

ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA OPERAÇÃO DO SISTEMA “BRT”

Linha Troncal 10 de Blumenau - SC

SUMÁRIO

2

01 **INTRODUÇÃO**

02 **MODELO DO SISTEMA “BRT”**

03 **SIMULAÇÃO E RESULTADOS**

04 **CONCLUSÕES**

Justificativa

3

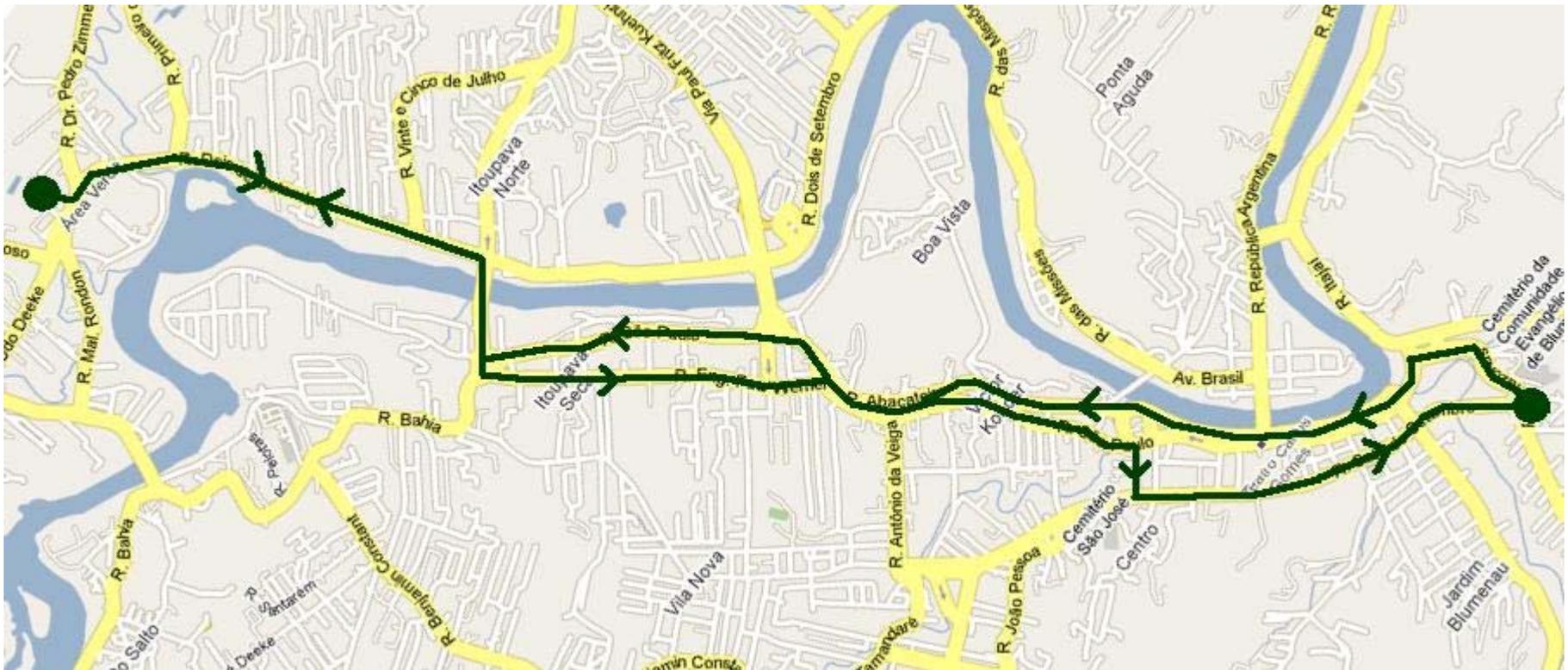
Sistemas BRT/ônibus expresso ← sujeitos a distúrbios
→ agrupamento dos ônibus → controle da operação



Objetivo

4

Desenvolvimento de um modelo mesoscópico para o sistema de ônibus expresso Troncal 10 de Blumenau - SC



Modelo do Sistema Ônibus Expresso:

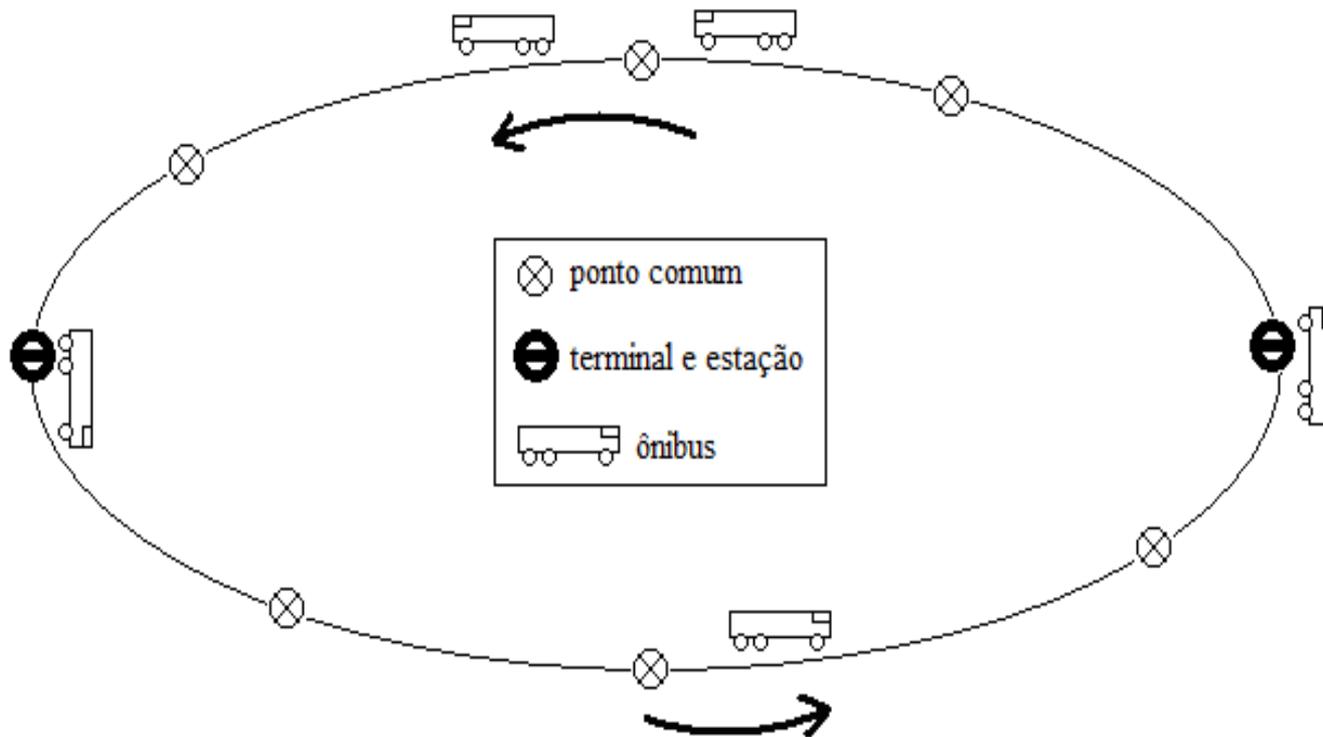
5

Modelo “BRT”



Programação
Matemática

(Função Custo + Restrições)



Dados disponíveis do sistema BRT (ITS):

- instante de partida dos ônibus dos últimos pontos
- número de passageiros embarcados na saída do ônibus do último ponto
- resíduo inicial de passageiros nos pontos
- taxa de chegada dos passageiros aos pontos
- fração de passageiros que desembarcam nos pontos
- tempos para embarque e desembarque de cada passageiro
- tempo nominal de viagem dos ônibus entre pontos

Limitações:

- horizonte de pontos limitados no cálculo do impacto da ação de controle
- não há ultrapassagem entre ônibus

Aproximações:

- tempo de viagem dos ônibus entre pontos aproximado pelo valor nominal
- tempos de embarque e desembarque aproximados por uma função linear

Função Custo do Sistema BRT (atraso dos passageiros)

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} \left[\frac{\lambda_k}{2} (d_{i,k} - d_{i-1,k})^2 + re_{i-1,k} (d_{i,k} - d_{i-1,k}) + l_{i,k-1} (1 - q_k) (h_{i,k} + s_{i,k}) \right]$$



passageiros que
chegam ao ponto



resíduo de passageiros
no ponto



passageiros que
desembarcam



não convexa

i : índice dos ônibus

ω : volta m associada ao ponto k

Terminais Urbanos (02)

9



Estações Embarque/Desembarque (04)

10



Pontos comuns (26)

11



Ônibus articulados (17)

12



Restrições i): dinâmica do sistema

13

(9)

$$a_{i,\omega} = d_{\langle i,\omega^- \rangle} + r_k \quad \Rightarrow \quad \text{instante de chegada do ônibus ao ponto}$$

$$v_{i,\omega} = C_{\max} - l_{\langle i,\omega^- \rangle} (1 - q_k) \quad \Rightarrow \quad \text{vagas disponíveis no ônibus}$$

$$p_{i,\omega} = re_{\langle i^-, \omega \rangle} + \left(d_{i,\omega} - d_{\langle i^-, \omega \rangle} \right) \lambda_k \quad \Rightarrow \quad \text{potencial de passageiros para embarcar}$$

$$t_{i,\omega}^{des} = \frac{C_2 q_k l_{\langle i,\omega^- \rangle}}{n} \quad \Rightarrow \quad \text{tempo para o desembarque dos passageiros}$$

Características e Diferenciais:

- Terminais e Estações X Pontos Comuns
- Tipo do Ônibus
- Ônibus: lota X não lota
- Processo predominante: embarque X desembarque

Caso 1: Ponto comum

15

(9)

1 A) o ônibus lota → escolha do processo mais lento :

EMBARQUE

X

DESEMBARQUE



$$s_{i,\omega}^{u0} = C_0 + C_1 v_{i,\omega}$$



$$s_{i,\omega}^{u0} = C_0 + \frac{C_2 q_k l_{\langle i,\omega^- \rangle}}{n}$$

1 B) o ônibus não lota → escolha do processo mais lento :

EMBARQUE

X

DESEMBARQUE

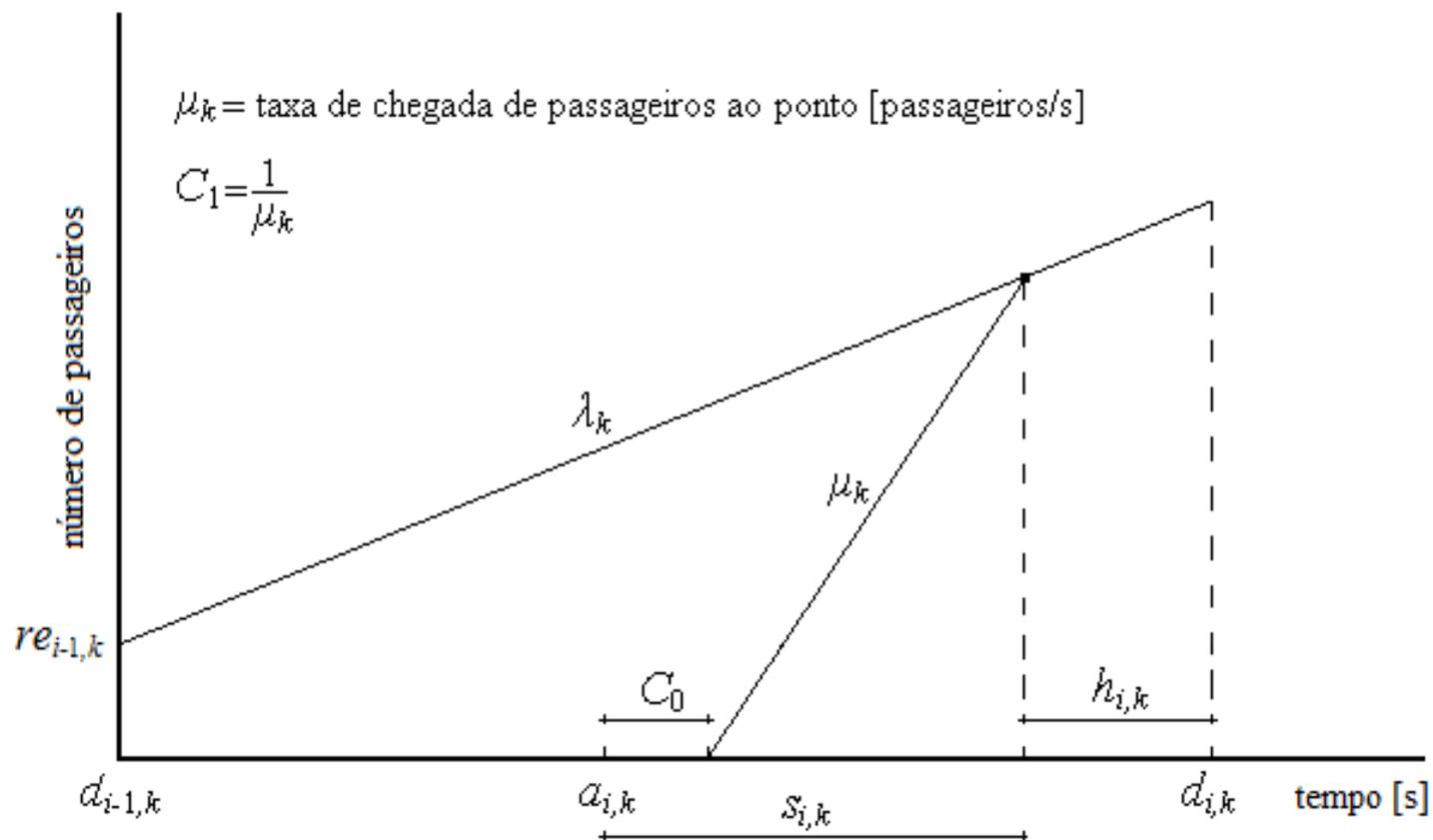


$$s_{i,\omega}^{u1} = \frac{C_0 + C_1 \lambda_k \left(a_{i,\omega} - d_{\langle i^-, \omega \rangle} \right) + C_1 re_{\langle i^-, \omega \rangle}}{(1 - C_1 \lambda_k)}$$



$$s_{i,\omega}^{u1} = C_0 + \frac{C_2 q_k l_{\langle i, \omega^- \rangle}}{n}$$

Figura – Processo de embarque (caso 1B)



Caso 2: Terminal e estação

18

(9)

2A) o ônibus lota → soma dos processos :

DESEMBARQUE + EMBARQUE



$$s_{i,\omega}^{u0} = C_0 + \frac{C_2 q_k l_{\langle i,\omega^- \rangle}}{n} + \frac{C_1 v_{i,\omega}}{n}$$

2B) o ônibus não lota → soma dos processos :

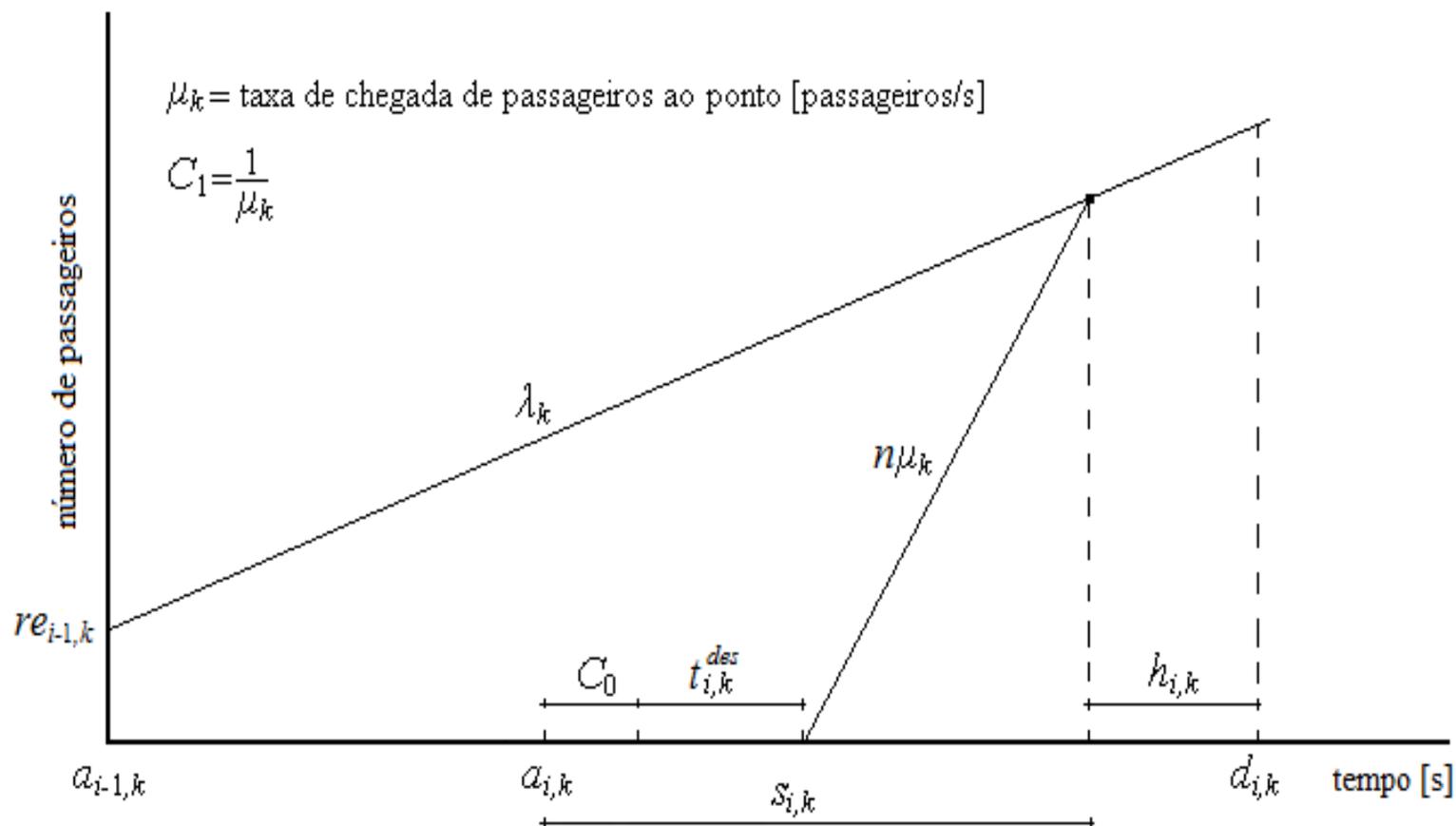
DESEMBARQUE + EMBARQUE



$$S_{i,\omega}^{u1} = \frac{nC_0 + C_1\lambda_k \left[\left(a_{i,\omega} - d_{\langle i^-, \omega \rangle} \right) + C_1 re_{\langle i^-, \omega \rangle} + nt_{i,\omega}^{des} \right]}{(n - C_1\lambda_k)}$$

Figura – Processo de embarque (caso 2B)

20



Escolha casos: 1 X 2 e A X B

21

- Caso 1 (ponto comum) X Caso 2 (terminal e estação)
 - ➔ Definição via conjunto de pontos comuns e conjunto de terminais e estações
- Caso A (ônibus lota) X Caso B (ônibus não lota)
 - ➔ Escolha via mínimo (1A,1B) ou entre mínimo (2A,2B)

processo de embarque
e desembarque



$$S_{i,\omega} = \dots$$

Restrições ii): dinâmica do sistema

22

$d_{i,\omega} = a_{i,\omega} + s_{i,\omega} + h_{i,\omega}$ \Rightarrow instante chegada do ônibus ao ponto

$a_{i,\omega} \geq d_{\langle i^+, \omega^- \rangle} + e_{\min}$ \Rightarrow instante mínimo de partida do ônibus do ponto

$h_{i,\omega} \leq h_{\max}$ \Rightarrow tempo máximo de retenção dos ônibus

$l_{i,\omega}^{u1} = (1 - q_k) l_{\langle i, \omega^- \rangle} + p_{i,\omega}$ (não lotado) \Rightarrow número de passageiros embarcados no ônibus

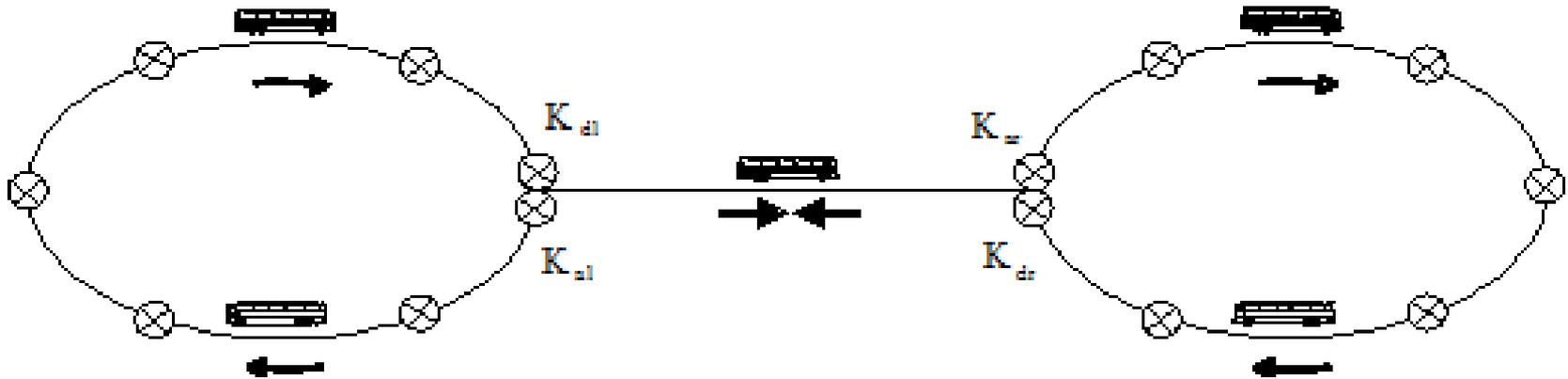
$l_{i,\omega}^{u0} = C_{\max}$ (lotado)

$re_{i,\omega}^{u1} = 0$ (não lotado) \Rightarrow resíduo de passageiros no ponto

$re_{i,\omega}^{u0} = p_{i,\omega} - v_{i,\omega}$ (lotado)

Restrições iii): segmento bidirecional

23



$$\left. \begin{aligned} d_{i,k_{dl}} &\geq a_{j,k_{al}} - C_5 x_{i,j} \\ d_{j,k_{dr}} &\geq a_{i,k_{ar}} - C_5 (1 - x_{i,j}) \end{aligned} \right\} \quad i, j \in I (i \neq j), \text{ tal que}$$

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

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

Modelo inicial \rightarrow programação não linear inteira mista

(impossibilidade de solução tempo real)

Solução \rightarrow função custo convexa (simplificação)

estimativa do resíduo de passageiros nos pontos

estimativa do número de passageiros embarcados

$$f = \sum_{i \in I} \sum_{k \in N_i} \left[\frac{\lambda_k}{2} (d_{i,k} - d_{i-1,k})^2 + \overset{\wedge}{re}_{i-1,k} (d_{i,k} - d_{i-1,k}) + \hat{l}_{i,k-1} (1 - q_k) (h_{i,k} + s_{i,k}) \right]$$

e restrições adicionais

+ processo iterativo até convergência ...

Simulação: Cenário Troncal 10 Blumenau - SC

25

Tabela 1: Dados de simulação para o cenário Troncal 10 utilizando-se o modelo BRT_BLU

parâmetro	ônibus i																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$l_{i,\omega}$ [s]	130	67	73	65	67	68	63	94	69	130	130	65	74	69	75	69	72
$re_{i,\omega}$ [psg]	11	0	0	0	0	0	0	0	0	51	9	0	0	0	0	0	0
$d_{i,\omega}$ [s]	497	455	510	428	452	457	414	401	473	629	624	432	516	473	534	465	504
Custo Total = 677.091,737 [s]																	

Simulação: Cenário Troncal 10 Blumenau – SC Bidirecional

26

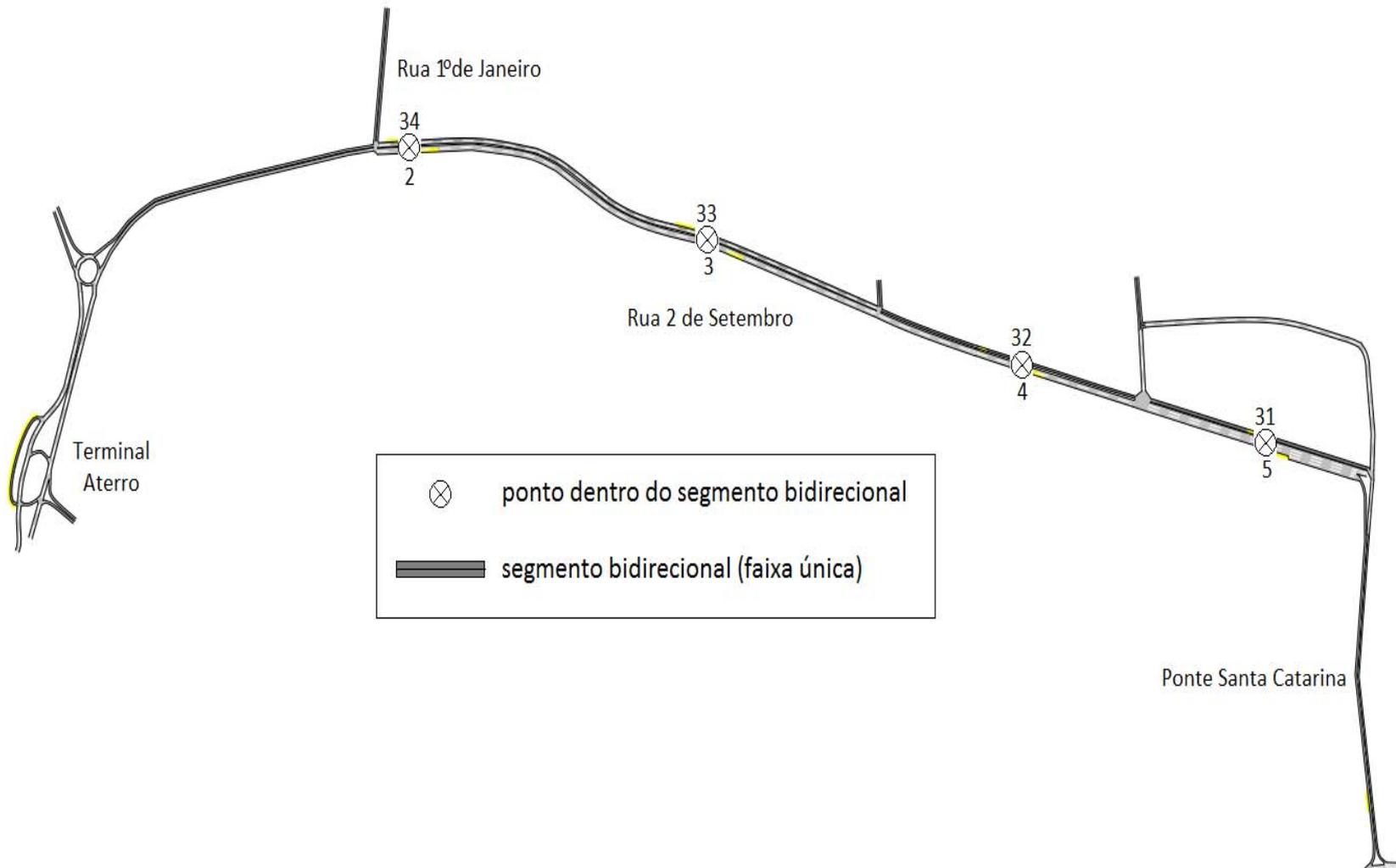


Figura – Gráfico da trajetória dos ônibus – Troncal 10 (Segmentos Bidirecionais)

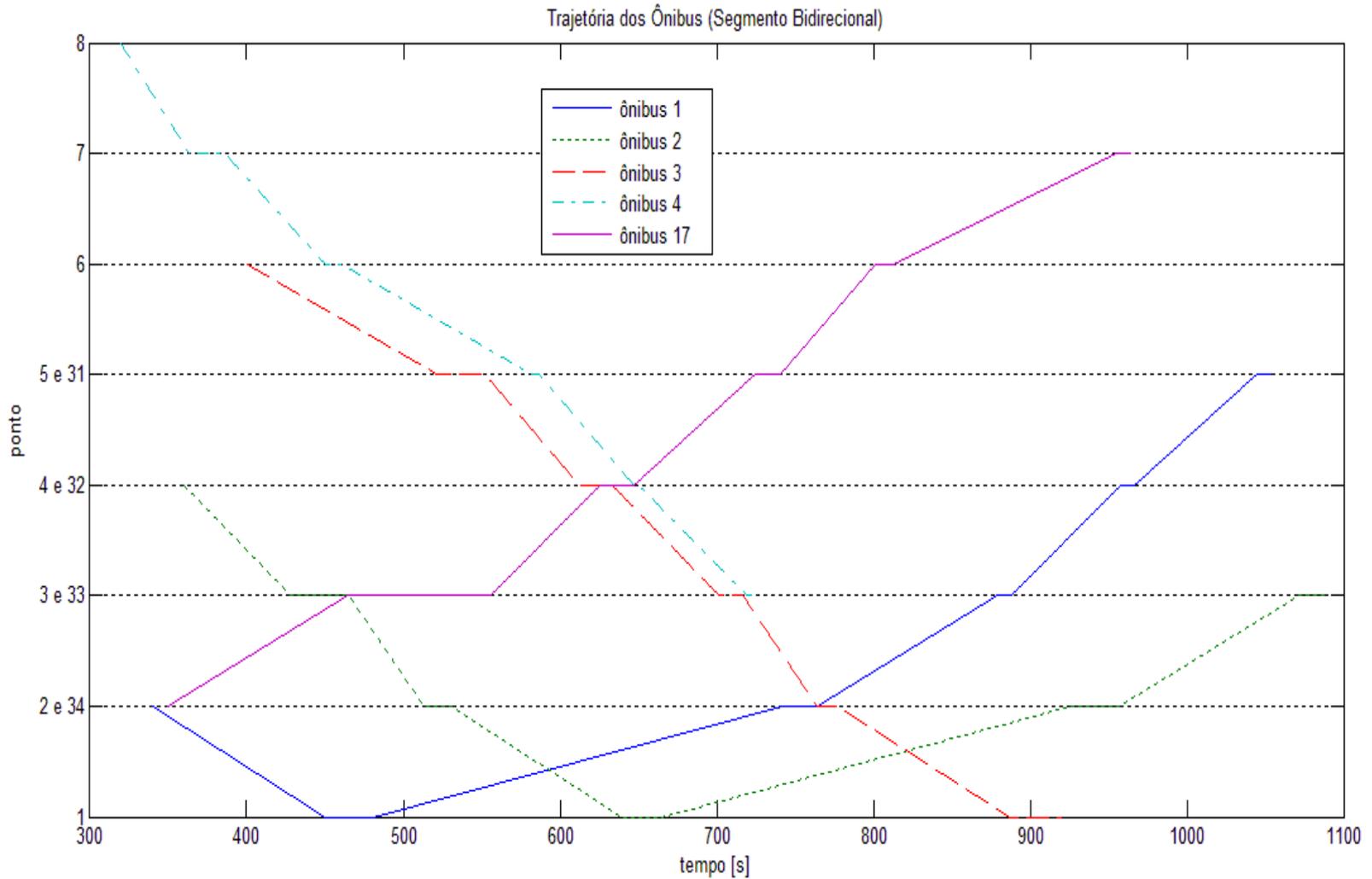
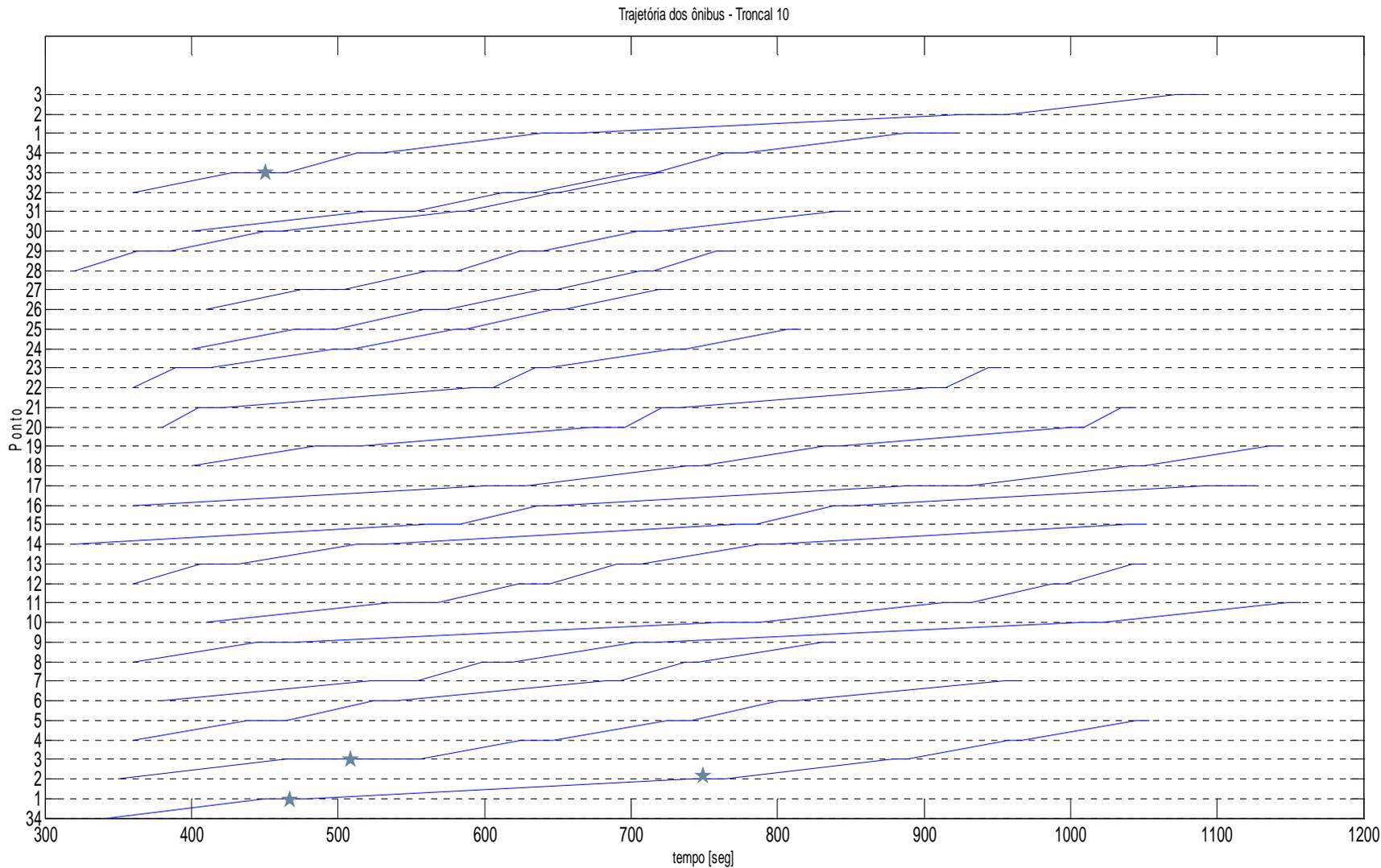


Figura – Gráfico da trajetória dos ônibus – Troncal 10 (Circuito Completo)



- O modelo **BRT** linear inteiro misto de programação matemática + procedimento iterativo \Rightarrow quase ótimo global
- Controle dos espaçamentos dos ônibus
- Controle da disputa dos ônibus em segmentos bidirecionais
- Representação de particularidades e detalhes da operação real de sistemas BRT/ônibus expresso
- Solução de controle viável para aplicações em tempo real
- Possibilidade de prioridade semafórica para os ônibus
- O modelo **BRT** mostra-se promissor para operação tempo real de sistemas BRT e aplicação em outros cenários reais