que o número de vagas no ônibus. Se for menor, o valor de $\mathcal{B}_{i,m,k'}$ é mantido, caso contrário o valor de $\mathcal{B}_{i,m,k'}$ é o número de vagas no ônibus, e o restante dos usuários que desejavam embarcar são somados aqueles que aguardam o ônibus seguinte (bloco 3.7). A prioridade de embarque é sempre por ordem de chegada na estação. O número de vagas é dado por,

$$v_{i,m,k'} = \mathcal{L}_i - [(1 - q_{i,m,k'})l_{i,m,k-1}] \quad (52)$$

em que, $v_{i,m,k'}$ é o número de vagas no ônibus i após o desembarque de usuários na estação k , e \mathcal{L}_i é a capacidade máxima de usuários do ônibus i . A lista de usuários impedidos de embarcar contém os instantes de chegada destes usuários. No momento de chegada do próximo ônibus, a lista de embarque deste ônibus é concatenada com a lista de impedidos

de embarcar e organizada do menor para o maior valor, portanto mantém-se assim a prioridade de embarque por ordem de chegada à estação.

O bloco 3.11 calcula o tempo atualizado de embarque e desembarque de usuários através de (51). Este é o valor final, não será mais atualizado, entretanto o instante de partida deste ônibus desta estação segue sendo uma estimativa, utilizada na sequência para cálculo da ação de controle.

Os diferentes métodos de controle apresentados no Capítulo 4 são executados nos blocos 3.12 e 3.13, a não ser que a simulação esteja sendo executada sem controle, neste caso estes dois blocos são desviados. No bloco 3.13 redefinem-se importantes variáveis de estado do sistema. Caso haja retenção na estação, este valor é calculado e somado ao tempo de embarque e desembarque de usuários, resultando no valor final de tempo de parada na estação e no instante de partida deste ônibus (bloco 3.14). Caso a replicação esteja operando com otimização de trajetória, os valores de $\tau_{i,m,k',y}$ são diretamente definidos, e os instantes de início de fases verdes e/ou vermelhas são redefinidos (previamente definidos no bloco 2.16). Caso haja atuação apenas por controle de velocidade (estratégia não utilizada neste trabalho), nenhuma variável de estado é definida no bloco 3.13, e sim calculada iterativamente no momento de definição da trajetória deste ônibus (bloco 1.9) com base no tempo de regulação calculado no bloco 3.12. O cálculo de $\tau_{i,m,k',y}$, neste caso, é detalhado na seção seguinte.

O bloco 3.15 é incluído pois considera-se que a retenção do ônibus, se houver, ocorre com as portas abertas, portanto aos usuários que chegarem a estação é permitido o embarque neste ônibus, a não ser que o ônibus já esteja lotado. Atualizadas todas as variáveis de estado relacionadas a parada do ônibus na estação, a seguir determina-se a trajetória deste ônibus até a estação seguinte.

B.4 TRAJETÓRIA DO ÔNIBUS NO SEGMENTO

O fluxograma da Figura 29 expande o conteúdo do bloco 1.9 da Figura 25, que demonstra o cálculo de trajetória desde a partida do ônibus da estação até a chegada na estação seguinte, definido neste trabalho por segmento. A trajetória é determinada iterativamente, seção a seção do segmento. Inicia-se na primeira seção, onde o instante de entrada do ônibus na seção, $\mu_{i,m,k',y}$, é igual ao instante de partida da estação.

Todos os blocos do 4.3 ao 4.7 são executados para todas as seções do segmento, independentemente de estratégia de controle. Se a estratégia não for atuação apenas sobre a velocidade, o valor do tempo de viagem nesta seção, $\tau_{i,m,k',y}$, já fora definido e é apenas lido, caso contrário, é calculado no bloco 4.4 por:

$$\tau_{i,m,k',y} = \bar{\tau}_{k,y} \frac{\hat{a}_{i,m,k'+1} - \mu_{i,m,k',y}}{\sum_{j=y}^{Y_k} \bar{\tau}_{k,j} + \sum_{j=y}^{S_k} \bar{\sigma}_{k,j}} \quad (53)$$

em que, $\hat{a}_{i,m,k'+1}$ é o instante alvo de chegada do ônibus i na estação seguinte à m,k' ,

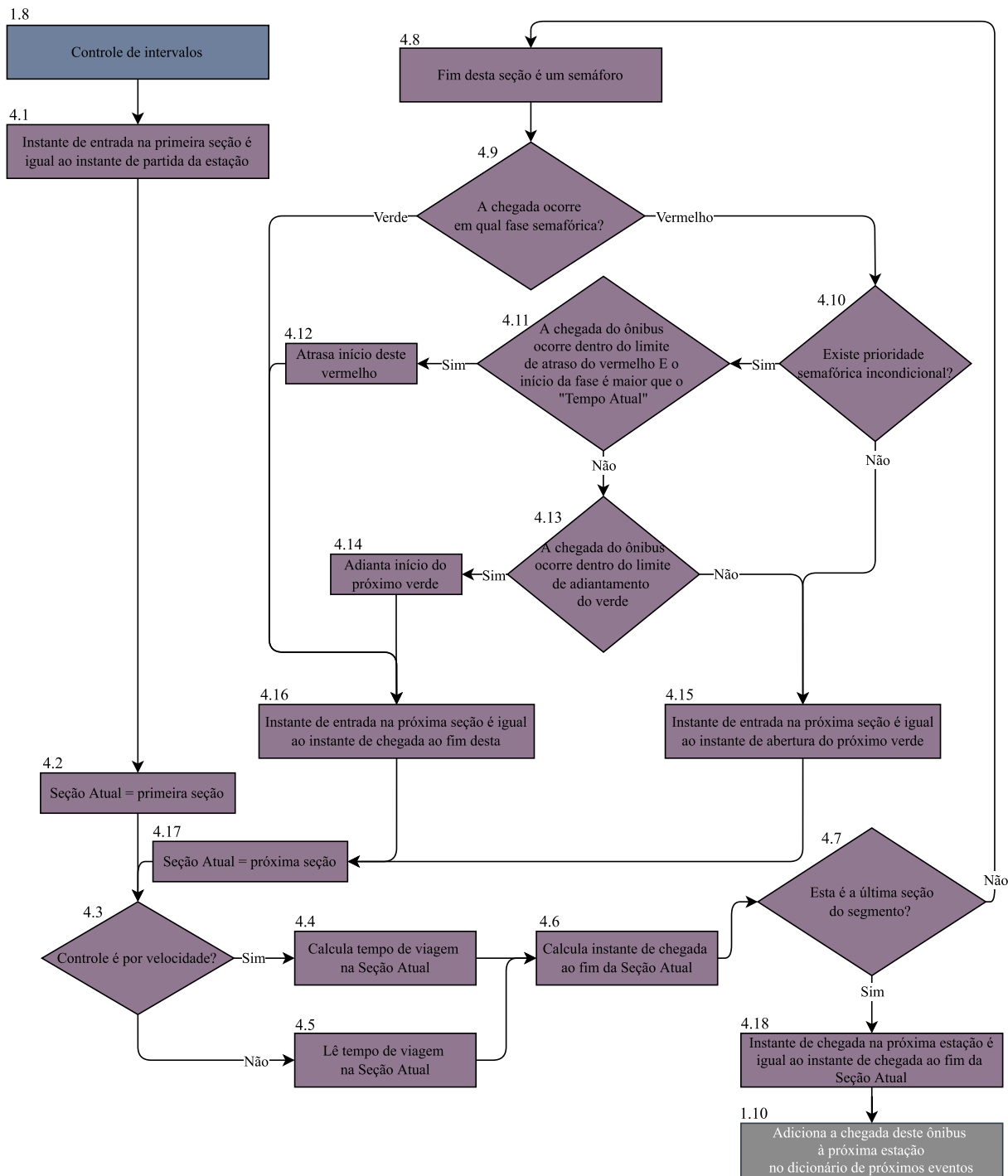


Figura 29 – Fluxograma detalhado do algoritmo que executa a trajetória dos ônibus nos segmentos do itinerário.

Y_k é o conjunto das seções no segmento da estação k , S_k é o conjunto dos semáforos no segmento da estação k (todos os elementos de Y_k menos o último), e $\bar{\sigma}_{k,y}$ é o atraso médio no semáforo da seção y do segmento da estação k . A soma no denominador retorna o tempo de viagem estimado do início desta seção até o fim do segmento, enquanto o numerador expressa o tempo de viagem desejado do início desta seção até o fim do segmento. O fator obtido desta divisão é aplicado ao tempo médio de viagem na seção. O fator não é aplicado sobre o valor previsto de viagem para este ônibus, $\hat{\tau}_{i,m,k',y}$, pois é considerado que o comportamento dos motoristas não influencia a velocidade quando esta é comandada, ou seja, todos os motoristas seguem estritamente a velocidade comandada. Por fim, o valor de $\tau_{i,m,k',y}$ é limitado entre o valor mínimo e máximo para esta seção, portanto, ocasionalmente a correção de velocidade calculada por (53) não será atingida. No caso das estratégias que utilizam otimização de trajetória, esses limites são considerados diretamente no modelo.

Caso o segmento não possua semáforos, o cálculo de trajetória é terminado já na primeira passagem pelo bloco 4.7, caso contrário segue o laço de cálculo de trajetória, até que a Seção Atual seja a última seção do segmento. Seguindo o laço de cálculo da trajetória, o bloco 4.8 verifica se o ônibus chega no verde ou vermelho do semáforo desta seção, comparando o instante de chegada do ônibus no semáforo com a lista de início de verdes e vermelhos deste semáforo. O instante de chegada do ônibus no semáforo, $\alpha_{i,m,k',y}$, é dado por:

$$\alpha_{i,m,k',y} = \mu_{i,m,k',y} + \tau_{i,m,k',y} \quad (54)$$

Se o ônibus chega no verde, o instante de entrada na próxima seção passa a ser conhecido:

$$\mu_{i,m,k,y+1} = \alpha_{i,m,k',y}, \quad (55)$$

se o ônibus chega no vermelho, então o bloco 4.10 verifica se existe prioridade semafórica incondicional (TSP). Se existir, é analisada a possibilidade de conceder prioridade, verificando primeiramente (bloco 4.11), se o ônibus chega dentro do limite predefinido de atraso de vermelho, e se o início deste vermelho ocorre após o Tempo Atual (não é possível alterar o início de uma fase que já está ativa). Se sim, então o valor de início deste vermelho é alterado para o valor de $\alpha_{i,m,k',y}$ (bloco 4.12), se não, o bloco 4.13 verifica se o ônibus chega dentro do limite predefinido de adiantamento do verde. Se sim, então o valor de início do próximo verde é alterado para o valor de $\alpha_{i,m,k',y}$ (bloco 4.14). Em todos os demais casos o ônibus aguarda a abertura do verde (bloco 4.15). Desta forma, a prioridade é concedida apenas se com ela o ônibus atravessa o semáforo sem parar. Não é concedida a prioridade para diminuir o tempo de espera pelo verde. No caso das estratégias que utilizam otimização de trajetória, ou que não utilizam controle semafórico algum, este processo é desviado diretamente aos blocos 4.15 ou 4.16. Com o valor de $\mu_{i,m,k,y+1}$ definido, a Seção Atual é atualizada para a próxima seção (bloco 4.17) e repete-se o procedimento.

Quando o Tempo Atual (bloco 1.11 da Figura 25) ultrapassa o Tempo Final, predefinido (bloco 1.4 da Figura 25), é o fim da simulação. É executado então um algoritmo final, responsável pela análise dos dados gerados ao longo da simulação e resumi-los em gráficos e indicadores de desempenho, como aqueles apresentados na seção seguinte.

B.5 TESTE DO SIMULADOR

Para demonstrar o uso do simulador desenvolvido, esta seção apresenta o resultado da simulação do cenário base, porém nenhum controle de operação é aplicado, e são retirados todos os elementos de incerteza da simulação: os semáforos estão sempre verdes; aceitação de velocidade é 1 para todos os motoristas; taxa de desembarque de usuários é igual à taxa média; e taxa de chegada de usuários nas estações é igual à taxa média. Esta análise também serve de comprovação da inexistência de fontes desconhecidas de irregularidade de intervalos, e apresenta limites teóricos de melhor desempenho da operação.

A Figura 30 apresenta um compilado de resultados desta replicação. Estes mesmos gráficos são amplamente utilizados na análise de resultados deste trabalho, no Capítulo 5, mas lá sempre para a média de múltiplas replicações, todas estocásticas.

O desvio médio absoluto de intervalos ao longo das 2 horas de simulação foi 0,002 min. O resquício de desvio, inferior a um segundo, se deve ao valor aleatório insignificante adicionado aos tempos de viagem, como descrito na Seção B.2.2, comprovando a inexistência de fontes desconhecidas de irregularidade na operação.

A Figura 30(a) apresenta o gráfico de marcha, isto é, as trajetórias de cada ônibus ao longo de toda a operação. Nele é possível observar o paralelismo entre todas as trajetórias, devido à manutenção estrita do intervalo. O intervalo médio entre os ônibus foi 2,924 min, o intervalo mínimo observado foi 2,917 min e o máximo 2,926 min.

A Figura 30(b) apresenta o tempo médio de viagem em cada segmento do itinerário, que neste caso se concentraram completamente na forma de tempo em movimento, sem qualquer parada devido a semáforo ou retenção. O tempo de viagem em cada segmento variou de 160,01 s à 160,06. Sendo que 160 s é o tempo mínimo para cruzar cada segmento, dado seus 2 km de extensão e velocidade máxima dos ônibus no corredor de 45 km/h. Os tempos de embarque e desembarque de usuários, não apresentados neste gráfico, foram, em média 15,4 s, no mínimo 15,0 s, e no máximo 15,5 s.

A Figura 30(c) apresenta o histograma das velocidades observadas ao longo da simulação. Existem apenas dois estados para os ônibus neste caso: parado para embarque e desembarque de usuários; ou em movimento entre estações com velocidade de 45 km/h. Este simulador não considera os estados de aceleração e desaceleração dos ônibus. A velocidade comercial média entre todas as viagens completas desta replicação é de 41,03 km/h, portanto, sendo este o valor máximo teórico para este cenário.

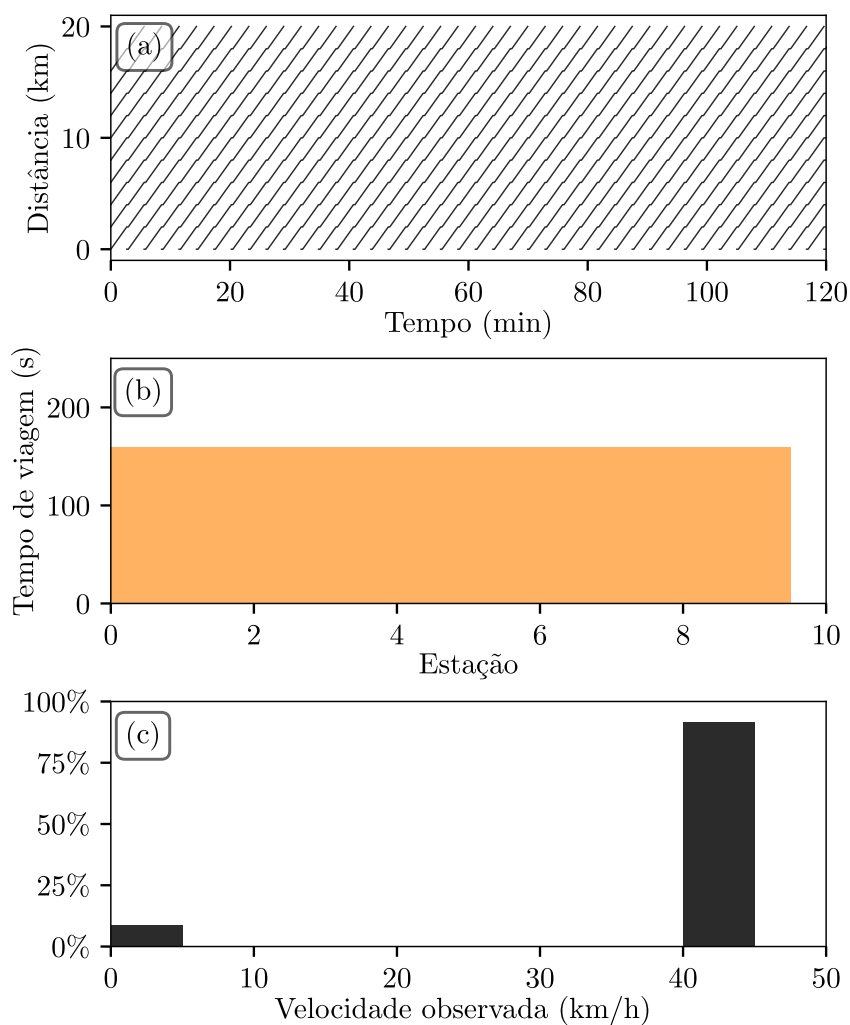


Figura 30 – Resultados do teste do simulador com replicação determinista; (a) o gráfico de marcha; (b) o tempo médio de viagem em cada segmento do itinerário; e (c) o histograma das velocidades observadas ao longo da simulação.