

A correção efetuada
no título dessa tese atendeu-se
instruções do Proc. 214/75 conf.
requisições da COMISSÃO TVL-
GADORA. (fls. 34 do ref. processo)
BC, 9/8/77

Maria Alves de Paula Ravaschio

MARIA ALVES DE PAULA RAVASCHIO
RESP. EXPEDIENTE DA DIRETORIA TÉCNICA
DA BIBLIOTECA CENTRAL

~~MODELO DE SIMULAÇÃO PARA~~ REGULAÇÃO

DE TRANSPORTES COLETIVOS USANDO
UM MODELO DE SIMULAÇÃO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA/ELETRÔNICA

~~UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS~~ "REGULAÇÃO

DE TRANSPORTES COLETIVOS USANDO
UM MODELO DE SIMULAÇÃO"

por

LUIZ FERNANDO BRITO BAPTISTELLA

Orientador: Prof. WALTER DELAZARO

Tese apresentada à Faculdade
de Engenharia de Campinas da
Universidade Estadual de Cam
pinas.

Novembro de 1976

- Sumário -

Uma linha de ônibus inclusa no tráfego urbano é um sistema instável onde qualquer perturbação, uma vez ocorrida, provoca a desregulação do serviço, num processo realimentador. Os ônibus que se atrasam, por exemplo devido à interação com os demais veículos que circulam na rede viária urbana, encontram maiores filas de passageiros nas estações, com o que se atrasam ainda mais. Desta forma os mesmos tendem a formar pelotões e conseqüentemente o atraso de esperados usuários nas estações aumenta, já que surgem grandes intervalos entre as passagens dos pelotões formados.

Este estudo visa a obtenção de medidas, ditas de regulação, que ajam corretivamente nas marchas dos ônibus de forma a compensar, em lugares determinados, os efeitos da deterioração do serviço decorrente destas perturbações. A idéia básica é fazer-se uma previsão da situação geral da linha a cada instante que um ônibus chega no local de regulação e a partir desta previsão obter-se qual o instante ótimo de partida do mesmo, minimizando o atraso total dos usuários. Este procedimento, tornando-se antieconômico para ser testado num sistema real, além de provocar grande desconforto ao público, requer o uso de um simulador de tráfego urbano suficientemente detalhado para permitir o acompanhamento de um ônibus qualquer em seu percurso. Os testes realizados mostraram que as melhorias conseguidas com este procedimento, em relação a uma situação de referência tradicional, baseada na obediência de um horário rígido, são bem significativas.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO

1. Situação atual dos transportes coletivos	01
2. Melhorias no sistema de ônibus e objetivos do estudo	04

I. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS

1.1 - Os princípios da regulação	10
1.2 - Possíveis estratégias de controle	13
1.3 - O trabalho proposto	16

II. SIMULAÇÃO DE UMA LINHA DE ÔNIBUS

II.1 - O simulador escolhido	19
II.2 - O modelo	20
II.2.1 - Representação da rede no simulador ...	24
II.2.2 - Representação dos ônibus no simulador.	24
II.2.3 - A simulação	26
II.2.4 - Simulação do comportamento dos ônibus num segmento qualquer	27
II.2.5 - Cálculo dos critérios de desempenho ..	32
II.2.5.1 - Tempo de espera médio dos passageiros	33
II.2.5.2 - Tempo de percurso médio - dos passageiros	35
II.2.5.3 - Conforto dos passageiros ..	36
II.3 - O programa de simulação (aspectos gerais)	37
II.4 - Exemplo	38

III. DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE REGULAÇÃO

III.1 - Escolha do critério para otimização	42
III.2 - Princípios gerais da regulação	46
III.2.1 - Regulação de Horário	46
III.2.2 - Regulação do Intervalo	51
III.3 - O modelo de previsão	52
III.4 - Regulação no terminal	54
III.4.1 - Definição do problema estocástico.	55
III.4.2 - Resolução do problema determinís- tico	58
III.4.3 - Redução do problema estocástico ..	64
III.4.4 - Resolução do problema estocástico.	66
III.5 - Regulação nas estações.....	70
III.5.1 - Princípios da regulação nas esta- ções	70
III.5.2 - Descrição do algoritmo	70
III.6 - Duas ações excepcionais: A injeção e a meia volta	71
III.6.1 - Injeção	71
III.6.2 - Meia Volta	72
III.7 - Conclusão	73

IV. COMPARAÇÕES E RESULTADOS

IV.1 - A situação de referência	75
IV.2 - Validação dos testes	77
IV.2.1 - Estimação da duração mínima do regi- me transitório	77

IV.2.2 - Número de repetições necessárias para validade das medidas	79
IV.3 - Resultados	80
IV.3.1 - Funcionamento normal	81
IV.3.1.1 - Tempo de espera médio	81
IV.3.1.2 - Tempo de percurso médio - dos passageiros	84
IV.3.1.3 - Demanda recusada	85
IV.3.2 - Funcionamento com perturbações significativas	87
IV.3.2.1 - Sem uso de políticas excepcionais	87
IV.3.2.2 - Usando políticas excepcionais	89
IV.3.3 - Sensibilidade dos Critérios.....	93
IV.3.3.1 - Número de estações de regulação	94
IV.3.3.2 - Número de ônibus em serviço	96
IV.4 - Conclusões	98
Anexo I - Dados da rede e dos usuários da linha de ônibus	102
Anexo II - Diagramas espaço-tempo das políticas estudadas	117
Bibliografia	130

INTRODUÇÃO

1 . SITUAÇÃO ATUAL DOS TRANSPORTES COLETIVOS

O rápido aumento do número de veículos para transporte individual em nossos centros urbanos, principalmente devido à adoção de um modelo consumista de incentivo à produção automobilística, e em contrapartida a negligência e inércia do planejamento de transportes coletivos fizeram com que nos últimos dez anos se agravasse muito as condições de transporte, notadamente em centros como a Gran-de São Paulo.

Um diagnóstico preparado por três consultorias, mostrando em detalhes os problemas fundamentais do Estado de São Paulo foi encomendado pelo atual governo paulista e teve como resultado uma série de 29 volumes mostrando de maneira clara as deficiências de transporte do maior aglomerado urbano do país[*]. O estudo mostra que o tempo médio - gasto em viagens sofreu um acréscimo de 30% no período de 1968 a 1974 (de 20 para 26 minutos) acarretando uma perda diária de 1,4 milhão de horas/homem e de CR\$ 1,7 bilhão por ano, custo equivalente a 15,6 Km. de linha de metrô. Segundo o relatório, este aumento foi decorrente do crescimento do número de viagens (98%) de 1968 a 1974 e do número de veículos (278%) sem o correspondente crescimento do sistema viário (14,6%) no mesmo período. A previsão é de que mantendo-se esta tendência "a perda de tempo de circulação alcançará níveis intoleráveis".

Dentre os vários tipos de transporte coletivo normalmente em utilização, os ônibus aparecem como os mais prejudicados, tanto por interagirem diretamente com os automóveis como pelas características peculiares de exploração a que estão sujeitos.

[*]. Gazeta Mercantil de 25/08/75- Transporte de Massa -
"A inércia criou um grande desafio"

O mesmo documento afirma categoricamente que "o sistema de transportes coletivos apresenta distorções e completa inadequação para as dimensões da demanda. Neste sistema os ônibus urbanos trafegam com lotação superior à sua capacidade, em péssimas condições de operação, conforto e segurança enquanto que as linhas de subúrbio satisfazem apenas 4% da demanda". O principal meio de transporte urbano na Grande São Paulo é o ônibus, responsável por mais de 60% das viagens realizadas, mas apesar de possuir uma frota respeitável (cerca de 8.000 ônibus em 1975) ela é altamente deficiente: carros velhos (média de 7 anos, quando é recomendável 4 anos), inseguros, com alta frequência de quebras dada a quase total ausência de manutenção preventiva por parte das empresas. Adicione-se a estes inconvenientes o fato de haver cerca de 120 empresas envolvidas, a maioria sem pessoal de planejamento, e ter-se-á um pequeno quadro do problema a enfrentar.

Os automóveis, proporcionando inicialmente menores tempos de viagem, maior conforto, conveniência e promoção social deflagraram uma grande alteração na divisão modal dos centros urbanos, levando as vias de locomoção dos mesmos a uma rápida saturação de suas capacidades, e por maiores que fossem os "esforços administrativos", o tráfego congestionou-se cada vez mais. Já em 1971, São Paulo, por exemplo, apresentava nas horas de pico uma velocidade média na região central de 4 a 5 Km/hora, e de 10 Km/hora a velocidade comercial, média de toda a cidade (*).

Na disputa pelos mesmos espaços nas ruas e avenidas, o sistema de ônibus teve sua regularidade e viabilidade grandemente afetada, principalmente por serem veículos com baixa relação (potência)/(peso), por terem paradas-frequentes para subida e descida de passageiros e pela bai-

(*) Gazeta Mercantil de 25/08/75 - Transporte de Massa -

"A inércia criou um grande desafio"

xa manobrabilidade.

Por outro lado, sendo o sistema de ônibus um empreendimento factível à iniciativa privada, ocorre uma nova degeneração nos serviços à medida em que os empresários, visando a maximização de seus lucros, diminuem o número dos ônibus em circulação ou simplesmente não renovam e aumentam suas frotas, acompanhando o aumento da demanda de passageiros. Estes fatos são relatados pelos próprios empresários, (*), argumentando que não sentem-se encorajados a investir nas frotas em situações indefinidas, principalmente com relação à renovação de contratos de exploração. Um outro fato, mais desaperecebido, é que as perturbações do tráfego congestionado deterioram o atendimento aos passageiros, levando a uma diminuição do número de passageiros transportados por veículo e por dia (de 1800 pass/ônib/dia para 600 pass/ônib/dia, em 5 anos) e consequente redução dos lucros das empresas.

Todos estes problemas geram um ciclo vicioso, pois:

- o baixo padrão atual dos serviços dos ônibus desestimula a sua utilização pelos usuários dos automóveis, mesmo sentindo os efeitos do congestionamento no tráfego.
- como a divisão modal e as políticas de planejamento não se alteram, os ônibus continuam com baixo padrão de serviço.
- fazendo pressões para que ocorram aumentos tarifários, os empresários geram repressão na demanda existente, principalmente nas linhas de percurso pequeno, já que grande parte dos usuários desistem da viagem a fim de economizar o valor da tarifa.

(*) Gazeta Mercantil de 27/08/75 - Transporte em massa -

"Tarifa, o único problema?"

2 . MELHORIAS NO SISTEMA DE ÔNIBUS E OBJETIVOS DO ESTUDO

Básicamente as medidas mais eficazes para a resolução dos problemas atuais do sistema de ônibus seriam duas:

- a) Restrições aos carros particulares em circulação , nas regiões onde a influência exercida sobre os ônibus torna-se crítica. Estas restrições podem ser traduzidas tanto por medidas diretamente ligadas aos automóveis (proibições de estacionamento, redução dos corredores de tráfego) como por medidas ligadas aos ônibus (prioridade em cruzamentos, faixas exclusivas).
- b) Melhoria das frotas e dos serviços atuais dos ônibus, inclusive no sentido de adequar ao sistema de ônibus o papel de sistema alimentador de transportes básicos de massa. (metrô, transporte ferroviário suburbano).

Torna-se claro que estas medidas só serão realmente eficazes se forem implantadas simultaneamente, já que é imprudente tentar-se o contrário, e notamos então que estas implantações, além de requererem grandes investimentos, necessitam de uma mudança radical na forma em que é encarado tradicionalmente o problema. O quadro atual não permite mudanças drásticas no comportamento do tráfego de uma cidade em favor dos transportes coletivos, mais por razões político-sociais do que por problemas técnicos.

Baseando-se, portanto, em que as situações atuais de tráfego e divisão modal não sofrerão grandes modificações, mesmo com as fracas medidas já tomadas neste sentido nos últimos anos, um estudo mais aprofundado dos problemas na forma global fogem aos nossos objetivos imediatos e nos limitaremos ao estudo de medidas implantáveis a curto

prazo, principalmente na área dos serviços fornecidos aos usuários, pois uma abordagem mais cuidadosa tem mostrado que um sistema de ônibus qualquer, controlado (idealmente), pode se recuperar, em termos de regularidade, dos efeitos do tráfego congestionado a que está sujeito.

Numerosas experiências foram realizadas neste sentido, [1], [2] todas visando um aumento de troca de informações entre um regulador de linha e os ônibus. Porém, na maioria dos casos o regulador não é capaz de tomar uma decisão eficaz, pois além de não conhecer a situação geral dos ônibus da linha e do tráfego num determinado momento, não sabe os efeitos decorrentes da decisão que tomar. Por exemplo, a partir de uma situação dada e para um horizonte de tempo dado, não é capaz de fornecer as horas de partida mais adequadas dos ônibus num terminal ou num ponto intermediário.

O objetivo de nosso estudo é definir um sistema de controle e regulação automática de uma linha de ônibus com traçado já definido, integrando as informações fornecidas em tempo real pelos ônibus. A base deste sistema é de minimizar o tempo de espera dos passageiros nas estações.

No primeiro capítulo levantamos os principais aspectos do problema de controle nos serviços dos ônibus, os possíveis tipos de regulação e os princípios que guiam a obtenção dos modelos de otimização.

Como os testes destes modelos tornam-se anti-econômicos quando realizados num sistema real, nos apoiamos num simulador de tráfego urbano [3], baseado no deslocamento de veículos individualizados, e que é tratado no capítulo II.

As políticas de regulação propostas são objeto do capítulo III, onde a partir da previsão da marcha dos

ônibus, calculamos as horas ótimas de partida dos terminais ou estações.

A eficácia destas medidas em relação a uma si tuação de referência é obtida no capítulo IV.

CAPÍTULO I

DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS

Basicamente a finalidade de um sistema de transporte por ônibus numa cidade é assegurar o deslocamento dos usuários nos instantes e lugares requeridos e em princípio sob as melhores condições de confiabilidade, regularidade, segurança e conforto.

As companhias exploradoras destes serviços - necessitam, para isto, de veículos e equipamentos para circulação, de pessoal de operação, meios econômicos, conhecimento das características físicas e da demanda de viagens - na rede viária urbana. O modo de exploração tradicionalmente usado baseia-se em:

- linhas ou rotas, de ônibus definidas "a priori", com terminais e estações intermediárias fixas (pontos);
- a utilização de uma parte de seus veículos e equipamentos, para a linha em questão, com o respectivo pessoal para operação;
- horários, fixados "a priori", de passagem de ônibus nas estações, possivelmente através de uma otimização dos serviços, mesmo empiricamente.

Nota-se que este tipo de exploração é satisfatório aos usuários à medida em que são feitos ajustes no tamanho da frota e nos horários de passagem pelas estações - de acordo com o crescimento e modificações da cidade servida. Porém, além de haver a limitação do número de ônibus em serviço pelas companhias, ainda existe o problema de que este modo de exploração tende a ser inutilizado pelo comportamento dinâmico do tráfego existente no local.

Os dados "estacionários" nos quais a exploração dos serviços se baseia podem atingir uma variabilidade não previsível, pois:

- o cruzamento de um fluxo de tráfego tendendo à saturação pode ocasionar aumentos anormais e imprevi-

- síveis nos tempos de percurso dos ônibus;
- acidentes, engarrafamentos, obras no percurso, quebras de veículos, falta de pessoal são todos fatores que produzem não só atrasos, como irregularidades na marcha dos ônibus:

O congestionamento do tráfego é obviamente um importante fator de degeneração, especialmente em serviços com alta frequência de passagem de ônibus pelas estações e quando combinados com alta demanda de passageiros. Sob estas condições existe uma tendência pronunciada à formação de "trens e ônibus", isto é, o fato de que um ônibus, uma vez atrasado, encontra em média mais passageiros que sua taxa "normal" esperando nas estações seguintes, atrasando-o - ainda mais, ao passo que o ônibus seguinte, se está andando no horário, encontra menos passageiros e demorando menor tempo para recolhê-los tende a se adiantar, emparelhando-se com o ônibus anterior após a passagem por algumas estações.

Este fenômeno foi bem estudado por Newell e Potts [4], que obtiveram de forma analítica um fator que traduz as consequências de uma perturbação (por exemplo, um ônibus que se atrasou no percurso) e sua propagação

$$FMP = \frac{(n+m-2)}{(n-1)(m-1)} \cdot \left(\frac{K}{K-1} \right)^{m-1} \cdot \left(\frac{1}{1-K} \right)^{n-1} \quad (I.1)$$

onde n = número da estação após aquela em que iniciou a perturbação,

m = número do ônibus sofrendo a perturbação

K = relação (taxa de chegada de passageiros na estação) / (taxa de subida de passageiros no ônibus)

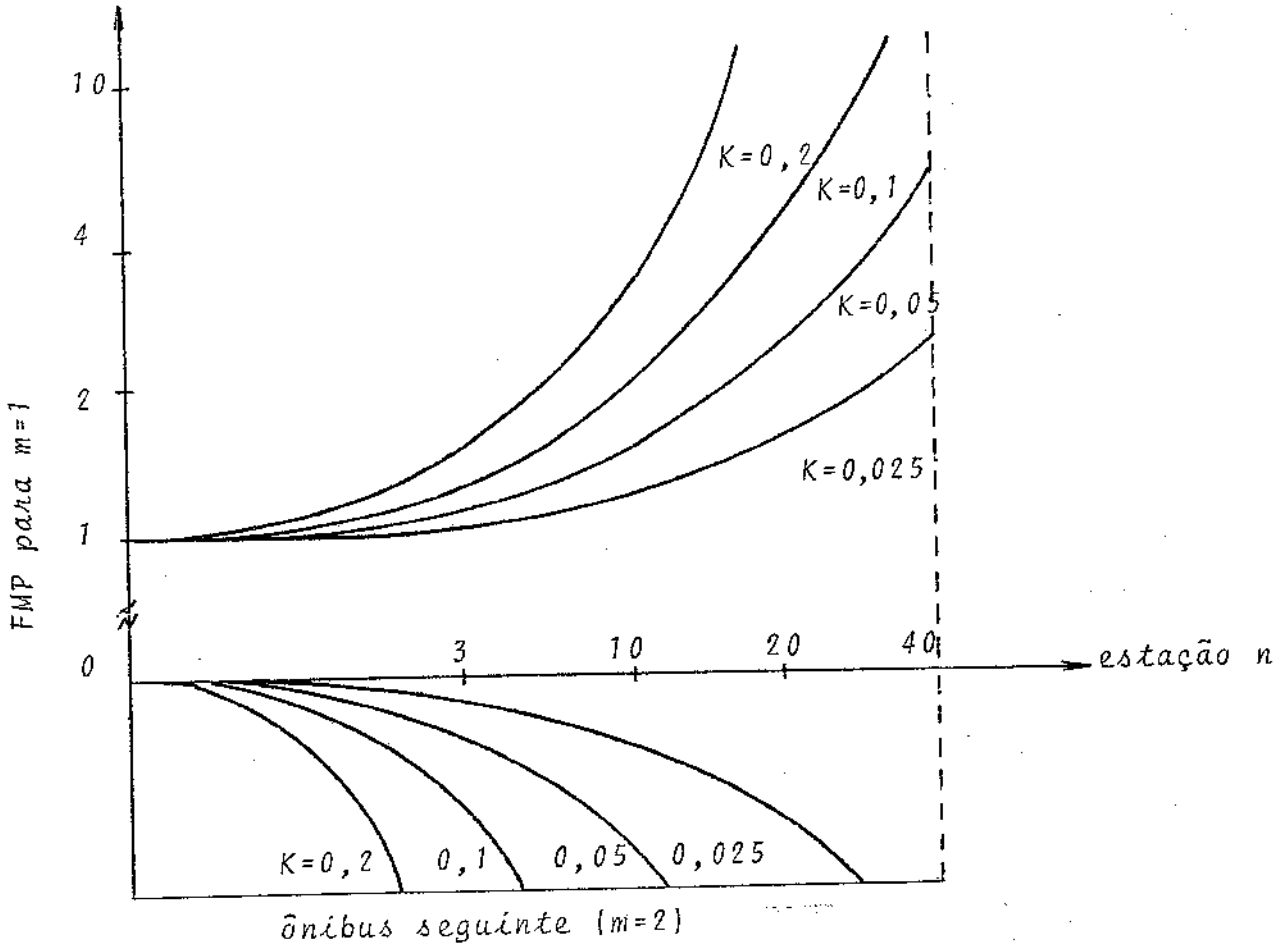


FIG.1.1 - Crescimento do distúrbio dos "trens de ônibus"

Dado um ônibus m que sofreu uma perturbação na estação n , podemos observar que:

- a instabilidade na estação $\bar{e}$ dada pelo termo $\frac{K}{K-1}$, que normalmente $\bar{e}$ pequeno e mostra uma diminuição da influência da perturbação aos ônibus subsequentes. Porém, se K exceder 0,5 este termo excede 1,0 e então a perturbação inicial $\bar{e}$ aumentada para os ônibus subsequentes, mesmo sendo considerada uma única estação.

Também deve ser notado que o termo $\bar{e}$ negativo e mostra que os ônibus tendem sequencialmente a adiantarem-se ou atrasarem-se, dando origem aos falados "trens".

- o efeito no ônibus inicial $\bar{e}$ dado pelo termo $\frac{1}{1-K}$ - que $\bar{e}$ normalmente pouco maior que 1, e quando

torna-se grande a perturbação tem um enorme aumento. A figura mostra o fator de magnitude para diferentes valores de K .

Fica claro que, se não temos possibilidade de anular os efeitos das perturbações até a chegada dos ônibus a um terminal, os mesmos retornam e a perturbação continua crescendo de estação para estação, dando mostras de um sistema extremamente instável.

É corrigindo estes "trens" e a irregularidade provocada que podemos esperar maiores benefícios dos sistemas de regulação dos ônibus. Quanto maior for a frequência dos ônibus pelas estações e maior for o comprimento da linha influenciada por estes acontecimentos, maior é a tendência ao emparelhamento e maior a escala de controle necessária.

1.1 - Os princípios da regulação

Sente-se então a necessidade de controlar o sistema de ônibus de uma forma que minimize as perturbações sobre o mesmo, prevendo-se ações complementares corretivas, ditas de regulação, cuja regra é compensar a cada instante os efeitos dos obstáculos com que se defrontam o pessoal de serviço quando tentam respeitar as missões que lhes foram impostas pelo sistema de exploração.

Dado um serviço que tende a se tornar cada vez mais degenerado se nenhuma ação corretiva for tomada, então os objetivos de um controlador são quatro:

- a) manter aderência ao horário pré-estabelecido;
- b) manter um intervalo uniforme entre os ônibus;
- c) assegurar que a troca das equipes de trabalho ocorra nos horários e lugares marcados;
- d) tratar com emergências (quebras, congestionamento) assim que surgem.

Apesar de [a] e [b] parecerem definições alternativas de um mesmo objetivo, isto não é inteiramente verdade, pois a ênfase que o controlador põe na primeira depende de quanto a tabela de horário é importante ou não. Então, se o intervalo médio entre ônibus é de 10 minutos ou menos, ou seja, se a frequência tende a ser alta, tanto faz ao passageiro que está numa estação de pegar um ônibus particular ou não, já que provavelmente não se refere a um horário.

Nestas condições, se um ônibus é cancelado - ou está atrasado, torna-se então uma estratégia admissível - ao controlador atrasar o ônibus anterior àquele (ou, raramente, adiantar o posterior) afim de igualar os intervalos sem se referir a um horário. Porém, o benefício concedido por esta ação aos passageiros que esperam nas estações é feito às custas do aumento do tempo de percurso dos passageiros - que estão nos ônibus, mas geralmente é aceito que o tempo de espera nas estações é mais penoso que o tempo gasto viajando e então existirá um benefício líquido aos passageiros. Aliás, o termo "tempo de espera dos passageiros" tem sido mencionado como sinônimo de confiabilidade no serviço de ônibus, e apesar de que outros fatores, particularmente o tempo de percurso também influenciam na apreciação do usuário - ao nível do serviço, é sabido que a maior consequência de um serviço deteriorado é o aumento do tempo de espera nas estações, principalmente devido ao emparelhamento dos ônibus. Então seu uso como medida de confiança é justificado.

Por outro lado, se o intervalo médio de passagem dos ônibus é relativamente longo (15 minutos ou mais) a maioria dos passageiros regulares estarão esperando por um ônibus em particular e se neste caso, como resultado do cancelamento ou atraso de um ônibus, o operador alterar deliberadamente os horários dos próximos, criarão problemas - não só para os passageiros do primeiro ônibus mas também pa

ra os demais. Então, em serviços com intervalos longos, se um ônibus está seriamente atrasado, o objetivo do controlador é trazê-lo de volta ao horário o mais rápido possível.

Quanto à preocupação do Item (c), o que normalmente acontece em linhas de ônibus de nossos centros urbanos é que as trocas de equipe de trabalho ocorrem em lugares e horários desapropriados, inclusive tornando-se um fator de degeneração dos serviços. Então o controlador deve assegurar que os ônibus cheguem aos lugares de troca de pessoal o mais próximo do horário previsto, de forma a minimizar os atrasos decorrentes desta troca.

Torna-se claro, também, que a falta de uma equipe de trabalho desregula totalmente os serviços se o ônibus respectivo for retirado de circulação, principalmente se este serviço tem como base a obediência de um horário prêestabelecido e com intervalamento grande entre os ônibus (15 minutos ou mais). Estudos efetuados em sistemas reais - [5] têm mostrado que os efeitos destes ônibus retirados do serviço sobre a regularidade são grandes, pois os "buracos" produzidos tendem a se propagar, levando a um maior acrêscimo no tempo de espera dos passageiros que o ocasionado pelo emparelhamento de ônibus no percurso (os "trens"). Esta influência porém é reduzida nos serviços com maior frequência, onde não existe um horário básico e os passageiros não ficam esperando por um ônibus em particular.

Um estudo mais detalhado do problema de turnos de trabalho e trocas de equipes em locais e horários apropriados deve ser uma preocupação de todas as empresas exploradoras de serviço, já que não é prático querer regular uma linha para compensar a falta de ônibus necessários à absonção da demanda de passageiros. Tal estudo, porém, foge aos objetivos de nosso trabalho.

Finalmente o último item diz respeito aos fatores que mais prejudicam o sistema de ônibus, já que seus efeitos não permitem um controle imediato da situação, res-tando então uma minimização de seus efeitos posteriores. Um acidente ou engarrafamento que acontece numa linha de ônibus impedindo a continuidade do trajeto trãs como consequência o emparelhamento de vários ônibus que chegarão ao final do percurso completamente fora do horário. Se não forem toma-das medidas corretivas, dificilmente será regenerada a regu-laridade do serviço, e vemos claramente a necessidade de uma boa coleta de informações do estado da linha, no tempo, pelos controladores ou qualquer sistema de controle, de forma que o aparecimento destas perturbações seja rapidamente deteta-do , permitindo o uso da política mais adequada para corri-gi-las.

1.2 - Possíveis estratégias de controle

Duas grandes classes de ação podem ser consi-deradas com o intuito de melhorar a regularidade e confiabi-lidade de uma linha de ônibus.

- Uma diz respeito a todas ações possíveis - sobre a rede viária, se traduzindo por uma diminuição dos tempos de percurso e por uma diminuição das aleatoriedades da circulação. Tais ações visam a adoção de prioridades ao transporte coletivo em detrimento do transporte individual, proporcionando um uso mais intenso dos corredores de circu-lação que lhes são concedidos. As comumente usadas são: ex-clusividade de faixas de tráfego para os ônibus, tanto no sentido do fluxo dos segmentos como contrário ao fluxo; cru-zamentos com sinalização sensível à chegada dos coletivos ; corredores exclusivos aos ônibus. Ações deste tipo não depen-dem somente das empresas exploradoras, mas também dos pode-res públicos e das coletividades locais e por isto estão su-

feitas às inércias intrínsecas destes sub-sistemas. Além - disto , devido ao fato de que a redução dos corredores de tráfego aos automóveis não origina uma redivisão modal tão espontânea se outras medidas não forem levadas paralelamente, então estas ações estarão simplesmente reduzindo as capacidades das vias para o mesmo volume de automóveis, facilitando a invasão dos corredores exclusivos pelos mesmos e a volta da situação anterior.

- A outra diz respeito a todas ações possíveis sobre a marcha dos ônibus para tirar o melhor partido possível da situação da rede viária urbana com um estado de obstrução e congestionamento dado. São várias as técnicas que podem ser empregadas [5], todas visando a recuperação de um horário pré-estabelecido ou a manutenção de intervalos iguais entre os ônibus, e podem ser implementadas por inspetores ou controladores de rua ou então por controle centralizado.

A extensão do controle de velocidade dos ônibus no tráfego é limitada, usualmente preferindo-se tratar os desvios do horário em um número de pontos fixos limitados. Isto é feito levando-se em conta modelos repetidos de comportamento, ou seja, o fato de que ônibus atrasados são regularmente capazes de "ganhar tempo" no final do percurso.

Os pontos terminais de percurso são locais - privilegiados para execução destes controles, pois além de permitirem a parada do ônibus durante o tempo necessário , não existe incômodo aos passageiros, já que o ônibus está - vazio. Pode-se fazer, então, uma regulação terminal baseada num "tempo de regulação" que permita amortecer os possíveis atrasos dos ônibus em relação a um horário previsto ou para a manutenção de um intervalamento requerido. Por outro lado, apesar dos ônibus que chegam cedo num terminal poderem esperar até o horário de partida, este controle pode ser removido

do e os ônibus colocados em circulação assim que o intervalo mínimo de parada seja atingido (para descanso do pessoal de serviço), se isto ajuda a manter uma taxa de despacho regular.

Uma outra forma de controle possível é atentativa de manutenção de um intervalamento entre ônibus em pontos intermediários do percurso. Porém, atrasar um ônibus - que tende a se aproximar do anterior no percurso sempre afeta os passageiros que estão a bordo e este controle somente deve ser aplicado em serviços com alta frequência, onde uma pequena parada intermediária pode restabelecer um intervalamento dado.

Apesar de serem medidas facilmente realizáveis pelas empresas, existe uma relutância das mesmas em agir desta forma, pois os benefícios advindos não refletem claramente em seus ganhos, enquanto que os atrasos refletem em suas perdas.

Estes procedimentos de regulação permitem a obtenção de uma boa regularidade nos serviços sem perturbação excepcional, principalmente ao evitarem que pequenos distúrbios se acumulem e deterioremem-no. Porém tornam-se insuficientes no caso de grandes perturbações (quebra, engarrafamento). Quando fica claro que o percurso de um ônibus está tão atrasado que, apesar de voltar imediatamente ao chegar no terminal, continuará atrasado, pode ser útil então - seu retorno antes de chegar ao terminal. Porém, se o ônibus está levando passageiros, os mesmos deverão ser transferidos para o seguinte e isto dificulta a ação, tornando-se apenas viável onde dois ou mais ônibus seguem juntos, fato que raramente acontece em rotas com grandes intervalos.

Toda vez que uma perturbação excepcional cria um "buraco" no serviço ocasionando aumentos anormais dos in -

tervalos entre ônibus, podemos compensá-lo ou pela remoção de um ônibus que está emparelhado com o anterior e anda no sentido oposto ao percurso perturbado, ou pela injeção de um ônibus reserva na linha, ou pela remoção de um ônibus de outro serviço. Qualquer destes métodos pode ser justificado durante o instante crítico, mas levando-se sempre em consideração que o excesso ou falta de ônibus deve ser corrigido depois da regeneração do serviço.

1.3 - O Trabalho proposto

Concentraremos nossos estudos na regulação terminal, que dentre as ações sobre a marcha dos ônibus aparece como fundamental, e tendo como desdobramento o estudo da regulação intermediária, complementar da anterior e que evita a diminuição da influência da mesma nas regiões mais congestionadas, pois o tráfego intenso tende a inutilizar os procedimentos de regulação.

As companhias exploradoras utilizam-se destes métodos, mas numa escala mínima, pela fiscalização nos terminais das tabelas de horários pré-estabelecidos através de controladores de linha ou fiscais. Este procedimento caracteriza-se por um fraco nível de apreciação do estado presente de funcionamento da linha, pois impossibilita a previsão da rotação dos ônibus nos terminais e com isto anula a possibilidade de um julgamento seguro para a decisão de uma ação.

Um procedimento mais sofisticado e potencialmente mais eficaz exige, pois:

- 1 - Uma previsão sobre um horizonte H (o maior possível) dos tempos de percurso dos ônibus e conseqüentemente dos instantes de chegada dos mesmos na estação reguladora, isto dentro do fluxo geral de circulação. Esta previsão só é possível a partir de uma coleta de

informações em tempo real (a mínima possível), caracterizando o estado de funcionamento geral do sistema,

- 2 - A partir da previsão, empregar um processo de decisão compatível com o estado de funcionamento da linha , tentando-se obter a decisão mais eficaz.
- 3 - A execução desta decisão

Um fato a se notar é que o modelo de regulação proposto deve ter sua complexidade adaptada à precisão da previsão e das variáveis de ação disponíveis,

Definiremos, então, um método de estudo e avaliação dos procedimentos de regulação. Porém, devido à complexidade e ao número de parâmetros e variáveis que interve em no funcionamento de uma linha de ônibus, torna-se muito-difícil o estudo analítico de suas influências, nos levando ao desenvolvimento de uma simulação completa da linha em questão.

Estudaremos, também, procedimentos que atendam às condições de maiores perturbações na linha, tais como injeções de ônibus e retorno antes de chegar ao terminal, porém não através de um método sistemático de ação, mas sim verificando as vantagens quantitativas obtidas em relação a uma situação perturbada dada.

CAPÍTULO II

SIMULAÇÃO DE UMA LINHA DE ÔNIBUS

O melhor método para comparação de políticas de regulação dos transportes é sua aplicação num sistema real. Porém é um empreendimento que, além de envolver grandes recursos materiais e altos custos, pode fornecer, se não for bem feito, resultados com pequena validade estatística, já que a performance do tráfego depende muito das condições atmosféricas, da hora do dia, do dia da semana, de feriados, de eventos especiais.

A simulação em computadores digitais fornece um procedimento alternativo para obtenção da política mais adequada, através da "reprodução" da realidade por modelos matemáticos. Com isto, os usuários do sistema real não são incomodados nem podem interferir na experiência computacional, já que é sabido que a adaptabilidade dos motoristas e usuários de uma rede urbana pode alterar o comportamento normal do tráfego se os mesmos sabem que estão fazendo parte de uma experiência.

Na simulação, as condições de tráfego podem ser controladas para se determinar os efeitos da variação de componentes individuais no comportamento do sistema, bem como o tempo pode ser comprimido de tal forma que várias estratégias podem ser testadas rapidamente e somente as mais promissoras selecionadas para um eventual teste de campo.

Porém, apesar da sua utilidade, a simulação é, na melhor das hipóteses, uma aproximação do mundo real e não pode substituí-lo totalmente, proporcionando apenas o discernimento necessário à identificação das áreas problemáticas e à condução da estratégia mais promissora.

Torna-se claro, também, que a precisão da simulação, na retratação dos fenômenos reais deve ser adaptada às necessidades e objetivos dos testes. Por exemplo, quando um simulador for utilizado como otimizador, se propondo-

a encontrar políticas ótimas de funcionamento das redes, uma das características mais importantes deve ser a rapidez de processamento, com a diminuição da relação [tempo de máquina] / [tempo real] em detrimento de uma simulação mais elaborada, que normalmente aumenta o tempo de processamento.

No caso específico dos ônibus, foram desenvolvidos simuladores [1], [6] onde são feitas hipóteses-simplificadoras nos modelos, tais como a não consideração das linhas dos ônibus dentro de um fluxo de veículos, a não consideração dos semáforos nos cruzamentos, a não correlação dos tempos de percurso entre ônibus consecutivos.

Simplificações deste tipo fazem com que os modelos tenham um tempo de processamento bem rápido, porém, pecam pelo modelo matemático grosseiro obtido em relação à realidade.

Como nosso objetivo é, através da análise do comportamento dos ônibus no tráfego urbano, poder testar os efeitos das diversas ações sobre suas marchas, notamos que certas hipóteses simplificadoras como as acima podem levar a resultados surpreendentes. Por outro lado, simuladores muito detalhados [7], principalmente em relação ao comportamento dos veículos outros que os ônibus podem tornar a validação estatística dos resultados muito demorada, inviabilizando a simulação de intervalos de tempo mais longos (por exemplo, abrangendo o período de pico do tráfego).

II.1 - O simulador escolhido

O nosso trabalho foi desenvolver, portanto, um modelo de simulação detalhado e preciso para não nos afastarmos muito da realidade, porém ainda apresentando uma relação [tempo de máquina] / [tempo real] bem menor que 1.

O simulador utilizado baseia-se no deslocamento de veículos individualizados numa rede de tráfego urbano, onde os ônibus e demais veículos são considerados como elementos de um fluxo geral simulado no tempo e apresenta algumas características importantes: [3]

- é aplicável ao estudo de redes de tráfego fechadas, com malhas de estrutura geométrica qualquer, de tal forma que inclui todo o trajeto de ida e volta de uma linha de ônibus, quer a mesma seja radial, diametral ou circular;
- permite a simulação de regimes saturados ou não;
- trabalha com veículos individualizados, possibilitando o acompanhamento detalhado de um ônibus qualquer no seu trajeto;
- é do tipo sequencial, permitindo a revisão das variáveis internas de simulação a intervalos de tempo pequenos (cada segundo, por exemplo) e consequentemente uma avaliação significativa do comportamento dos veículos, dos ônibus e seus usuários.

II.2 - O modelo

Uma linha de ônibus, quer seja transversal, radial ou circular, é definida como sendo uma sucessão de estações (ou pontos) fixas, formando uma malha fechada e orientada no sentido da marcha dos ônibus. O trajeto é feito em segmentos de rua, divididos em faixas que comportam os fluxos de veículos e que chegam em cruzamentos, sinalizados ou não.

Portanto, obtendo-se como dados físicos da rede estes segmentos, com suas faixas e cruzamentos e os se

gmentos adjacentes das ruas transversais do trajeto, podemos simular, por um determinado período de tempo, tanto o comportamento dos ônibus e dos veículos que influenciam sua marcha como a formação e destruição das filas dos usuários nas estações do trajeto.

O simulador sendo do tipo sequencial, revisa a cada intervalo de tempo Δt os vários acontecimentos que fazem parte da experiência de simulação, através dos seguintes testes:

- teste de todas as entradas da rede, para verificar-se $\bar{e}$ o instante de um veículo ser injetado na entrada respectiva ou se $\bar{e}$ o instante de um ônibus iniciar seu percurso;
- teste em todos os segmentos internos da rede, para verificar se $\bar{e}$ o instante de um veículo ser transferido para outro segmento ou para fora da rede;
- teste em todos os cruzamentos da rede, para verificar se $\bar{e}$ o instante de mudança das fases dos semáforos respectivos.

Toda vez que um teste $\bar{e}$ positivo, ou seja, $\bar{e}$ o instante de ocorrer o evento, passa-se à procura de conflitos ou incompatibilidades que não permitam a sua realização. Se não houver, o evento $\bar{e}$ realizado, sendo calculado a seguir o instante da próxima ocorrência do mesmo.

Sempre que um veículo entra na rede (ou um ônibus inicia seu percurso) ou $\bar{e}$ transferido de um segmento para outro, deve ser "empilhado" no segmento respectivo, ou seja, colocado na fila de alguma faixa do mesmo. Este "empilhamento" $\bar{e}$ feito através do posicionamento do veículo em relação aos demais, obtido por uma lei de ultrapassagem definida.

Colocando este procedimento em um diagrama de blocos geral, obtemos:

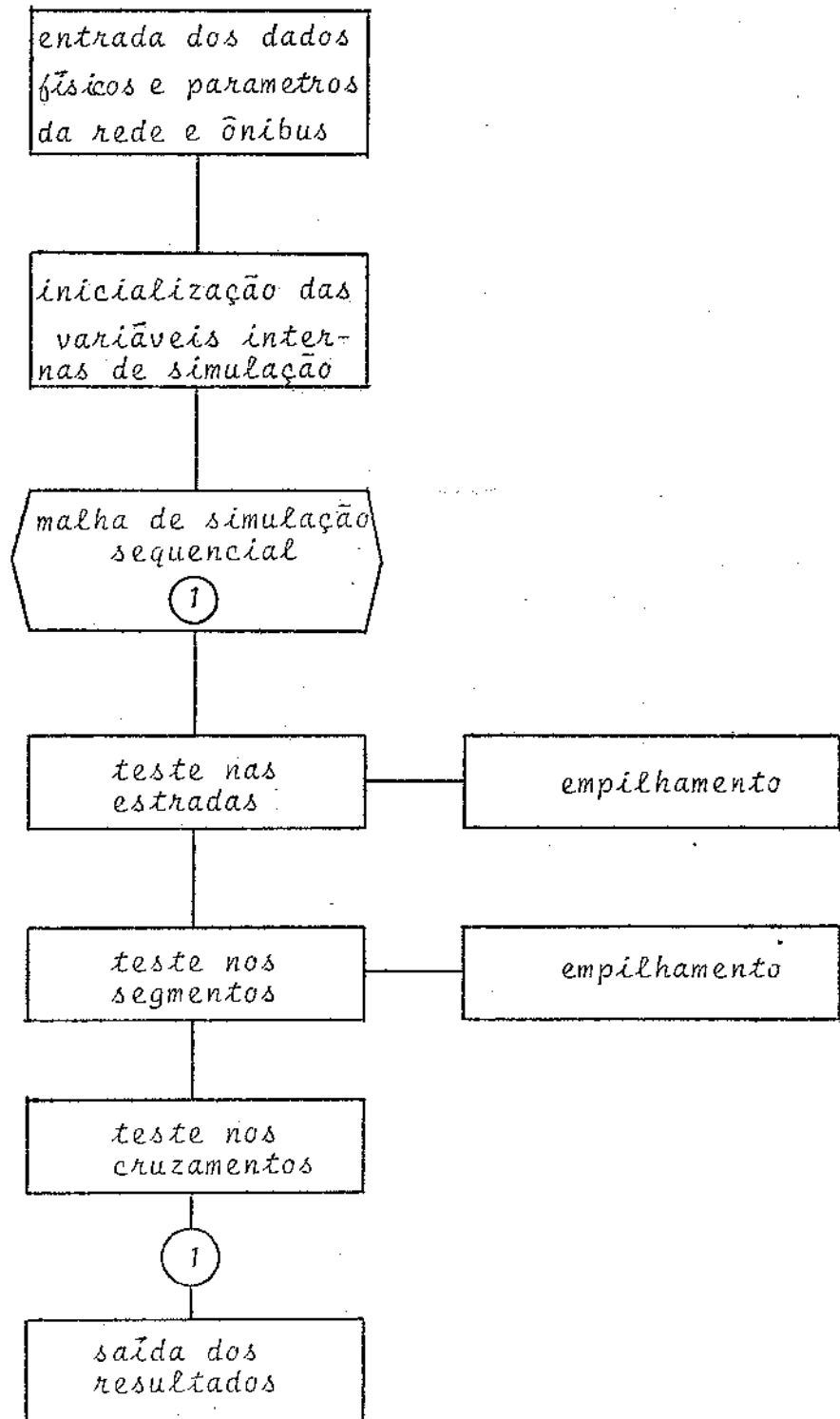


Figura II.1-Diagrama Geral da Simulação

Os ônibus têm um comportamento idêntico ao dos veículos, a menos das paradas que fazem nas estações e nos terminais, quando então é levada em consideração a influência dos usuários no sistema. Esta influência é traduzida na simulação como sendo um "atraso" que o ônibus sofre - no seu tempo de percurso entre estações consecutivas, devido à descida e subida dos passageiros. Para isto, os usuários levados em conta no processo são representados pelas seguintes variáveis:

- o número de passageiros que sobem no ônibus b na estação j ;
- o número de passageiros que descem do ônibus b na estação j ;
- o número de passageiros a bordo do ônibus b ;
- o número de passageiros que sobraram na estação j depois da partida do ônibus $b-1$, quando a capacidade máxima deste ônibus foi atingida.

Além da influência dos usuários em seus tempos de percurso, os ônibus ainda podem ser "detidos" em estações de controle ou nos terminais, a fim de que obedeçam os horários de partida ou tenham seus comportamentos regulados.

A evolução destas variáveis internas está ligada ao tratamento dado aos ônibus, pois num instante dado, um ônibus em serviço está ou parado numa estação, quando estas influências são levadas em consideração, ou transitando entre duas estações.

Este conjunto de relações fazendo evoluir o processo constituem o modelo de simulação.

11.2.1 - Representação da rede no simulador

Quando queremos simular uma linha de ônibus, a parte da rede urbana total que nos interessa é, basicamente, os segmentos de rua que fazem parte do trajeto e os segmentos adjacentes das ruas transversais, que são a ligação entre a rede levantada e o exterior.

Estes segmentos são representados por suas características físicas, suas localizações em relação aos demais e suas características operacionais. Cada um, fazendo parte do percurso da linha de ônibus, não precisa ser necessariamente uma estação de parada para subida ou descida de passageiros.

Os segmentos de ligação com o exterior funcionam como entradas de veículos que influenciam na marcha dos ônibus da linha simulada, e devem ser suficientemente longos e ter fluxos suficientemente pequenos para que o fenômeno de injeção de veículos na rede possa ser representado por um processo aleatório com distribuição conhecida. Se não for o caso, a parte da rede urbana levantada deve ser ampliada até que estas condições fiquem satisfeitas.

11.2.2 - Representação dos ônibus no simulador

Como o modelo de simulação trabalha com veículos individualizados, podemos então representar cada ônibus por uma identificação e suas características operacionais, de tal forma que os mesmos são facilmente detetados no desenvolvimento do processo. Agora, como os ônibus são veículos maiores e de menor relação (potência)/(peso), alguns cuidados devem ser tomados.

Em primeiro lugar, devemos normalizar o tama-

nho dos veículos que trafegam pelos segmentos em torno de um valor médio que seja representativo e que permita resultados realistas quando o utilizamos (por exemplo, ao obtermos o comprimento da fila de veículos existente na faixa de algum segmento). Então, se algum dos veículos tiver um tamanho muito discrepante em relação à média, necessitamos apenas de considerá-lo como tendo unidades de veículo-padrão. Lembrando que a atual divisão modal da maioria das cidades está grandemente desbalanceada em favor dos automóveis, dada a grande quantidade deste tipo de transporte individual-trafegando pela rede viária, então somos induzidos a considerar um automóvel como veículo padrão, com seu tamanho médio tomado como unidade. Com isto os ônibus são representados no modelo por unidades de veículo padrão, e baseando-se em observações reais e pesquisas [11], [12], temos que um valor aceitável é de três unidades de veículo padrão por ônibus.

Finalizando, devemos também normalizar as características operacionais dos veículos em torno de um valor médio para que o processo evolua de forma realista. No modelo tem como hipótese básica o fato de que os veículos andam nos segmentos a uma velocidade constante e que é sua velocidade operacional de regime. É a interação entre os veículos de um mesmo segmento e com velocidades operacionais diferentes que faz com que os mesmos não consigam trafegar como poderiam.

A velocidade dos veículos num segmento de rua apresenta uma distribuição quase normal $g(x)$ [12]. Reduzindo então esta distribuição em torno de um valor médio e associando este valor ao veículo padrão dirigido por um motorista médio (nem arrojado, nem conservador), podemos obter toda uma gama de unidades carro-motorista com características

operacionais distintas. Partindo das mesmas considerações anteriores, os ônibus são representados pelas características de um veículo mais lento que o padrão, inclusive com uma pequena aleatoriedade em torno de seu valor médio, já que as unidades ônibus-motorista não são idênticas. Porém, as capacidades de lotação de cada um é mantida constante.

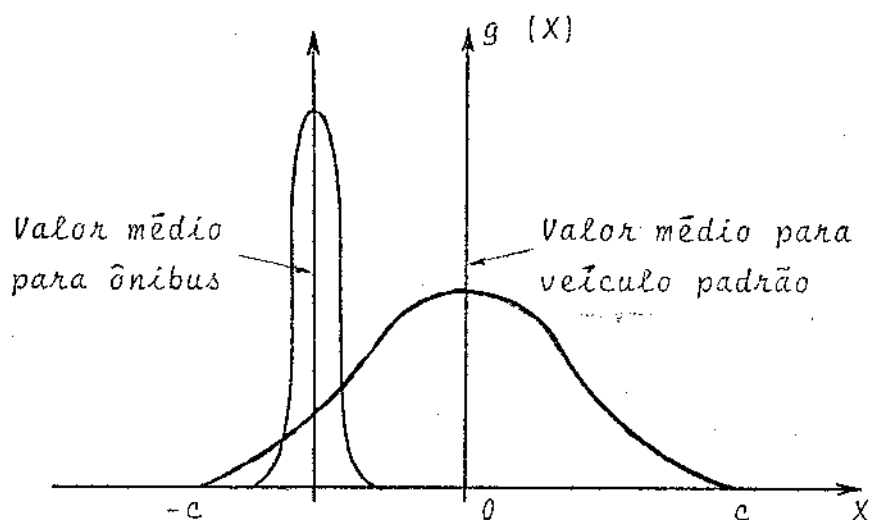


Fig. II.2 - Distribuição das velocidades dos veículos num segmento

II.2.3 - A simulação

O método de simulação consiste em injetar veículos na rede inicialmente vazia, passando por um transitório de carregamento até que o número de veículos circulando atinja o regime permanente. Os ônibus também são injetados na rede durante este transitório e a intervalos definidos, de tal forma que quando atingimos o regime, todos os ônibus que devam estar em serviço durante a simulação já estão circulando pela rede.

É interessante de se notar que ao injetarmos os primeiros ônibus durante o transitório, a influência que os demais veículos exercem sobre os mesmos não é significativa, já que temos pequena quantidade de veículos em circulação. Então estes ônibus só sofrem "atrasos" devido ao recolhimento e descida de passageiros. Estes atrasos não devem ser computados no cálculo dos critérios de desempenho - das políticas testadas, já que a quantidade de passageiros recolhida na primeira passagem de ônibus não é a média real durante a simulação. Este procedimento é apenas um artifício do modelo para que possamos simular a rede em seu regime, tanto no número de veículos circulando como no número de passageiros esperando nas estações.

Ao obtermos estas condições de regime, podemos iniciar o cálculo dos critérios de desempenho, ou seja, uma ou mais variáveis que evoluem internamente ao modelo e que dão uma medida da performance das políticas testadas.

II.2.4 - Simulação do comportamento dos ônibus num segmento qualquer

O modelo de simulação requer que cada veículo, ao chegar num segmento, obedeça a quatro etapas para entrar no mesmo e que são:

- escolha da direção que tomará quando chegar no final do segmento;
- a partir disto, obter qual a faixa do segmento que mais lhe convém;
- cálculo do tempo que perderá para conseguir chegar ao final do segmento, e que depende de suas características operacionais;

- introdução do mesmo na fila da faixa escolhida, -
com a posição obtida por suas características e pe
las possibilidades locais de ultrapassagem.

Os ônibus funcionam como os demais veículos ,
porém sofrendo um acréscimo no seu tempo de percurso estima
do no segmento, devido a parada para subida e descida de -
passageiros.

Este tempo de parada é traduzido na simulação
como sendo um "atraso" que o ônibus sofre e sendo função da
fila de passageiros esperando nas estações e/ou da quantida
de de passageiros que descerão nas estações.

Temos então dois casos a considerar:

a) passageiros que sobem

Seja um ponto P qualquer da linha de ônibus ,
com uma taxa de chegada média de λ passageiros por unidade-
de tempo, suposta constante num horizonte de tempo H (por -
exemplo, o tempo total de simulação). Cabe aqui lembrar que
tanto os usuários como o tráfego urbano agem sobre o compor
tamento de uma linha de onibus de forma aleatória. Porém -
suas ações apresentam, durante certos períodos de tempo, ten
dências gerais que podem ser consideradas através de parâme
tros estatísticos, tais como médias e variâncias. Podemos -
então definir intervalos de simulação durante os quais as
variáveis aleatórias sigam leis cujos parâmetros estatísti-
cos mantenham-se constantes.

Se, então, os passageiros não se referem a um
horário de chegada nas estações, mas chegam aleatoriamente,
como normalmente acontece na maioria das linhas de ônibus -
urbanas, estas chegadas obedecem a um processo poissoniano-

onde a variável aleatória, chegada de passageiros a uma estação num intervalo de tempo Δt , tem a função de probabilidade [13]

$$p_{\Delta t}(n) = \frac{(\lambda \cdot \Delta t)^n}{n!} e^{-\lambda \cdot \Delta t} \quad (II.1)$$

onde:

n = número provável de passageiros que chegam na estação num intervalo Δt .

Como num processo aleatório discreto a função distribuição de probabilidade é dada por:

$$P(n \leq N) = F(N) = \sum_{n=0}^N p_{\Delta t}(n) \quad (II.2)$$

podemos, então, dado um intervalo de tempo Δt entre a passagem de dois ônibus pela estação, obter qual o número de passageiros que chegaram no ponto pelo seguinte algoritmo:

- Gera-se um número aleatório com distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$, que é associado a $F(\cdot)$.
- Dados Δt e λ , varia-se sequencialmente n em II.1 e soma-se os resultados $p_{\Delta t}(n)$ até que a somatória ultrapasse o valor de $F(\cdot)$. Então n obtido é o número de passageiros gerados ($n=N$)

Seja, então, ts_i o instante de saída do ônibus i e tc_{i+1} o instante de chegada do ônibus $i+1$.

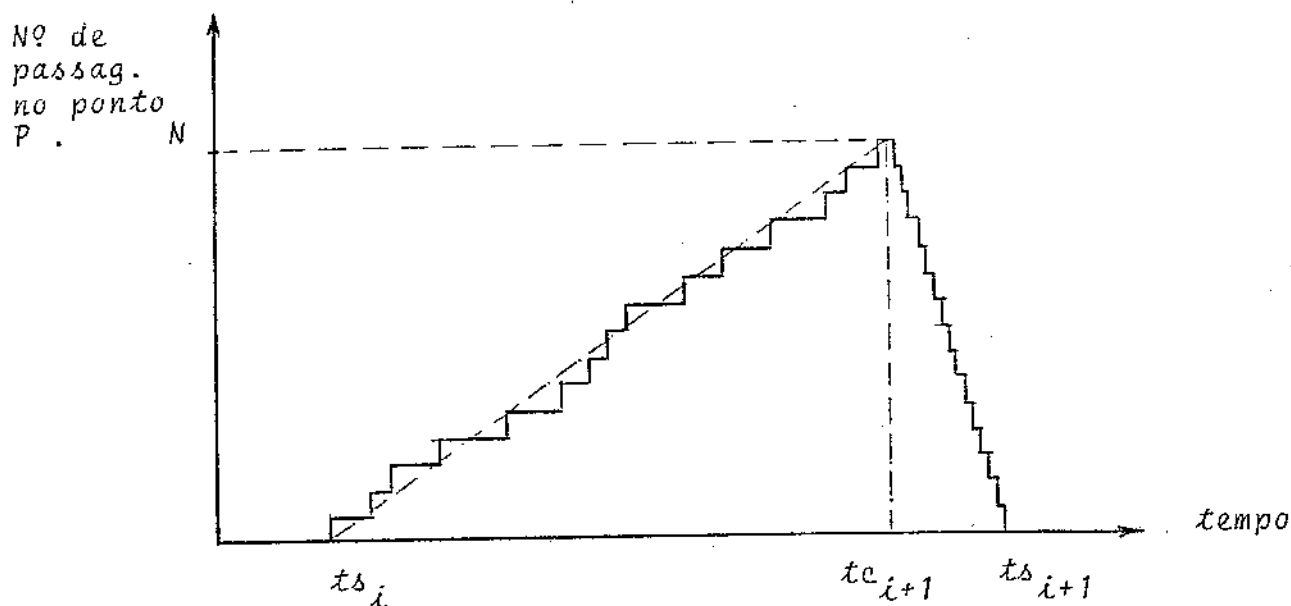


Fig. II.3 - Fila de passageiros no ponto P

O tempo que o ônibus $i+1$ se "atrasa" na estação é o tempo de destruição da fila,

$$\text{Atraso} = (ts_{i+1} - tc_{i+1}) = N \cdot tsp \quad (\text{II.3})$$

onde tsp é o tempo que cada passageiro leva para subir no ônibus.

Além disto, pode ter acontecido que o ônibus- i teve sua capacidade completada e não conseguiu absorver todos os passageiros da fila, recusando N' passageiros. Então, o "atraso" do ônibus $i+1$ será acrescido pela subida destes passageiros extras, e isto logicamente se sua capacidade não for atingida.

$$\text{Atraso} = (N+N') \cdot tsp \quad (\text{II.4})$$

Um outro aspecto considerado é que no simulador supomos que os veículos mantêm uma velocidade constante ao longo de um segmento se não houver obstáculos à sua fren-

te. Portanto, ao considerarmos as paradas dos ônibus devemos introduzir um fator de correção no tempo de parada englobando a desaceleração e aceleração sofrida pelo ônibus ao parar numa estação. Com isto o atraso total sofrido para recolher os passageiros é dado por:

$$AS = (N+N') \cdot t_{sp} + \text{FATOR} \quad (II.5)$$

b) Passageiros que descem

Para obtermos o número de descidas em cada estação, precisamos conhecer para cada uma as porcentagens de passageiros que, subindo nesta estação, descerão nas estações seguintes, formando então uma matriz origem-destino e que deve ser estacionária no intervalo de tempo considerado.

A partir disto, obtemos facilmente o número de passageiros que descem numa estação P, por:

$$ND_p = \sum_{K=1}^{P-1} NT_K \cdot OD[K,P] \quad (II.6)$$

onde

NT_K = número de passageiros que entraram no ônibus em cada estação K, desde o terminal 1 até a estação P-1.

$OD[K,P]$ = coluna da matriz origem-destino e que corresponde às porcentagens dos passageiros, que, subindo em K, vão descer em P.

E o atraso total sofrido pelo ônibus para a descida de passageiros pode ser obtido da mesma forma que o anterior:

$$AD = ND_p \cdot t_{dp} + \text{FATOR} \quad (II.7)$$

onde t_{dp} é o tempo que cada passageiro leva para descer do ônibus.

Resumindo os dois casos, vemos que o atraso total sofrido pelo ônibus na estação P é dado por:

$$AT = \text{superior } [AS, AD] \quad (II.8)$$

Finalizando, alguns aspectos devem ser lembrados:

- para efeitos de visualização, o tempo de destruição da fila na Figura II.3 aparece exagerado, pois normalmente a relação (taxa de chegada de passageiros)/(taxa de subida de passageiros) é bem menor que 1, raramente chegando a 0,5 [9], caso em que ocasiona um dramático impacto no serviço, pois os distúrbios ocasionados tendem a crescer após a passagem por algumas estações. Se isto acontecer a única solução é a redução do intervalo de passagem entre ônibus nas estações, através da introdução de mais veículos na linha.
- se na estação considerada houver necessidade de parada dos ônibus para uma regulação do serviço, então serão considerados os passageiros que chegam na estação neste intervalo, se o mesmo não for desprezível. Porém, em qualquer situação serão desprezados os passageiros que chegam durante o carregamento ou descarregamento dos ônibus.

II.2.5 - Cálculo dos critérios de desempenho

Com o modelo de simulação permitindo a comparação de diversas políticas de regulação, podemos levantar e medir várias grandezas, ou seja, variáveis internas de simu-

lação que permitem uma visão da qualidade dos serviços fornecidos aos usuários.

Dentre as mesmas, as que mais proporcionam esta visão e que mais estão ligadas aos problemas atuais do sistema de ônibus são:

- o tempo de espera dos passageiros nas estações, ligado diretamente à frequência de passagem dos ônibus;
- o tempo de percurso dos passageiros quando nos ônibus, ligado às condições de tráfego encontradas durante o trajeto e aos atrasos sofridos pelos ônibus nas estações, quer devido aos passageiros ou devido aos "tempos de regulação";
- o conforto dos passageiros, ou seja, a taxa de carregamento dos ônibus.

II.2.5.1 - Tempo de espera médio dos passageiros

Seja Δt_i o intervalo entre a passagem de dois ônibus consecutivos ($i-1$ e i) por uma estação P do trajeto.

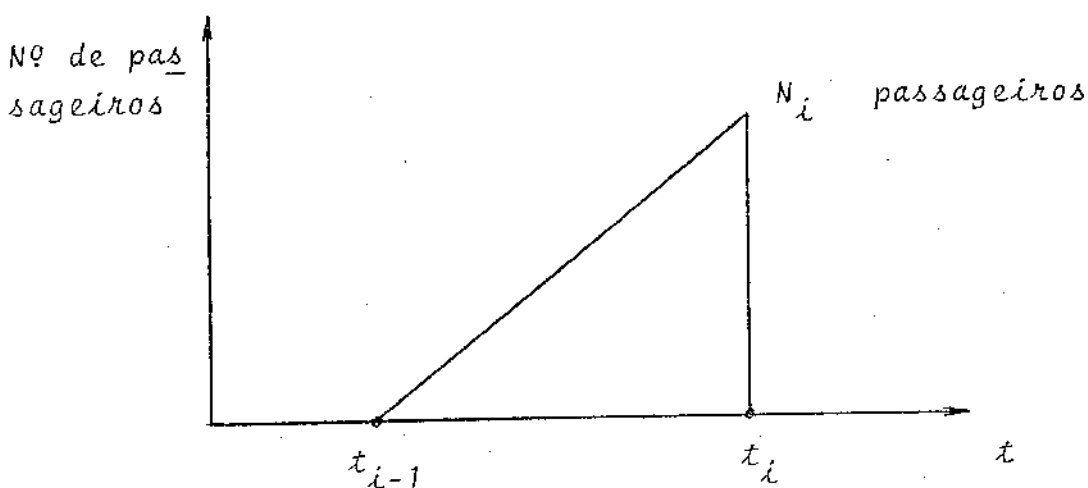


Fig. II.4 - Fila de passageiros numa estação P .

Para simplicidade matemática, podemos supor - que N_i , o número de passageiros gerados na estação P durante Δt_i seja obtido pela taxa média de chegada de passageiros, contínua no tempo. Podemos supor também que o tempo de destruição da fila seja desprezível em relação ao intervalo Δt_i .

Portanto, o atraso total sofrido pelos passageiros no ponto P é dado pela área do triângulo da figura II.4 .

$$At_i = \frac{\Delta t_i}{2} \cdot N_i \quad (II.9)$$

Além disto, se na passagem do ônibus i pela - estação existirem N'_i passageiros que não conseguiram subir no ônibus $i-1$ pelo fato do mesmo estar lotado, então devemos acrescentar o atraso destes passageiros.

$$AT_i = \frac{\Delta t_i}{2} \cdot N_i + \Delta t_i \cdot N'_i = \Delta t_i \left(\frac{N_i}{2} + N'_i \right) \quad (II.10)$$

Estendendo este cálculo para todos os ônibus - que passam pelo ponto P durante o intervalo total de simulação,

$$AT = \sum_i AT_i \quad (II.11)$$

para um número total de passageiros igual a

$$NT = \sum_i N_i$$

obtemos o tempo de espera médio dos passageiros na estação - P dado por:

$$TM_p = \frac{AT}{NT} = \frac{\sum_i \Delta t_i \left(\frac{N_i}{2} + N'_i \right)}{\sum_i N_i} \quad (II.13)$$

Considerando todas as estações do percurso, -
obtemos o critério global da linha (tempo de espera médio -
dos passageiros/estação):

$$TM = \frac{\sum_p TM_p}{\sum_p} = \frac{\sum_p \sum_i AT_i}{\sum_p \sum_i N_i} \quad (II.14)$$

II.2.5.2 - Tempo de percurso médio dos passageiros

Seja $TPER_p$ o tempo de percurso de um ônibus -
entre as estações P-1 e P. Durante este percurso, exis -
tem N_{p-1} passageiros a bordo. O atraso total sofrido por -
estes passageiros entre a saída da estação P-1 e a chëga -
da na estação P é:

$$ATP_p = TPER_p \cdot N_{p-1} \quad (II.15)$$

Na estação P, ND_p passageiros descerão e
 NS_p passageiros subirão no ônibus. Então devemos acrescen -
tar o atraso dos passageiros que ficaram no ônibus e dos -
que subiram, agora levando em consideração o tempo TDF_p que
o ônibus fica parado na estação P para subida e descida -
de passageiros.

$$ATP_p = TPER_p \cdot N_{p-1} + TDF_p (N_{p-1} - ND_p) + \frac{TDF_p}{2} \cdot NS_p \quad (II.16)$$

Estendendo este cálculo para todas as estações de percurso

$$ATP = \sum_p ATP_p \quad (II.17)$$

para um número total de passageiros transportados

$$NT = \sum_p N_p \quad (II.18)$$

obtemos o tempo de percurso médio dos passageiros em cada percurso total K dos ônibus,

$$TP_K = \frac{ATP}{NT} = \frac{\sum_p \left[TPER_p \cdot N_{p-1} + TDF_p \left(N_{p-1} - ND_p + \frac{NS_p}{2} \right) \right]}{\sum_p N_p} \quad (II.19)$$

Considerando que durante o tempo total de simulação os ônibus completam K percursos, obtemos o critério global (tempo de presença médio dos passageiros nos ônibus/percurso).

$$TP = \frac{\sum_K TP_K}{\sum_K} = \frac{\sum_K \sum_p ATP_p}{\sum_K \sum_p N_p} \quad (II.20)$$

II.2.5.3 - Conforto dos passageiros

Apesar de nosso trabalho visar a regulação de uma linha de ônibus, para a qual os dois critérios desenvolvidos anteriormente são suficientes nas comparações, levantamos também o carregamento médio dos ônibus. Este carregamento, apesar de ser função da demanda de passageiros, do

número de ônibus em serviço e do tamanho dos mesmos (e portanto este critério torna-se útil quando queremos fazer estudos nestas variáveis) dá uma idéia da melhoria conseguida pela regulação do serviço, já que serviços desregulados tendem a ter ônibus lotados seguidos de ônibus vazios. Como consequência direta da melhoria do carregamento médio temos uma melhor absorção dos passageiros esperando nos pontos, e a medição da demanda não satisfeita, ou seja, o número de passageiros que esperaram mais de um ônibus nas estações - até serem absorvidos nos fornece também um índice de regularidade.

Podemos notar que este último critério (demanda não satisfeita) deteta melhorias tanto para os usuários como para as empresas de ônibus. Para os usuários porque os mesmos são recolhidos pelo primeiro ônibus que passa, e para as empresas pelo fato de que, se não absorverem o usuário que já está na estação, podem perdê-lo para uma outra empresa concorrente da mesma linha.

II.3 - O programa de simulação (aspectos gerais)

O modelo desenvolvido foi programado em FORTRAN IV e permite a simulação do funcionamento de qualquer tipo de linha de ônibus com traçado definido. A particularização da linha se faz através de leitura das constantes e dos parâmetros externos.

O programa fornece, a cada incremento de tempo de seu relógio interno, os novos valores tomados pelas variáveis internas ao fim de cada bloco de teste, conforme-Figura II.1. Nenhum cálculo é feito a posteriori.

A quantidade de memória utilizada pelo programa é função das dimensões da rede levantada e do seu grau -

de ocupação. Assim, o número aproximado de palavras gasto é:

$$30.NSM+8.IEM+7.NVM+10.NFMAX+(3+4.K)NCM+(1+NMF).NMFAS+ITAUM+320+15.NBMAX+NSPO(24+NSPO)+NBMAX.NSPO$$

onde:

- NSM = número total de segmentos da rede levantada.
- IEM = número de entradas da rede, incluindo as dos ônibus
- NVM = número máximo de veículos que circulam pela rede, incluindo os ônibus
- NFMAX = número de faixas da rede
- K = número médio de fases por cruzamento
- NCM = número de cruzamentos da rede
- NMF = número máximo de faixas que dependem de uma mesma fase
- NMFAS = número de fases da rede
- ITAUM = dimensão da tabela auxiliar para veículos
- NBMAX = número máximo de ônibus em serviço
- NSPO = número de segmentos que compõe o trajeto de ida e volta da linha de ônibus.

11.4 - Exemplo

A fim de testar o modelo desenvolvido foi feita a simulação de uma linha de ônibus composta de 23 segmentos no percurso de ida e 25 segmentos no percurso de volta. Esta linha foi também a base de todos os testes das políticas de regulação.

A rede levantada e que contém todo o percurso da linha consta de:

- 86 segmentos
- 33 entradas
- 2 entradas para ônibus, internas à rede
- 145 faixas
- 29 cruzamentos
- 58 fases
- 48 segmentos de percurso da linha de ônibus.

O tempo total de simulação para teste foi de uma hora e quarenta e cinco minutos reais, ou seja 6300 segundos, sendo que os quinze minutos iniciais foram utilizados para o carregamento da rede, e portanto não computados nos cálculos dos critérios de desempenho. A relação (tempo de máquina)/(tempo real) obtida para a rede simulada foi de 0.02 , dentro de nossas expectativas.

Todos os dados de entrada, tanto da rede como dos usuários estão no Anexo I.

Um exemplo de saída dos resultados pode ser visto na Tabela II.1 e na Figura II.5 .

RESULTADO DOS ONIBUS
(EM MINUTOS)

NUM. DA ESTACAO	TEMPO DE ESPERA TOTAL	TEMPO DE ESPERA MEDIO	INTERVALO MEDIO ONIBUS	DEMANDA DE PASSAGEIROS	DEMANDA RECUSADA	PERCURSO MEDIO ONIBUS	DESVIO PADRAO PERCURSO ONIBUS
1	182474	1.43	3.05	128	0	0.30	0.12
2	0.00	0.00	0.00	0	0	0.62	0.35
3	119.63	1.71	3.01	70	0	0.43	0.14
4	104.07	1.73	3.01	60	0	0.41	0.14
5	0.00	0.00	0.00	0	0	0.51	0.33
6	111.32	1.93	3.00	61	0	0.30	0.12
7	34.07	1.70	2.90	20	0	0.19	0.11
8	56.54	1.77	2.97	32	0	0.51	0.24
9	69.00	1.53	2.96	45	0	0.38	0.10
10	159.00	1.79	2.85	89	0	0.78	0.20
11	167.90	1.70	3.00	99	0	0.90	0.32
12	195.94	1.75	2.97	112	0	0.49	0.11
13	223.80	1.86	2.98	120	0	0.50	0.13
14	159.90	2.00	2.98	80	4	0.41	0.12
15	65.95	2.13	3.10	31	5	0.91	0.37
16	58.18	2.01	2.98	29	2	0.70	0.30
17	25.25	2.10	3.01	12	1	0.30	0.10
18	47.42	1.98	3.02	24	0	0.34	0.11
19	6.57	2.19	3.02	3	0	0.80	0.37
20	0.00	0.00	2.95	0	0	0.90	0.50
21	0.00	0.00	2.87	0	0	0.83	0.39
22	0.00	0.00	3.05	0	0	0.54	0.21
23	0.00	0.00	0.00	0	0	0.21	0.02
24	173.78	1.09	3.06	160	0	0.62	0.14
25	0.00	0.00	0.00	0	0	0.81	0.40
26	0.00	0.00	0.00	0	0	0.20	0.00
27	96.61	1.53	3.01	63	0	0.40	0.11
28	0.00	0.00	0.00	0	0	0.20	0.01
29	126.78	1.55	3.01	82	0	0.59	0.10
30	31.80	1.59	3.01	20	0	0.61	0.05
31	69.01	1.60	2.97	43	0	0.72	0.20
32	77.73	1.59	3.00	49	0	0.60	0.36
33	23.13	1.78	2.90	13	0	0.74	0.34
34	137.49	1.56	3.00	88	0	0.45	0.10
35	68.90	1.64	3.01	42	0	0.39	0.12
36	91.15	1.66	3.05	55	0	0.90	0.44
37	137.47	1.93	3.04	75	0	1.11	0.45
38	141.50	1.67	3.04	85	0	0.48	0.13
39	208.90	1.63	3.05	120	0	0.50	0.10
40	144.76	1.72	3.15	84	1	0.46	0.11
41	145.00	1.91	3.07	76	5	2.00	0.82
42	36.76	1.93	2.96	19	1	0.65	0.24
43	10.09	2.18	3.00	5	1	0.27	0.10
44	17.30	1.93	3.10	9	0	0.75	0.19
45	9.02	2.26	2.96	4	0	0.49	0.22
46	0.00	0.00	3.00	0	0	0.20	0.11
47	0.00	0.00	3.07	0	0	0.33	0.00
48	0.00	0.00	0.00	0	0	0.20	0.01
DURANTE TODA SIMULACAO	3535.63	1.977	3.081	2115	20	0.57	0.21

DESVIO PADRAO DO TEMPO DE ESPERA 0.24

DESVIO PADRAO DO INTERVALO ONIBUS 0.06

TEMPO DE PRESENCIA MEDIO DOS PASSAGEIROS NOS ONIBUS
TEMPO DE PERCURSO MEDIO TERMINAL-TERMINAL
ATRASO NO PERCURSO DEVIDO AO TRAFEGO
ATRASO NO PERCURSO DEVIDO AOS PASSAGEIROS

SENTIDO
IDA
8.55
12.52
4.93
3.27

SENTIDO
VOLTA
8.44
14.50
6.35
3.53

Tabela II.1 - Resultados da simulacão, referentes aos ônibus (os dados da rede e os resultados referentes aos demais veículos estão no ANEXO I)

SEGMENTOS DO PERCURSO DE IDA

SEGMENTOS DO PERCURSO DE VOLTA

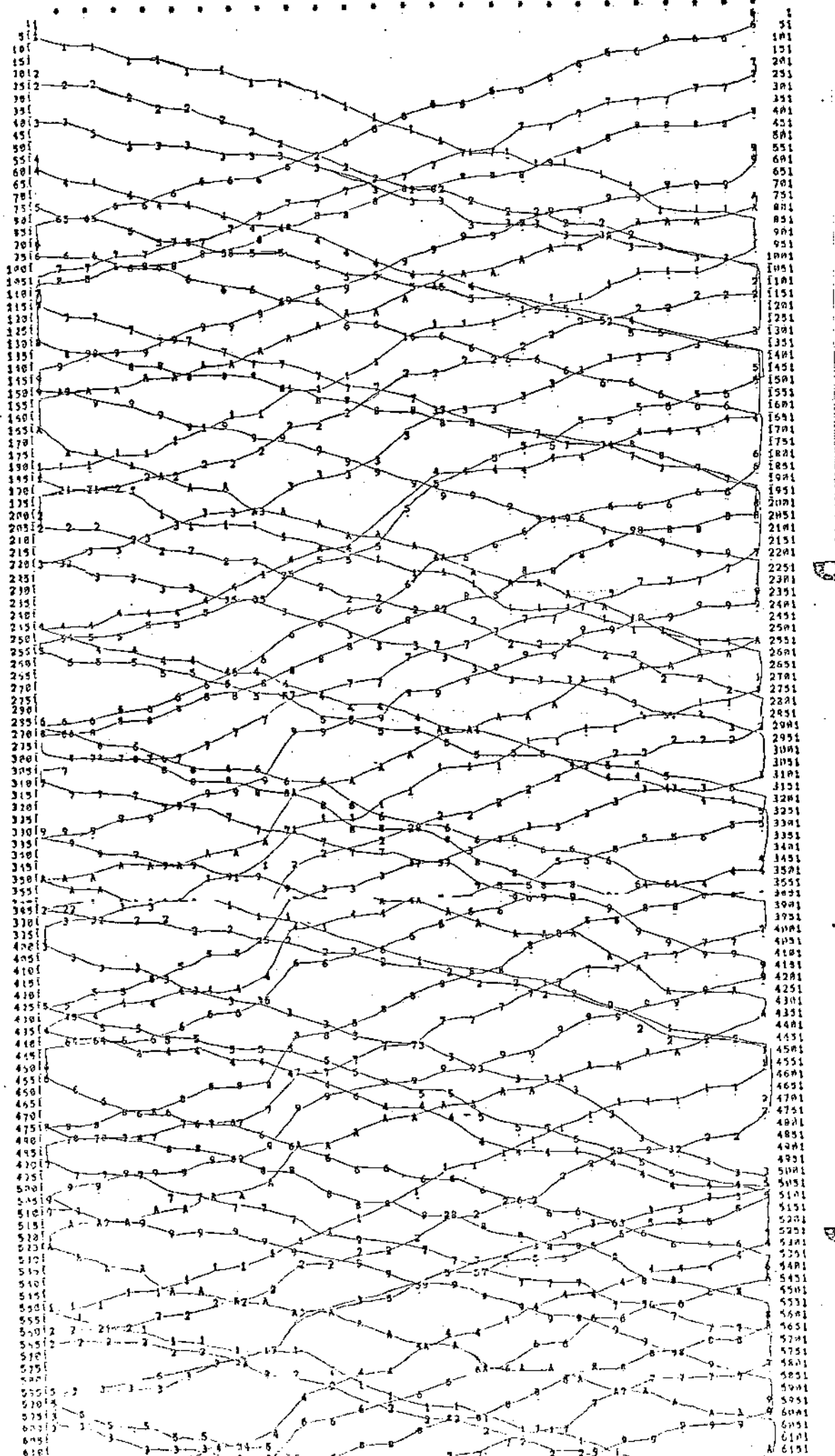


Fig. 11.5 - Diagrama espaço-tempo da linha de ônibus exemplo
40 ônibus com intervalos de 3 minutos.

CAPÍTULO III

DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE REGULAÇÃO

O desenvolvimento do simulador de uma linha de ônibus feito no capítulo anterior nos permite o acompanhamento total de seu funcionamento, já que modelamos as variáveis mais importantes da marcha dos mesmos. Falta, porém, uma obtenção metodológica das políticas necessárias para que os ônibus se recuperem das perturbações sofridas no trajeto, esta recuperação sendo feita ou na entrada do percurso ou em pontos intermediários determinados e de tal forma que vise a otimização dos serviços fornecidos aos usuários.

Então nossa primeira preocupação é a obtenção da função objetivo a ser otimizada, através do levantamento dos critérios que meçam a qualidade do serviço fornecido aos usuários.

III.1 - Escolha do critério para otimização

Como já vimos no Item II.2.5, a qualidade do serviço pode ser medida:

- pelo tempo de espera dos passageiros nas estações;
- pelo tempo de percurso dos passageiros que estão nos ônibus;
- pelo conforto dos passageiros.

Lembrando, porém, que:

- A regulação do serviço de uma linha de ônibus que está em contato íntimo com o fluxo dos demais veículos nos segmentos do percurso não trás grandes alterações no tempo de percurso dos passageiros a bordo, já que as condições gerais de circulação, ou seja, o grau de congestionamento da rede viária, -

não são alteradas com medidas tomadas sô em rela-
ção aos ônibus;

- A regulação, trazendo uma melhor distribuição da frequência de passagem dos ônibus nas estações tem como consequência uma melhor absorção dos passageiros por ônibus que passa em cada estação, reduzindo a ocorrência de ônibus lotados seguidos de outros vazios, e com isto fornecendo maior conforto aos usuários. Logicamente estamos supondo, para isto, que o número de ônibus em serviço durante certo período é suficiente para absorver a demanda existente neste período e que é um dado conhecido pela empresa de ônibus;
- O tempo de espera médio dos passageiros é grandemente afetado pela ocorrência dos "trems de ônibus" resultado de um serviço degenerado, já que surgirão grandes intervalos entre a passagem de dois ônibus consecutivos por uma estação. Por outro lado, este "emparelhamento" não tem influência tão perceptível aos usuários que estão a bordo, pois um ônibus, quer esteja "colado" a outro ou não, trafega da mesma forma até o terminal;

então tomaremos como medidor da qualidade do serviço, e consequentemente o fator a ser otimizado, o tempo de espera médio dos passageiros nas estações, que proporciona maior visão das melhorias obtidas e ficando os demais fatores não como meta de otimização mas como variáveis de policiamento das políticas tomadas (por exemplo, para se evitar que uma melhoria no tempo de espera penalize muito o tempo de percurso).

Seja então um horizonte de tempo H no qual são repartidos os instantes de passagem de N ônibus em

um ponto P qualquer da linha e seja I_i o intervalo de tempo entre as passagens dos ônibus i e $i+1$ em P . Portanto:

$$H = \sum_{i=1}^{N-1} I_i \quad \text{[III.1]}$$

Seja d a demanda de passageiros em P por unidade de tempo, suposta constante no horizonte considerado, e portanto o número de passageiros que sobem no ônibus $i+1$ em P é $d \cdot I_i$.

Para simplicidade matemática, podemos supor que a demanda de passageiros seja contínua, que o tempo de destruição da fila seja desprezível em relação ao intervalo entre os ônibus e que não são recusados nenhum passageiro na estação.

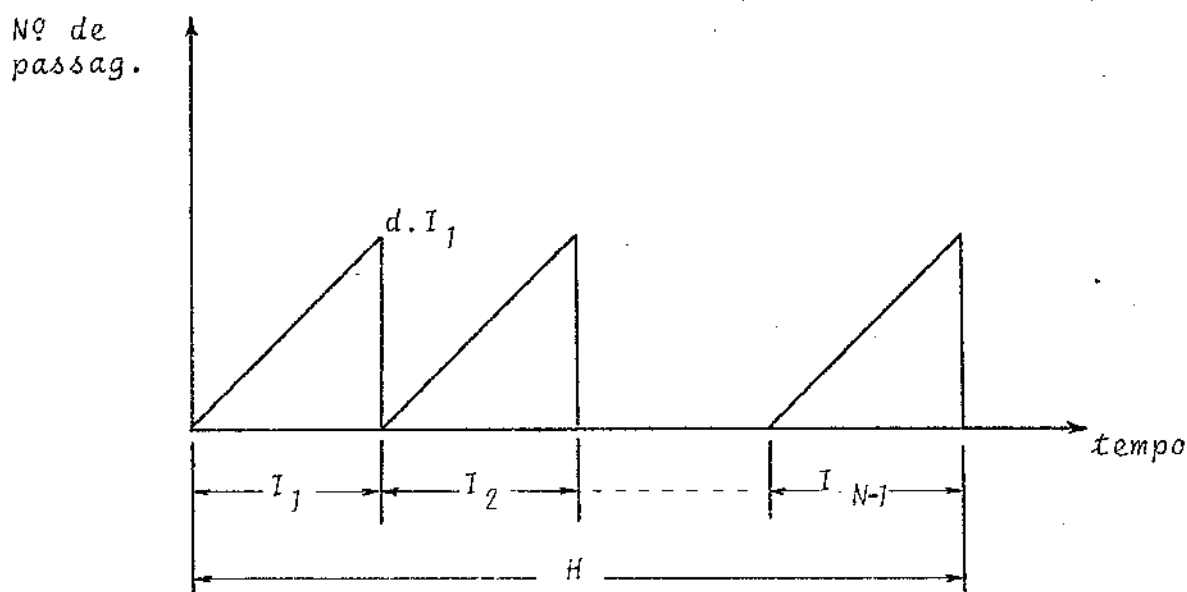


Fig.III.1- Fila de passageiros no ponto P da linha

O atraso total sofrido pelos passageiros no ponto P, entre dois ônibus consecutivos, ou seja, o tempo de espera total é dado pela área de cada triângulo da figura III.1.

$$TE_i = 1/2 \cdot I_i \cdot d \cdot I_i = 1/2 \cdot d \cdot I_i^2 \quad [III.2]$$

Estendendo para os N ônibus:

$$TE = \sum_{i=1}^{N-1} 1/2 \cdot d \cdot I_i^2 \quad [III.3]$$

para um número total de passageiros igual a:

$$\sum_{i=1}^{N-1} d \cdot I_i = d \cdot \sum_{i=1}^{N-1} I_i = d \cdot H \quad [III.4]$$

e portanto o tempo de espera médio dos passageiros é:

$$TEM = \frac{1/2 \cdot d \cdot \sum_{i=1}^{N-1} I_i^2}{d \cdot H} = \frac{1}{2H} \sum_{i=1}^{N-1} I_i^2 = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{N-1} I_i^2}{\sum_{i=1}^{N-1} I_i} \quad [III.5]$$

e obtemos facilmente que TEM é mínimo quando

$$I_i = I_j \quad \forall i, j$$

forneendo $TEM = I_i/2$, e onde I_i pode ser obtido a partir do horizonte de tempo considerado H

$$I_i = \frac{H}{N-1} \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad [III.6]$$

Concluindo, o critério tempo de espera médio dos passageiros será mínimo quando os intervalos de passagem entre os ônibus forem todos iguais. O objetivo da regulação será manter a regularidade destas passagens, e a variável -

de controle mais acessível para isto é o instante de partida do ônibus de um terminal ou de uma estação.

A idéia, então, é a prevenção de instabilidades no serviço pela introdução de "tempos de folga" no horário a ser obedecido ou no tempo de percurso alocado entre estações de tal forma que absorva qualquer perturbação. Para prevenir que um veículo trafegue adiantado ao horário ou com um intervalo muito pequeno entre ônibus, necessitamos somente de segurar o veículo em pontos determinados até que um instante de partida ou intervalo mínimo seja atingido. Mas para prevenir um veículo de trafegar atrasado ao horário ou com intervalo longo, devemos fornecer algum mecanismo para que o mesmo ganhe tempo relativamente ao horário ou em relação ao veículo anterior.

III.2 - Princípios gerais da regulação

Ao abordarmos o problema de regulação, ficamos frente a dois tipos de ação baseadas em princípios diferentes: uma regulação de horário ou uma regulação de intervalo.

III.2.1 - Regulação de horário

Neste caso, a hipótese é a existência de um horário pré-estabelecido fixando as horas de partida dos ônibus em cada terminal e obtido a partir da demanda de passageiros e dos tempos de percurso ao longo da jornada e por estação.

A demanda média de passageiros em cada estação é suposta conhecida de forma determinística, ou seja, a partir de um levantamento fino da evolução média da demanda em função da hora da jornada, possibilitando a obtenção de uma função que represente a taxa horária de chegada dos usuários

em uma estação.

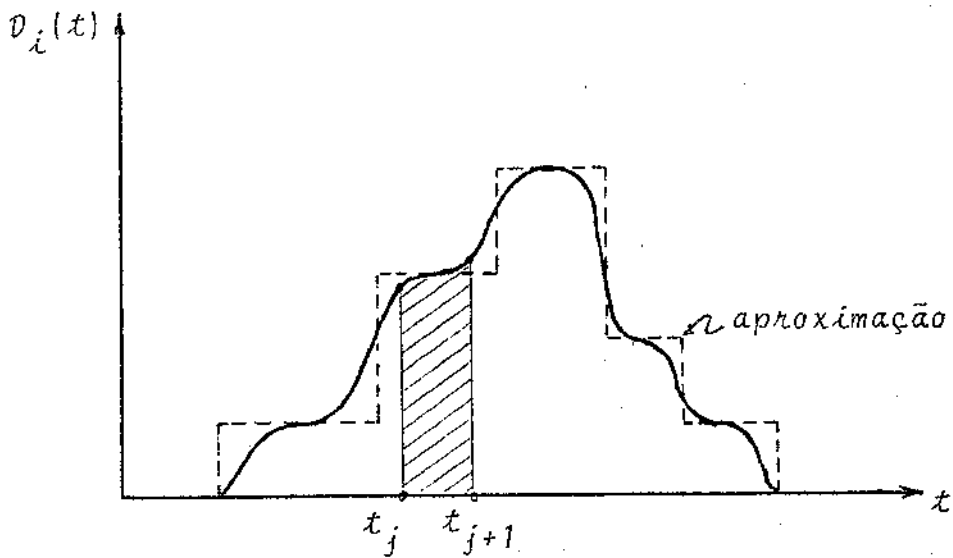


Fig. III.2- Demanda de passageiros na estação i

O número de passageiros que chegam na estação i entre os instantes t_j e t_{j+1} é:

$$NP_i = \int_{t_j}^{t_{j+1}} D_i(t) \cdot dt \quad (III.7)$$

Na prática, a curva representando a taxa de chegada dos usuários pode ser aproximada por trechos constantes de duração variável, facilitando a formulação de critérios para obtenção de um horário ótimo. Os tempos de percurso médios dos ônibus entre estações devem ser igualmente conhecidos de forma determinística. O tempo de espera dos passageiros é então otimizado a priori e o objetivo da regulação é respeitar o horário obtido.

A maneira pela qual é estabelecido este horário tem uma importância capital no que diz respeito à estabilidade-

do serviço. Para reduzir ao máximo a probabilidade de que a aparição de uma perturbação impeça ao ônibus de respeitar o horário, é conveniente que os tempos de percurso alocados sejam próximos dos tempos de percurso reais, que são impostos pelas condições de circulação nas diferentes horas da jornada. Entretanto, estes tempos de percurso em zona urbana podem variar de um dia para outro e de modo imprevisível, com variações importantes. Para que o horário possa ser respeitado com uma boa probabilidade (no caso contrário não podemos falar de um horário), é imperativo a alocação dos tempos de percurso superiores aos tempos de percurso médios necessários. Este suplemento, chamado "tempo de regulação", depende do desvio padrão dos tempos de percurso e da frequência média dos ônibus em serviço, e deve ser tanto maior quanto menor for a precisão dos tempos de percurso levantados. Estudos realizados neste sentido [9] mostram que este tempo de regulação deve ser da ordem de grandeza do desvio padrão.

Isto faz com que numa linha de ônibus com alta frequência de passagem e variações significativas nos tempos de percurso tenhamos em média um ônibus permanentemente parado em cada terminal e portanto o emprego deste tempo de regulação tem um efeito duplo de consequências contraditórias:

- uma regularidade, fornecendo uma diminuição do tempo de espera médio.
- uma diminuição da frequência média, pela imobilização de um ou dois ônibus, reduzindo o número de veículos em circulação.

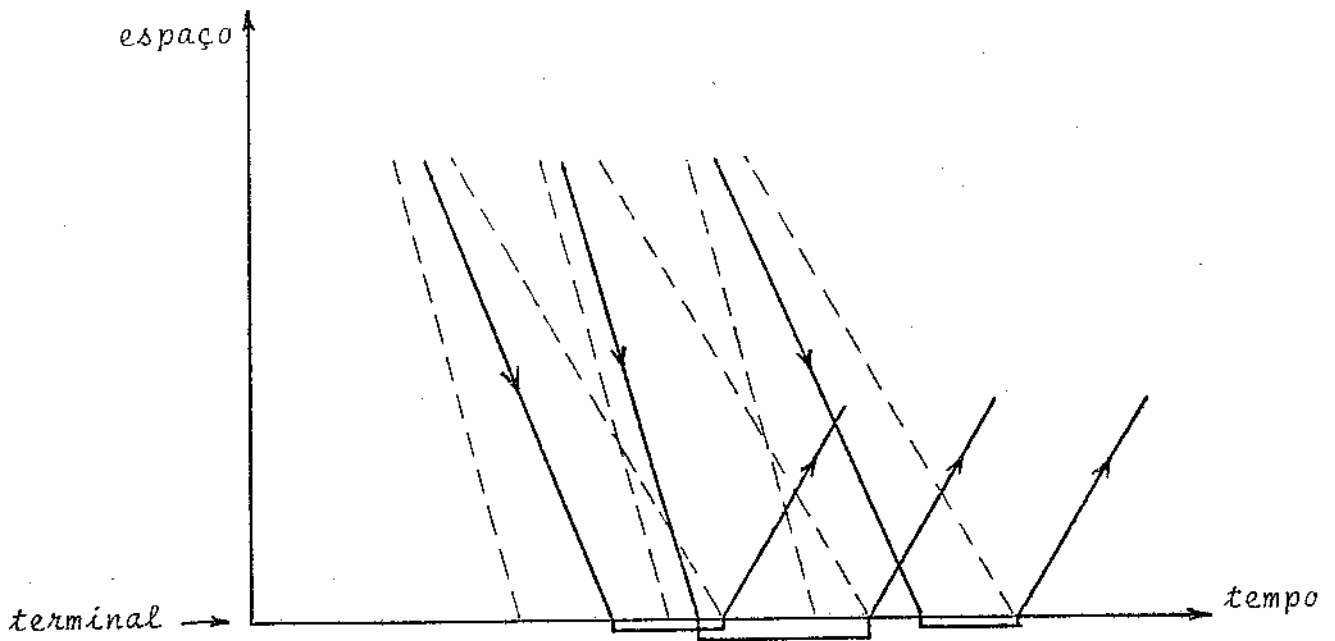


Fig. III.3- Regulação de horário com um "tempo de folga" para altas frequências

Notamos, entretanto, que a redução do tempo de espera médio tem efeito dominante à medida em que a frequência-média de passagem pelas estações é reduzida e a imobilização do ônibus no terminal é "diluída" pelo aumento do intervalo.

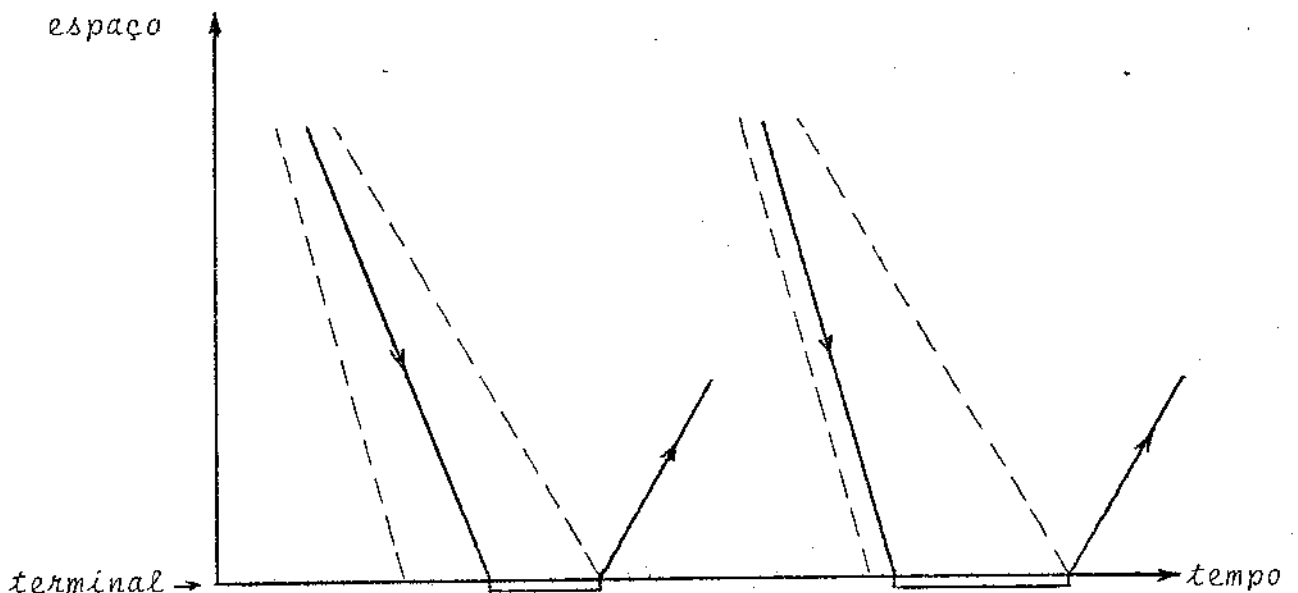


Fig. III.4- Regulação de horário com "tempo de folga" para baixas frequências

No caso onde o tempo de regulação não foi suficiente para absorver um crescimento accidental do tempo de percurso de um ônibus ainda é possível manter uma certa regularidade e retomar progressivamente o horário, agindo sobre as partidas dos ônibus seguintes ao veículo considerado. Assim, se um ônibus sofrer um atraso de X minutos além de seu tempo de regulação, podemos amortecer este atraso nos n veículos seguintes, atrasando-os de $\frac{n-1}{n} X$, $\frac{n-2}{n} X$, ..., $\frac{X}{n}$, 0. Se a perturbação agiu sobre vários ônibus consecutivos,ⁿ fazemos um ajuste no horário.

Porém este método traz problemas tanto para os serviços com alta ou baixa frequência. Para os primeiros por proporcionar uma tendência acentuada a uma maior imobilização de ônibus nos terminais, principalmente por serem serviços mais sujeitos a instabilidades inesperadas que afetam vários veículos consecutivos. Para os últimos por fornecer a perda de controle das horas de passagem pelas estações que os usuários normais da linha têm, pois normalmente em serviços com intervalos grandes os usuários conhecem o horário e procuram chegar nas estações o mais próximo do mesmo, proporcionando inclusive com isto uma diminuição do tempo de espera médio (para serviços com chegada de passageiros sem referência a um horário, o tempo de espera médio ótimo é metade do intervalo entre ônibus). [9]

Concluindo, o princípio de regulação de horário usando um "tempo de folga" é interessante para as linhas nas quais os intervalos são superiores a quinze minutos, aproximadamente (quando então os passageiros se referem a um horário), mas torna-se ineficiente para as linhas com frequência alta. Nestes casos o usuário não se refere a um horário e é indispensável assegurar a frequência máxima de acordo com o número de ônibus disponíveis.

III.2.2 - Regulação do intervalo

Este tipo de regulação se encontra pouco desenvolvido pois necessita de um sistema de obtenção automática de dados em tempo real. O procedimento seguido é diferente - do da regulação de horário, no sentido de que o tempo de espera dos passageiros não é otimizado a priori, mas em tempo real. A noção de horário é pois abandonada e só são necessárias as horas de serviço do pessoal. O problema que se apresenta então é o seguinte:

- a um instante dado (por exemplo, a chegada de um ônibus no terminal) qual é a decisão ótima (o instante de sua partida) levando em conta as decisões anteriores, a evolução previsível do estado da linha (previsão da marcha dos ônibus) e as horas de saída e entrada em serviço do pessoal?

Com a solução deste problema obtemos um método de regulação mais sensível que o anterior no que diz respeito às perturbações surgidas no sistema, já que as decisões são tomadas à medida em que cada ônibus chega num terminal. Como a base desta regulação não é o horário, a saída prematura de serviço de um ônibus ou a falta de uma equipe não trará maiores problemas.

Mas a maior vantagem deste tipo de regulação - aplicada numa linha de frequência alta reside na abstenção de um "tempo de regulação", só requerendo uma pequena parada para descanso da equipe de trabalho e permitindo então uma rotação mais rápida dos ônibus. Portanto, durante toda uma jornada são completadas mais viagens para o mesmo número de ônibus e conseqüentemente uma maior absorção dos passageiros acontece.

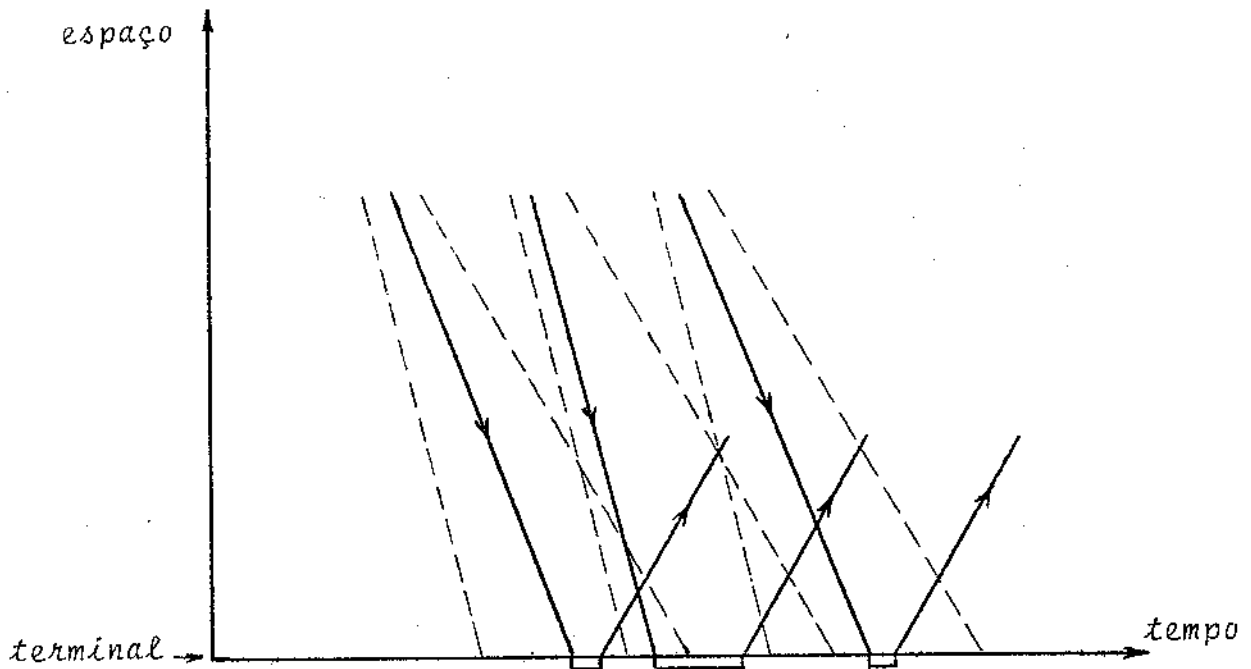


Fig. III.5- Regulação de intervalo para altas frequências

Notamos, entretanto, que para ser eficaz, tal princípio de regulação necessita de uma boa previsão dos tempos de percurso. Esta previsão será tanto melhor quanto mais informações forem obtidas em cada instante de decisão e quanto mais detalhados forem os levantamentos de dados na linha-estudada. Se não for o caso, o emprego de um ligeiro tempo - de regulação deve ser considerado.

Os resultados que podemos esperar da regulação do intervalo, no caso de uma linha urbana sujeita a forte - frequência, devem ser superiores aos da regulação do horário, e serão os procedimentos da regulação que iremos desenvolver.

III.3 - O modelo de Previsão

A elaboração do modelo de previsão, necessário para as tomadas de decisão na regulação de intervalo, requer

um bom conhecimento dos tempos de percurso dos ônibus e portanto de um estudo estatístico muito complexo baseado numa importante coleção de dados efetuada durante várias semanas na linha que queremos implantar a regulação. Este estudo deve ser levado para cada trajeto inter-estação (pode ser preferível agrupar alguns) e devido às aleatoriedades que surgem no decorrer de cada jornada, devem ser permanentemente atualizados. Tal estudo sai fora dos objetivos de nosso trabalho e simplesmente nos apoiaremos nos resultados do mesmo para a previsão da marcha dos ônibus.

Por outro lado, torna-se necessário salientar nesta previsão a existência de correlações, de uma parte entre os tempos de percurso de um mesmo ônibus entre duas estações consecutivas e de outra parte entre dois ônibus numa mesma estação em função do intervalo de tempo separando suas passagens respectivas. Estas correlações podem ser traduzidas da seguinte forma:

$$T_p(i) = \alpha \bar{T}_p + \beta T_p(i-1) + \delta T_{p-1}(i) \quad (III.8)$$

onde:

$T_p(i)$ = tempo de percurso previsto para o ônibus i entre as estações p e $p+1$

$\bar{T}_p$ = tempo de percurso médio entre as estações, obtido por levantamentos

$T_p(i-1)$ = tempo de percurso do ônibus anterior entre as estações p e $p+1$

$T_{p-1}(i)$ = tempo de percurso do próprio ônibus i entre $p-1$ e p .

α, β e δ são coeficientes (α, β e $\delta \geq 0$, $\alpha + \beta + \delta = 1$) que podem depender da estação considerada, do intervalo com o ônibus -

precedente, do horizonte no qual foi feita a previsão e mesmo da tabela horária.

Um modelo deste tipo permite uma detecção imediata das perturbações locais e suas propagações, já que quaisquer alterações dos tempos de percurso em relação aos valores médios são levantadas à medida em que ocorrem. Porém, o desenvolvimento do mesmo, visando uma implementação em tempo real, deve realizar compromisso entre a precisão do tempo de percurso previsto $T_p(i)$ e a complexidade e o volume de informações necessárias, que aumentam rapidamente com o uso da equação III.8. Por outro lado, se usarmos um modelo mais simplificado, certamente estaremos prevendo tempos de percurso menos precisos, mas como a idéia é refazer a previsão a cada instante que um ônibus chega numa estação de controle, esta perda de precisão é constantemente atualizada e diminuída, já que os instantes de chegada dos ônibus trazem implícitos as perturbações sofridas. Com isto podemos reduzir o volume de dados sem penalizar de modo apreciável a precisão do modelo.

Para encaminhar o estudo dos procedimentos de regulação, e entendendo que este estudo dos tempos de percurso é possível, iremos adotar um modelo mais simplificado.

$$T_p(i) = \alpha \bar{T}_p \quad \text{[III.9]}$$

$\bar{T}_p$ sendo constante qualquer que seja a tabela horária e α função desta tabela de tal forma que tenhamos intervalos de duração variável com mesmo comportamento geral.

III.4 - Regulação no terminal

Os terminais de uma linha são os lugares privilegiados para a realização dos procedimentos de regulação, pois possibilitam o estacionamento de um ônibus sem

incomodar a circulação e os usuários (o ônibus está vazio).

O problema a resolver e os meios de resolução variam segundo as possibilidades de previsão dos tempos de percurso e da demanda dos usuários. Se é possível de prever os valores destes parâmetros sobre um horizonte de tempo grande (equivalente a vários cursos de ida e volta de um ônibus) um método baseado na programação dinâmica pode dar bons resultados. Tal método, porém, tem um uso muito limitado, pois além de que as perturbações imprevistas não são consideradas devidamente à medida em que surgem, a dimensão do problema limita a resolução para mais de dois ônibus na determinação de um horário ótimo, principalmente devido ao tempo de cálculo necessário e impossibilitando a sua aplicação cada vez que um ônibus chega ao terminal.

Então, se os modelos de previsão não parecem poder fornecer resultados exploráveis num horizonte amplo, devem fornecer um instrumento preciso para a otimização das partidas suscetíveis de intervenção num horizonte menor, mas que cubra o tempo total de um curso de ida ou volta de um ônibus.

O problema geral se apresenta como um problema estocástico do qual as variáveis aleatórias são as horas de chegada previstas dos ônibus nos terminais. Para reduzir a dimensão deste problema iremos abordar o sub-problema determinístico associado e que nos permita, a partir dos resultados obtidos, de chegar a uma solução sub-ótima do problema estocástico.

III.4.1 - Definição do problema estocástico

Assim que um ônibus i chega a um terminal nos proporemos a determinar sua hora de partida ótima levando em conta o estado da linha, isto é, a posição dos outros ônibus.

No estudo, tomaremos como origem dos tempos o instante de partida do ônibus $i-1$, precedente do ônibus considerado e notaremos a_0 o instante de chegada do ônibus i . Podemos então representar num diagrama espaço-tempo os instantes de chegada previstos a partir de a_0 no mesmo terminal.

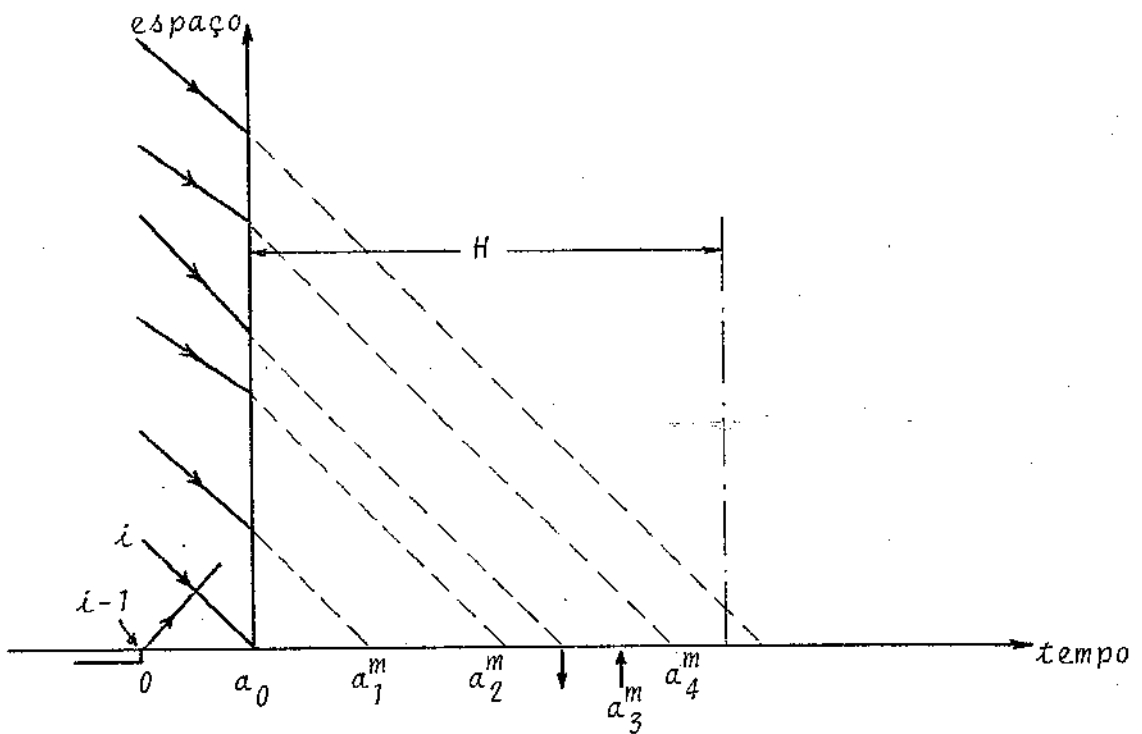


Fig. III.6- Diagrama espaço-tempo da previsão de chegada

Como faremos a otimização das partidas num horizonte H , o que importa é a obtenção dos ônibus cujas partidas do terminal sejam possíveis entre a_0 e $a_0 + H$. Eliminamos os que tiverem suas restrições de fim de serviço não obedecidas e por outro lado consideraremos os que entrarem em serviço neste horizonte. Na prática podemos evitar a necessidade do conhecimento desta tabela de entradas e saídas de serviço pela divisão da jornada de um dia em intervalos de tempo com mesmo comportamento geral, aplicando então em cada trecho os procedimentos de regulação com um número fixo de ônibus em serviço.

Um aspecto que deve ser salientado [e a figura III.6 deixa visível] é que a adoção de um modelo de previsão que só considera os tempos de percurso médios trás a obtenção de instantes de chegada um tanto distorcidos [na figura, as trajetórias contínuas mostram o comportamento real conhecido dos ônibus até o instante a_0], mas a revisão desta previsão a cada instante de chegada real minimiza esta falha.

Os instantes de chegada $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_K \leq \dots \leq a_n$ dos ônibus $i+1, i+2, \dots, i+K, \dots, i+n$ que partirão depois de i podem ser considerados como variáveis aleatórias independentes, com mesma densidade de probabilidade $f(x)$ e portanto o modelo de previsão permite, a partir da posição destes ônibus na linha no instante a_0 , de calcular as médias $a_1^m \leq \dots \leq a_K^m \leq \dots \leq a_n^m$ e os desvios padrões $\sigma_1, \dots, \sigma_K, \dots, \sigma_n$ [que será nulo para um ônibus que é colocado em serviço]. Considerando que a média representa o instante de chegada previsto e como os ônibus não podem partir antes de chegar, então de fato selecionaremos os que chegarão entre a_0 e a_0+H (na figura $n=4$).

Sejam então $I_0, \dots, I_K, \dots, I_n$ os intervalos entre as saídas dos ônibus $i-1, i, \dots, i+K, \dots, i+n$, e o primeiro intervalo, I_0 , dará a hora de saída procurada para o ônibus i . Já vimos [equação III.5] que o critério tempo de espera dos passageiros pode ser exprimido por:

$$C = \frac{\sum_{K=0}^n I_K^2}{\sum_{K=0}^n I_K} \quad (\text{III.10})$$

Necessita-se portanto definir os I_K minimizando C e sujeitos a:

$$I_0 \geq a_0$$

$$I_1 + I_0 \geq a_1$$

.....

$$I_n + I_{n-1} + \dots + I_1 + I_0 \geq a_n$$

pois um ônibus não pode partir antes de chegar ($a_1, \dots, a_n$ são as variáveis aleatórias).

O critério é pois função aleatória de $I_0, \dots, I_n$ dependentes de n variáveis aleatórias $a_1, \dots, a_n$.

$$C = f(I_0, \dots, I_n, a_0, \dots, a_n)$$

Passando para o problema estocástico, com a otimização do critério médio $\bar{C} = E(C)$, necessitamos então definir $\bar{C}$ tal que:

$$C = \min_{I_0, \dots, I_n} \bar{C}(I_0, \dots, I_n, a_0, a_1^m, \dots, a_n^m, \sigma_1, \dots, \sigma_n)$$

A dimensão e complexidade do problema estocástico geral, assim como a passagem de C a $\bar{C}$ para obter $\bar{C}$ aparecem desproporcionais face aos objetivos: o cálculo de I_0 . Propomos então uma redução do problema estocástico pela resolução do sub-problema determinístico associado [isto é, $a_k = a_k^m$ e $\sigma_k = 0$, $\forall k$] fazendo a hipótese que a solução deste sub-problema pertence à solução do problema geral.

III.4.2 - Resolução do problema determinístico

Neste caso, queremos minimizar o critério C sujeito a

$$I_0 \geq a_0 \quad (R_0)$$

$$I_1 + I_0 \geq a_1^m \quad (R_1)$$

.....

$$I_n + \dots + I_1 + I_0 \geq a_n^m \quad (R_n)$$

$$I_K \geq 0 \quad K = 0, \dots, n$$

Seja então um horizonte de otimização H_1 , de finido pelo último ônibus previsto para chegar no terminal - dentro de um horizonte de previsão H , e cujo ônibus parte imediatamente após sua chegada. Portanto:

$$H_1 = \sum_{K=0}^n I_K = \text{constante}$$

Além disto, resumindo o conjunto de restrições na seguinte equação de evolução,

$$x_{K+1} = x_K + I_K$$

$$x_{K+1} \geq a_K^m$$

$$x_0 = 0$$

vemos que o problema pode ser resolvido sequencialmente com o auxílio da programação dinâmica, onde os estágios de otimização são os ônibus considerados, o estado possível em cada

estágio é o instante de partida do ônibus respectivo e o controle utilizado é o intervalo entre dois ônibus consecutivos.

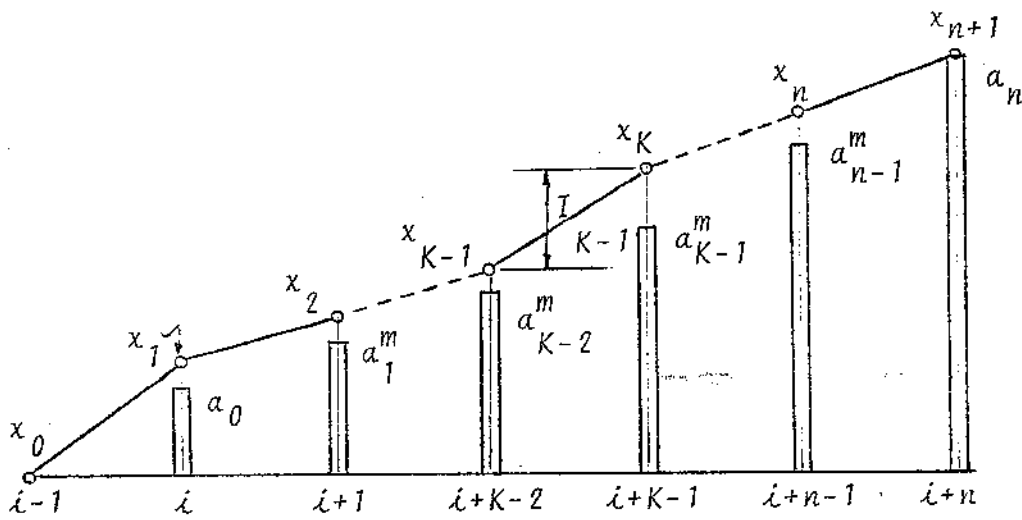


Fig.III.7 - Representação do problema para resolução com a programação dinâmica.

O problema original fica alterado para:

$$\hat{C}(x_{n+1}) = \min_{I_K} \left\{ \sum I_K^2 \right\}$$

$$s.a. \quad x_{K+1} = x_K + I_K$$

$$x_{K+1} \geq a_K^m$$

$$0 \leq I_K \leq x_{K+1}$$

$$x_0 = 0$$

com o princípio de otimalidade, nos fornecendo a seguinte equação recorrente:

$$\hat{C}_{K+1}(x_{K+1}) = \min_{I_K} \left\{ I_K^2 + \hat{C}_K(x_K) \right\}$$

A solução deste problema nos três que os intervalos ótimos entre ônibus dependem exclusivamente dos ônibus "críticos" do horizonte de otimização, ou seja, dos veículos que chegam ao terminal muito "atrasados" em relação à chegada dos demais e que fazem com que suas restrições de chegada determinem intervalos distintos de otimização.

Seja, por exemplo, $i + k - 1$ o único ônibus crítico do horizonte H_1 .

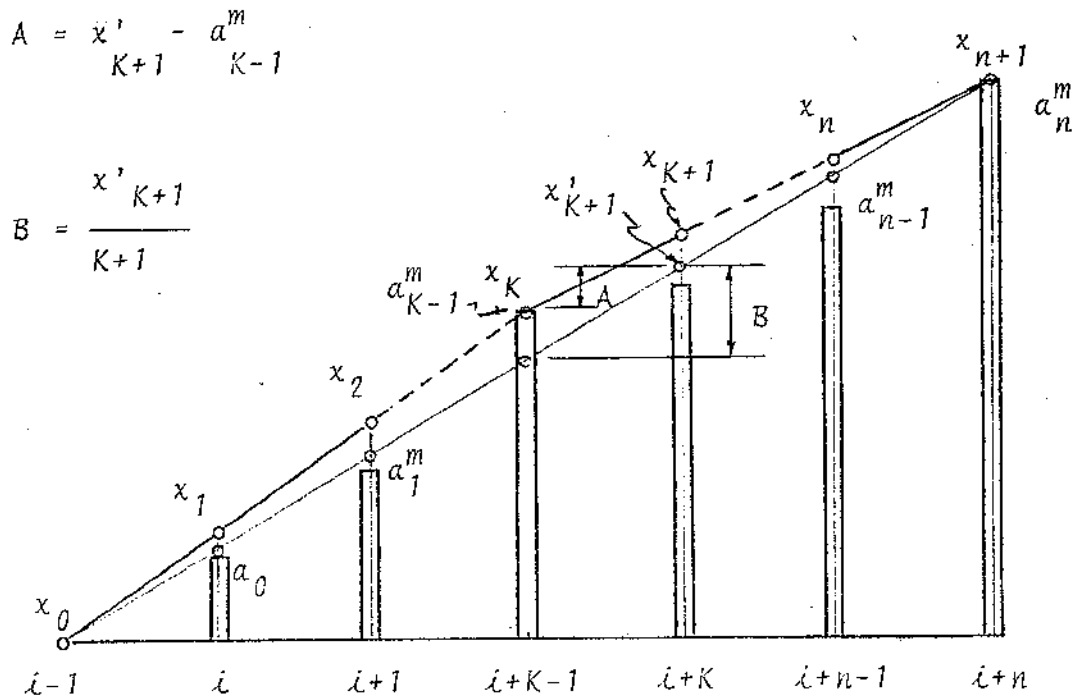


Fig.III.8 - Representação do problema, onde $i+K-1$ é um ônibus crítico.

No desenvolvimento da solução, detetamos o mesmo quando

$$\frac{x_{K+1}^i}{K+1} > x_{K+1}^i - a_{K-1}^m$$

a solução final é:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_0 = I_1 = \dots = I_{K-1} = \frac{a_{K-1}^m}{K} \\ I_K = I_{K+1} = \dots = I_n = \frac{a_n^m - a_{K-1}^m}{n - (K-1)} \end{array} \right.$$

com o critério ótimo dado por:

$$\hat{C}(x_{n+1}) = \frac{(a_{K-1}^m)^2}{K} + \frac{(a_n^m - a_{K-1}^m)^2}{n - (K-1)}$$

Vemos, portanto, que o ônibus crítico $i+k-1$ dividiu a otimização em dois horizontes com intervalos ótimos distintos. Porém como estamos interessados apenas na obtenção de I_0 e como esta otimização será refeita a cada chegada de veículo no terminal, basta-nos a consideração do primeiro horizonte ótimo. Com isto podemos descartar da programação dinâmica e nos apoiarmos simplesmente num método de procura das restrições que, quando saturadas (correspondendo a um ônibus crítico) satisfazem todas as anteriores.

A determinação dos I_K ótimos se fará pois de modo iterativo a partir da restrição $[R_n]$ até $[R_0]$. Saturando R_n , obtemos:

$$I_K = \frac{a_n^m}{n+1} \quad \forall K \leq n \quad \text{[III.11]}$$

Examinaremos então as restrições na ordem decrescente. Se a somatória dos I_K não satisfizer a restrição R_i ($i < n$), então saturaremos esta restrição:

$$I_K = \frac{a_i^m}{i+1} \quad \forall K \leq i \quad \text{[III.12]}$$

Procedendo da mesma maneira até R_0 , veremos que I_0 será definido a partir da última restrição que teve de ser saturada. Se R_{K-1} é esta restrição, que a chamaremos "restrição útil", teremos então

$$I_0 = I_1 = \dots = I_{K-1} = \frac{a_{K-1}^m}{K} \quad \text{[III.13]}$$

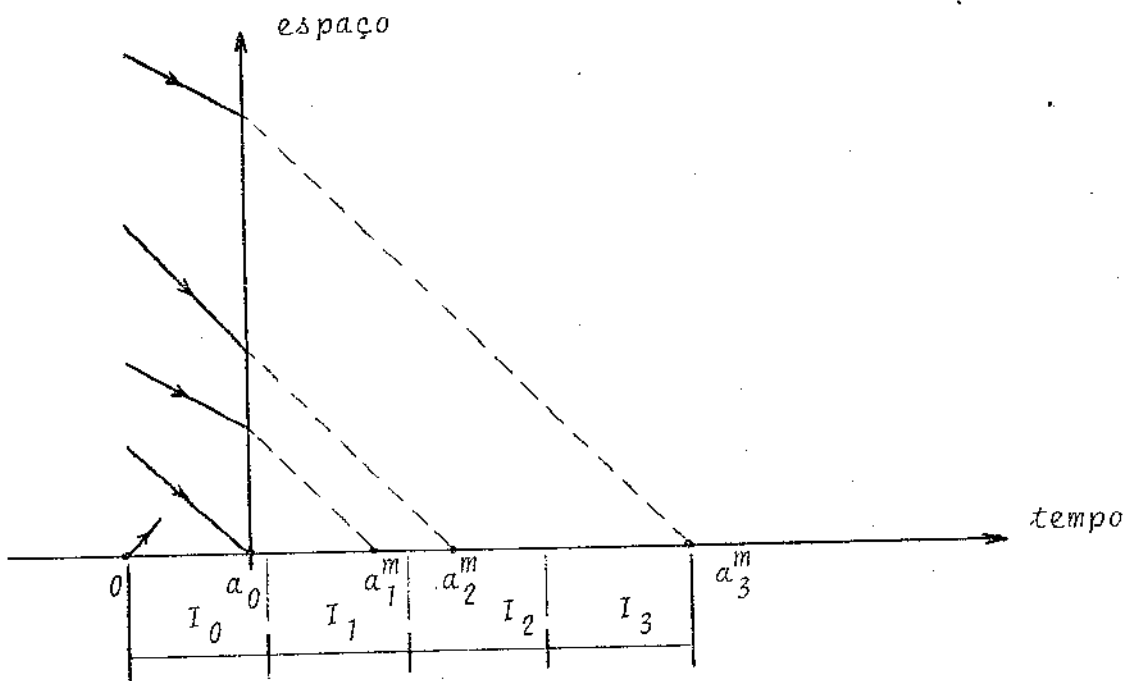


Fig. III.9 - Exemplo de solução utilizando-se da restrição útil R_3

III.4.3 - Redução do problema estocástico

A resolução do problema determinístico nos trãs que o sub-conjunto $[I_0, \dots, I_{K-1}]$ do sistema minimizando o critério C sob as restrições $R_0, \dots, R_n$ é a solução minimizando o critério

$$C = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} I_i^2}{\sum_{i=0}^{K-1} I_i} \quad \text{[III.14]}$$

sujeito à restrição R_{K-1} , as outras restrições de ordem inferior estando satisfeitas por definição.

Faremos então a hipótese que este resultado é válido para o problema estocástico, isto é, se pegarmos

$$I_0 = I_1 = \dots = I_{K-2} = \frac{a_{K-1}^m}{K} \quad \text{[III.15]}$$

então as restrições

$$\begin{aligned} I_0 &\geq a_0 \\ &\dots \\ I_{K-2} + \dots + I_0 &\geq a_{K-2} \end{aligned}$$

são verificadas quaisquer que forem os valores tomados pelas variáveis aleatórias $a_1, \dots, a_{K-2}$. Esta hipótese é tão mais válida quanto $\sigma_1, \dots, \sigma_{K-2}$ forem pequenos e quanto as restrições $R_0, \dots, R_{K-2}$ do problema determinístico sejam largamente satisfeitas. Neste caso só teremos "incerteza" na obediência da própria restrição útil R_{K-1} pois desconhecemos o valor de a_{K-1} .

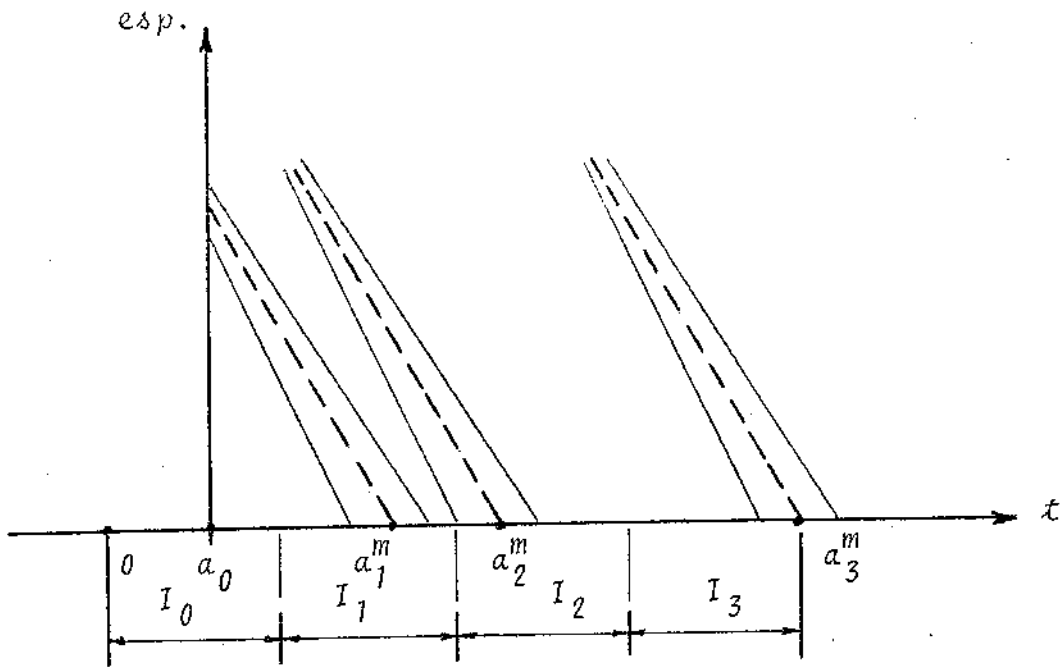


Fig. III.10 Exemplo onde os desvios padrão são pequenos

Porém, se estas condições não ocorrerem, teremos de acrescentar ao valor da restrição útil um fator X ($X \geq 0$) que nos liberte da incerteza de partida dos ônibus $i, i+1, \dots, i+K-2$ nos horários obtidos.

$$I_0 = I_1 = \dots = I_{K-2} = \frac{a_{K-1}^m + X}{K} \quad (\text{III.16})$$

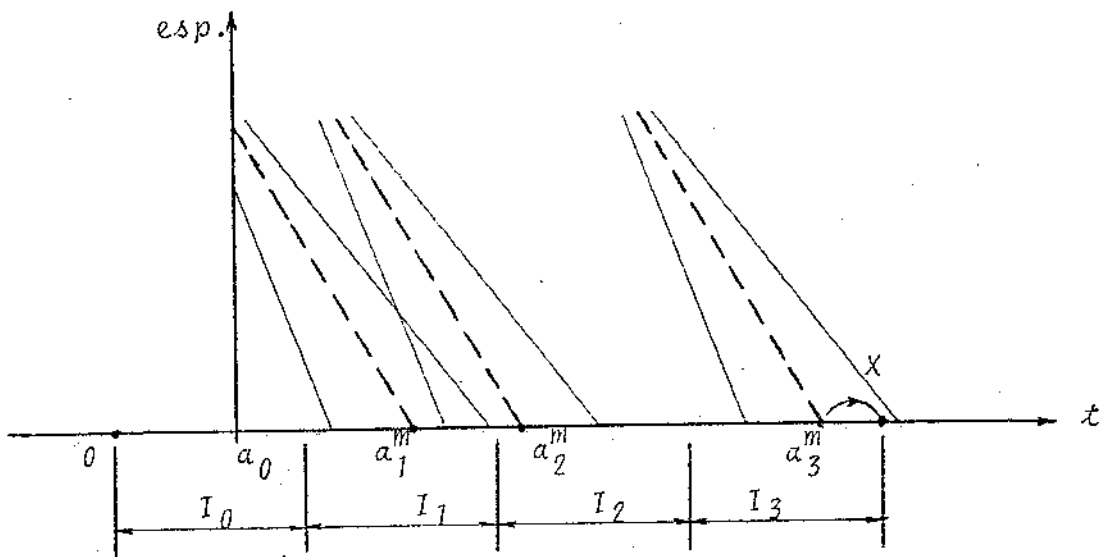


Fig. III.11- Exemplo de uso do fator X

Procurando então o valor ótimo de I_0 , basta nos a consideração do critério $C_{K-1} [X, K, a_{K-1}^m, a_{K-1}]$ do qual podemos calcular o valor médio $\bar{C}_{K-1} [X, K, a_{K-1}^m, \sigma_{K-1}]$ e o valor de X minimizando o critério médio.

III.4.4 - Resolução do problema estocástico

A partir das hipóteses precedentes e fazendo $a = a_{K-1}^m$, o critério se exprime do modo seguinte:

$$C_{K-1} = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} I_i^2}{\sum_{i=0}^{K-1} I_i} = \frac{(K-1) \cdot \frac{(a+X)^2}{K} + I_{K-1}^2}{(K-1) \cdot \frac{(a+X)}{K} + I_{K-1}} \quad (\text{III.17})$$

e onde

$$I_{K-1} = \frac{a+X}{K} \quad \text{se} \quad a_{K-1} \leq a+X$$

$$= a_{K-1} - (K-1) \cdot \frac{(a+X)}{K} \quad \text{se} \quad a_{K-1} > a+X$$

e considerando, neste último caso, que o ônibus $i+K-1$ partirá imediatamente.

Conhecendo a função densidade de probabilidade $f(x)$ de a_{K-1} , podemos então deduzir o critério médio $\bar{C}_{K-1}$.

$$\bar{C}_{K-1} = \int_{-\infty}^{a+X} \frac{(K-1) \cdot \left(\frac{a+X}{K}\right)^2 + \left(\frac{a+X}{K}\right)}{(K-1) \cdot \left(\frac{a+X}{K}\right) + \left(\frac{a+X}{K}\right)} \cdot f(x) \cdot dx +$$

$$\int_{a+X}^{\infty} \frac{(K-1) \cdot \left(\frac{a+X}{K}\right)^2 + \left[x - (K-1) \cdot \left(\frac{a+X}{K}\right) \right]^2}{(K-1) \cdot \left(\frac{a+X}{K}\right) + \left[x - (K-1) \cdot \left(\frac{a+X}{K}\right) \right]} \cdot f(x) \cdot dx \quad (\text{III.18})$$

Supondo que a_{K-1} siga uma lei normal com média $a_{K-1}^m = a$ e desvio padrão $\sigma_{K-1} = \sigma$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-a}{\sigma}\right)^2} \quad (\text{III.19})$$

podemos desenvolver a expressão do critério (III.18) e obter:

$$\bar{C}_{K-1} = \sigma^2 \cdot f(a+X) + \left[a - 2 \cdot \left(\frac{a+X}{K}\right) \right] \cdot F(a+X) - a + 2 \cdot \left[\left(\frac{a+X}{K}\right) - X \right] +$$

$$+ (a+X)^2 \cdot \left(\frac{K-1}{K}\right) \cdot \int_{a+X}^{\infty} \frac{f(x)}{x} \cdot dx \quad (\text{III.20})$$

Minimizando $\bar{C}_{K-1}$ em relação a X (seja $\hat{X}$ a solução), deduzimos facilmente que $I_0 = \frac{a+\hat{X}}{K}$.

O critério médio aparece como função de X parametrado em a , σ e K . Fazendo a interpretação gráfica da equação III.20 e utilizando-se de técnicas numéricas para resolução da integral que aparece na equação e que não tem solução analítica, vemos que o ganho máximo obtido em relação à solução determinística ($X=0$, $\sigma=0$) cresce à medida em que K e a relação a/σ aumentam.

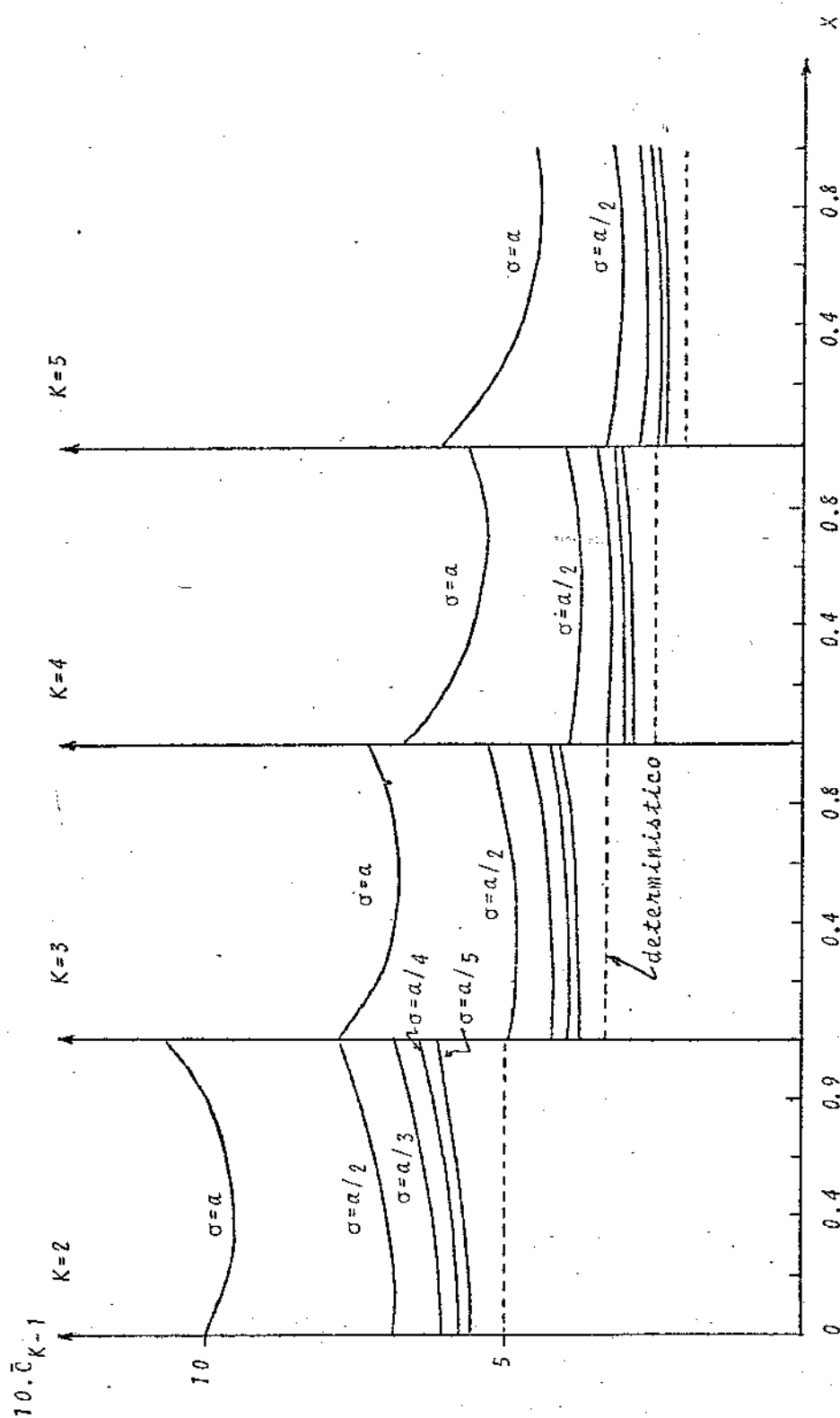


Fig. III.12 - Critério médio C_{k-1} em função de X

Podemos observar que a medida em que o desvio padrão da variável aleatória a decresce em relação a mesma, significando com isto um serviço de ônibus menos sujeito a instabilidades, então o critério médio se aproxima do valor determinístico ótimo, inclusive com o mínimo em relação a X - se achatando cada vez mais. Isto nos permite concluir que, mesmo em serviços onde o desvio padrão é da ordem de grandeza do intervalo entre ônibus (por exemplo, para $K=4 \Rightarrow \sigma=a/4$) o fato de se desviar do valor ótimo de X não trás uma degradação significativa no valor do critério, pois o mínimo já é achatado. Este resultado permite justificar as hipóteses feitas para reduzir a dimensão do problema, com o erro máximo introduzido sendo menor que o esperado, inclusive tomando-se $X=0$.

Nota - O método que definimos para determinar a hora de partida do ônibus i só é válido se n , número provável de ônibus - que partirão do terminal no horizonte H , é superior a 1. No caso contrário, duas situações podem ter ocorrido:

- a causa é uma forte perturbação e então consideraremos a hora prevista de chegada do próximo ônibus, mesmo se for superior a a_0+H ($n=2$).
- a causa é o pequeno número de ônibus em serviço na linha e então é necessário se referir a um horário, indispensável quando o intervalo normal é de 20 ou 30 minutos.

Concluindo, o algoritmo definido para determinar a hora de partida de um ônibus, funcionando em tempo real, permite uma reação imediata quando aparecer uma perturbação, já - que depende essencialmente dos ônibus críticos, e possibilita a manutenção da frequência média devido à abstenção de uso do "tempo de regulação X ", contrapondo-se à regulação de horário.

III.5 - Regulação nas Estações

Os procedimentos de regulação aplicados nos terminais permitem assegurar uma boa regularidade na vizinhança do terminal, mas sua eficiência diminui quando se aproxima da zona central da cidade. Ora, é precisamente aí que a demanda de passageiros é mais forte e as perturbações ocorrem com mais frequência. É necessário obter-se uma ação complementar nesta zona. Sua amplitude será entretanto limitada devido à pequena liberdade pela presença de passageiros nos ônibus.

III.5.1 - Princípio da regulação nas estações

O princípio é manter uma regularidade de passagem aceitável nas zonas urbanas com forte demanda e então suprimir, dentro de um limite, as perturbações aparecidas entre os terminais e estas zonas. Este procedimento, que deve ser aplicável em vários pontos da linha, deve ser simples.

Ao decidir-se pela retenção de um ônibus - que tende a se aproximar do precedente, tal ação deve evitar a formação de um grande número de "trens de ônibus". Entre tanto, este atraso imposto a um ônibus deve ser pequeno, de um lado para não prejudicar os passageiros que estão no ônibus e de outro lado para não penalizar muito seu tempo de percurso. Admitiremos portanto um estacionamento máximo de 3 minutos. É certo que este valor pode ser diminuído se as características de operação o exigirem.

III.5.2 - Descrição do algoritmo

O algoritmo desenvolvido é muito simples. Assim que um ônibus i chega numa estação de regulação, preve-
mos o instante de chegada provável do ônibus $i+1$ nesta es-

tação. Se o intervalo entre os ônibus $i+1$ e i é inferior ao intervalo entre i e $i-1$, o ônibus i parte imediatamente. Se ocorrer o caso contrário, o ônibus i parte depois de uma parada (de três minutos no máximo), tentando-se igualar os intervalos.

A utilização de um algoritmo mais sofisticado, do tipo empregado nos terminais não será de uma eficiência superior. Em efeito, a localização destas estações de regulação é tal que o tempo de percurso necessário para alcançá-las a partir do terminal não é superior a uma dezena de minutos. É impossível de fazer uma otimização sobre vários ônibus, dado que a previsão de seus instantes de chegada depende da hora de saída do terminal e uma tal previsão só é possível para um ou dois ônibus.

III.6 - Duas ações excepcionais: A injeção e a Meia-volta

Os procedimentos de regulação estudados até agora podem permitir, no caso de perturbações médias, alcançar uma boa qualidade de serviço conforme as restrições de exploração. Porém tornam-se insuficientes quando aparece na linha uma perturbação muito forte (quebra, acidente, engarrafamento, ...). É necessário então o estudo de ações tais como injeção ou meia-volta.

III.6.1 - Injeção

Numerosos problemas se apresentam quando encaramos os procedimentos visando a injeção de um ônibus reserva para acabar com uma perturbação excepcional. Realmente, é muito arriscado adotar uma política que tem por princípio fazer circular um ônibus apenas durante certo período. A presença necessária de equipamento parado representa um custo elevado se a melhora esperada do serviço para os usuários não for suficientemente importante.

Várias condições devem ser reunidas para - que a eficiência de tal ação seja real. De um lado, é necessário conhecer os pontos da linha onde o aparecimento das perturbações são mais frequentes. A possibilidade de estacionar um ônibus reserva nas proximidades destes lugares permite reduzir ao máximo os atrasos de intervenção após a tomada de decisão. De outro lado, o algoritmo de decisão deve ser ao mesmo tempo:

- suficientemente rigoroso para que o ônibus não seja injetado em circunstâncias que não exigem que sua entrada em serviço necessite continuação.
- suficientemente simples para que seja realmente usado.

Concluindo, uma política de injeção poderá ser utilizada se a frequência das perturbações excepcionais é suficiente para evitar uma sub-utilização dos ônibus de reserva e além disto, se possível, poder prever o aparecimento da perturbação e duração para evitar que, devido aos atrasos de intervenção, o ônibus seja injetado muito tarde.

Por estes dois motivos, nos parece ter um pequeno interesse o estudo mais aprofundado da injeção no desenvolvimento de nosso trabalho, e só a experiência no local permite dar uma resposta válida. Temos, portanto, nos abster de obter uma utilização automática deste procedimento e iremos apenas estudar em simulação, num caso particular (perturbação não aleatória), os efeitos da injeção de um ônibus num terminal.

III.6.2 - Meia-volta

A vantagem essencial deste método em relação ao precedente é a ausência de imobilização de pessoal e material.

Entretanto, antes de ser empregado, necessita de uma campanha de informação ao público. Fazendo a meia volta de um ônibus durante seu percurso para "tapar um buraco" que aparece entre dois ônibus circulando em sentido contrário, criamos uma ruptura de carga que pode ser mal aceita pelos usuários, pois devem descer e tomar o ônibus seguinte. Este procedimento só pode ser possível no caso onde três ônibus seguem juntos e o segundo pode retornar, já que tem poucos passageiros (ao inverso do primeiro) e estes últimos podendo subir no terceiro, que também deve estar vazio.

Este procedimento também deve estar ligado às restrições da configuração do lugar, pois deve-se escolher o local onde a meia-volta do ônibus é possível.

Estes dois tipos de condições reduzem a utilização desta ação. Da mesma forma que a injeção, não pensamos que uma utilização sistemática, decidida automaticamente, seja possível. A decisão deve resultar de uma intervenção humana (controlador), pois o sistema automático dando uma visão global da linha num instante dado pode servir de ajuda a uma decisão. Cada situação muito perturbada é, de fato, um caso particular, dependendo da repartição global dos ônibus na linha. A programação total, em tempo real, das decisões a tomar e das estratégias a aplicar é extremamente complexa. Estaremos limitados a um exemplo (o mesmo da injeção), quando faremos a meia-volta de um ônibus num lugar determinado.

III.7 - Conclusão

A existência de um sistema automático de localização em tempo real dos ônibus numa linha permite a utilização sistemática dos procedimentos de regulação e portanto uma rotação mais rápida dos ônibus, assegurando uma regularidade de passagem dos ônibus em um ponto qualquer da

linha.

Grças às informações instantâneas da posição e do avanço dos ônibus, é possível agir imediatamente após a aparição de qualquer perturbação e portanto reduzir sensivelmente as grossas perturbações que resultam da acumulação de pequenas.

É entretanto certo que algumas ações tais como regulação nas estações ou meia-volta podem prejudicar indivíduos isolados. Mas sendo os transportes coletivos um serviço público, estes métodos devem ser julgados em função das vantagens que podem resultar para a coletividade.

CAPÍTULO IV

COMPARAÇÕES E RESULTADOS

Após a obtenção dos procedimentos de regulação nos quais iremos basear, resta-nos a aplicação dos mesmos numa linha de ônibus para verificação de seus efeitos. O exemplo é o mesmo que foi utilizado no capítulo II, quando desenvolvemos o simulador de uma linha de ônibus.

A simulação deve servir para testar políticas de regulação para condições de tráfego, demanda de passageiros e forma de serviço determinadas, e o seu interesse é poder comparar os resultados obtidos pelos diferentes métodos para avaliar as vantagens respectivas.

Então nossa primeira preocupação é a obtenção de uma situação de referência que se aproxime da situação real de exploração dos serviços de ônibus. Esta referência nos permite a comparação dos efeitos da adoção de regulação na linha e as melhorias obtidas.

Por outro lado, estas comparações devem ser feitas a partir de testes estatísticos que se aplicam ao caso de processos estocásticos, já que o comportamento de uma linha de ônibus é influenciado por um grande número de variáveis aleatórias, e um estudo de validação estatística dos resultados deve ser feito.

IV.1 - A situação de referência

O modo tradicional de exploração dos serviços baseia-se em horários pré-estabelecidos que os ônibus - devem obedecer quando chegam ao final de cada percurso. Se por algum motivo um ônibus chega ao terminal a uma hora superior àquela em que deveria sair do mesmo, então volta imediatamente numa tentativa de restabelecer o horário. Por outro lado, se chegar antes, espera até que o horário de saída seja atingido.

Como queremos, então, obter a simulação de trechos de uma jornada diária completa onde o comportamento geral da linha se mantenha constante (mesma demanda média - de passageiros nas estações e mesmo tempo de percurso médio); então podemos simular esta situação de referência a partir de um número fixo de ônibus e intervalo entre eles dado.

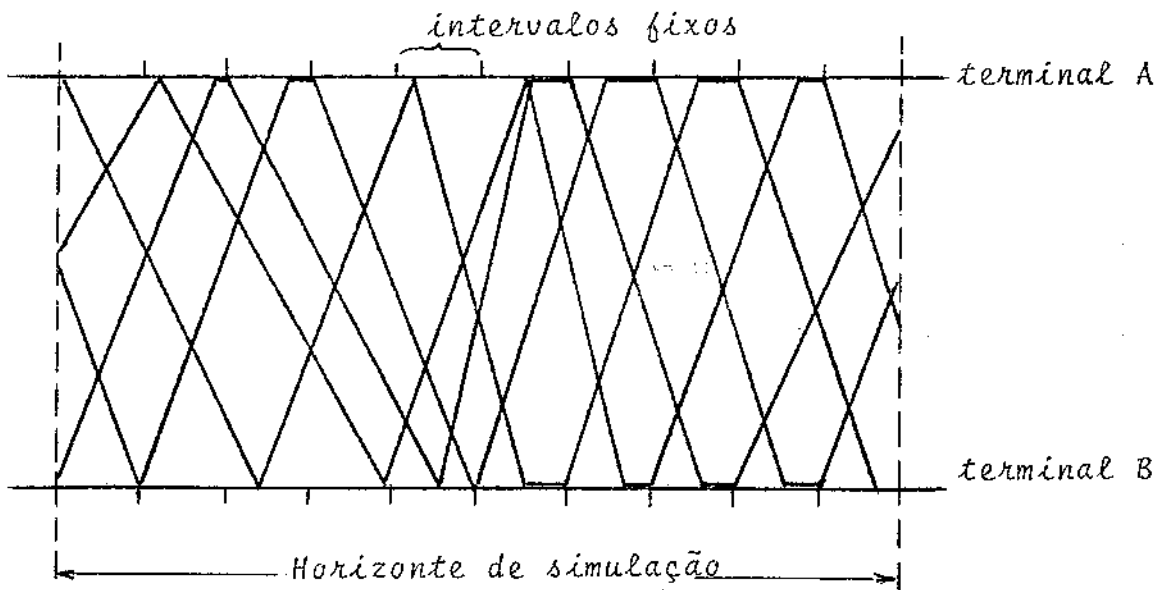


Fig. IV.1 - Representação do comportamento de uma linha de ônibus na situação de referência

Esta referência se aproxima relativamente bem da situação real, tanto pela obtenção de uma frequência média como pelas pequenas possibilidades de ação do regulador de linha (ou do próprio motorista), que não tem outras informações a não ser as últimas partidas (o motorista nem isto tem) e o horário a ser obedecido, e podemos pensar que nos dará uma boa estimação do valor inicial do critério tempo de espera médio dos passageiros, servindo como base de comparação para

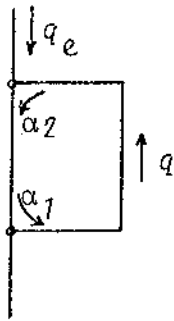
as políticas de regulação.

IV.2 - Validação dos testes

Para que uma simulação seja correta, devemos saber em particular:

- durante quanto tempo devemos deixar evoluir o sistema antes de começarmos as medidas dos critérios para não levarmos em conta o enchimento da rede.
- qual deve ser a repetição mínima da simulação em regime permanente para que as medidas sejam significativas e nos permitam considerar os critérios como variáveis aleatórias independentes distribuídas segundo uma lei normal.

IV.2.1 - Estimação da duração mínima do regime transitório



Seja uma malha da rede viária urbana onde fazemos uma amostragem de período igual ao tempo de percurso na malha.

No período $n+1$;

$$q_{n+1} = \alpha_1 (q_e + \alpha_2 q_n)$$

Seja q_e constante. No equilíbrio o fluxo na malha é

$$q_K = \frac{\alpha_1 \cdot q_e}{1 - \alpha_1 \cdot \alpha_2} = \frac{\alpha_1 \cdot q_e}{1 - \alpha}$$

$$q_{n+1} - q_K = \alpha (q_n - q_K) \Rightarrow q_{n+1} - q_K = \alpha^n (q_0 - q_K)$$

Se a rede está inicialmente vazia $q_0 = 0$, e portanto

$$\frac{q_{n+1} - q_K}{q_K} = -\alpha^n = -\epsilon$$

Partindo de condições iniciais nulas, o número de períodos necessários para obtenção de um regime de equilíbrio com precisão ϵ é dado por:

$$n = \text{superior inteiro de } \left\{ \frac{\log \epsilon}{\log \alpha} \right\}$$

Portanto, a duração mínima do transitório é obtida da seguinte forma:

- para cada malha da rede viária urbana (e para cada sentido de circulação) avaliamos o tempo de percurso T_{pi} levando em conta os atrasos introduzidos pelos semáforos e o produto das porcentagens de conversão α_i .
- para uma precisão ϵ dada, calculamos n_i pelo método anterior
- a duração mínima será $T = \max_i (n_i \cdot T_{pi})$

No caso específico da rede viária levantada para a simulação e que contém o percurso da linha de ônibus, ocorrem algumas particularidades:

- a malha mais longa (se não for a única) é aquela que contém todo o percurso de ida e volta dos ônibus;
- as porcentagens de conversão dos demais veículos - nesta malha fornecem uma produtória muito pequena, fornecendo uma relação $\frac{\log \epsilon}{\log \alpha}$ menor que 1. (no caso, $\frac{\log \epsilon}{\log \alpha} = 0,15$ para $\epsilon = 5\%$)

- um veículo bem lento, fazendo o percurso desta malha gasta aproximadamente 14 minutos para completá-lo, com os atrasos de semáforos inclusos;
- o tempo de percurso total médio dos ônibus, incluindo parada nas estações, é de 30 minutos;

Tendo em vista estas considerações e lembrando que injetaremos os ônibus simultaneamente nos dois terminais durante o carregamento da rede, então 15 minutos é um valor satisfatório para a duração do transitório.

IV:2.2 - Número de repetições necessárias para validade das medidas

Para testar as melhorias obtidas com os algoritmos propostos, iremos agir estatisticamente, pois o valor do critério tempo de espera médio dos passageiros depende essencialmente dos valores aleatórios iniciais que servem para gerar o número de passageiros nas estações e o fluxo de veículos nos segmentos. Para que o valor do critério não dependa destes valores iniciais, levaremos em conta o valor médio do critério $\bar{C}$ calculado em n simulações baseadas em n conjuntos de valores aleatórios iniciais independentes.

Consideraremos então os valores $C_1, \dots, C_n$ do critério como variáveis aleatórias independentes e de mesma lei, admitindo uma média m e um desvio padrão σ . Seja então p a probabilidade de que $\bar{C}$ difira de m no máximo de um valor K (erro relativo). [10]

$$p \left(|m - \bar{C}| < K \right) = p$$

$$p \left[|m - \bar{C}| > K \right] = 1 - p = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{K\sqrt{n}}{\sigma}}^{+\infty} e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

fazendo $p=95\%$:

$$\frac{K\sqrt{n}}{\sigma} = 2 \quad \Rightarrow \quad n = 4 \cdot \frac{\sigma^2}{K^2}$$

Se queremos um erro relativo de $\varepsilon = 5\% \Rightarrow K = \frac{m}{20}$

$$n = 1600 \cdot \frac{\sigma^2}{m^2}$$

Substituindo σ e m pelos valores de S e $\bar{C}$, que são os estimadores de σ e m na amostragem $1, \dots, n$, então obtemos

$$n = 1600 \cdot \left(\frac{S}{\bar{C}} \right)^2$$

Uma aproximação, utilizando-se $\bar{C} = 2,5$ e $S=0,2$ minutos nos fornece $n=12$.

Aqui é interessante de se notar que $\bar{C}$, valor médio do critério tempo de espera médio da linha completa - representa efetivamente o tempo de espera médio dos passageiros, ao passo que S representa o desvio padrão de $\bar{C}$ relativamente às n simulações.

IV.3 - Resultados

Para apresentação dos resultados, distinguiremos o comportamento da linha de ônibus em funcionamento normal, onde não ocorrem perturbações muito significativas no tráfego que influencia a marcha dos mesmos, e funcionamento com perturbações.

IV.3.1 - Funcionamento normal

Iremos mostrar os efeitos da regulação nos terminais e em duas estações intermediárias (uma em cada sentido) sobre o critério principal e as repercussões sobre os outros parâmetros característicos do funcionamento da linha.

IV.3.1.1 - Tempo de espera médio

A diminuição do tempo de espera médio com a regulação terminal é sensível onde a situação de referência baseia-se num horário muito "apertado" para a demanda e tempos de percurso existentes, e onde qualquer perturbação tende a se propagar. Esta situação é comum nos períodos mais congestionados das jornadas se os intervalos entre ônibus e o número dos mesmos não são ajustados para as condições do momento. Por outro lado, a regulação terminal com estações reguladoras intermediárias fornece um ganho suplementar menos significativo, tornando-se de menor interesse. Os valores comparativos podem ser vistos na tabela abaixo.

	Tempo de espera médio		Desvio padrão (minut.)	Interv. médio entre ônibus (min)
	minutos	ganho		
I. Situação de referência 8 ônibus / 3 em 3 minutos	3.51		0.40	3.30
II. Regulação terminal (8 ônibus)	2.70	23.0%	0.25	4.11
III. Regulação terminal e em duas estações (8 ônibus)	2.52	6.7%	0.21	3.97
Ganho III / I		28.2%		

Tabela IV.1 - Valores comparativos do tempo de espera médio dos passageiros nas estações e dos intervalos médios entre ônibus.

A visualização destas situações está nos diagramas espaço-tempo A1, A2 e A3 do Anexo II, que comprovam nossas suposições iniciais:

- se o horário fixo alocado para o período não possui um "tempo de regulação" suficiente para absorver as perturbações que surgem, então o serviço se deteriora e o tempo de espera médio aumenta (diagrama A1);
- se uma perturbação ocorrida não é anulada no terminal, então se propaga numa formação constante de "trens de ônibus" (diagrama A1);
- a regulação terminal, detetando o aparecimento de perturbações, consegue destruir os "trens de ônibus" que chegam ao terminal e restabelecer a regularidade (diagrama A2), fornecendo uma melhoria significativa em relação à situação de referência-perturbada;
- a regulação complementar em estações evita a formação dos "trens" através de pequenos atrasos aos ônibus que tendem a se aproximar do anterior. Com isto conseguimos ainda uma melhoria em relação à regulação terminal, porém menos significativa. É entretanto um procedimento eficaz apenas em serviços com alta frequência.

É interessante de se notar, também, os pequenos valores do desvio padrão do critério, mostrando que o mesmo representa realmente um valor médio. De qualquer forma, a diminuição significativa constatada mostra que os procedimentos de regulação utilizados asseguram uma regularidade maior do serviço de um dia para outro ao eliminarem gran

de parte das perturbações, assim como suas propagações.

Agora, se o intervalo fixo entre os ônibus na situação de referência estiver mais adequado à situação do momento, ou seja, se os veículos tiverem um tempo de folga de saída em cada terminal, então as perturbações ocorridas no trajeto são absorvidas mais facilmente e a regulação terminal ou em estações não trará melhorias, já que o serviço consegue se manter regulado sem o uso da mesma (diagrama A4).

	Tempo de espera médio		Desvio padrão (minutos)	Interv. Médio entre ônibus (minutos)
	minutos	ganho		
I. Situação de referência 8 ônibus/4 em 4 minutos	2.45		0.13	4.02
II. Regulação terminal 8 ônibus	2.70	-10.2%	0.25	4.11
III. Regulação terminal e em duas estações (8 ônibus)	2.54	-3.7%	0.17	4.25

Tabela IV.2 - Valores comparativos do tempo de espera médio e do intervalo médio.

De fato, a aplicação das políticas de regulação na situação mostrada na tabela IV.1 fornece um aumento do intervalo entre ônibus nas estações, e isto porque a destruição dos "trens de ônibus" requer o uso de "atrasos" - aos veículos que tendem a se emparelhar. Então, se a situação de referência basear-se em horários que mantenham os intervalos nos mesmos valores que os conseguidos com a regulação, o serviço fica implicitamente regulado.

Porém vemos claramente que esta é uma situação de equilíbrio instável, onde qualquer perturbação mais significativa pode anular as melhorias conseguidas. A regulação de intervalos, por sua vez, fornece um comportamento mais estável, conforme veremos adiante.

IV.3.1.2 - Tempo de percurso médio dos passageiros

A regulação nas estações trás evidentemente um aumento do tempo de percurso médio dos passageiros, devido às paradas possíveis nas estações de controle.

Porém este aumento foi insignificante em relação ao ganho obtido no tempo de espera médio em situações instáveis como no caso da tabela IV.1, onde o tempo de percurso médio dos passageiros aumentou de 0,60 minutos (de 8,08 minutos, na referência, para 8,68 minutos na regulação em duas estações). Houve, então, uma perda de tempo de 7,4 % nos ônibus, ao passo que os passageiros nas estações ganharam 28,2%.

Por outro lado, a regulação nas estações trouxe uma diminuição da demanda recusada nos pontos (ver tabela IV.3). Isto deixa implícito que a distribuição dos pas-

sageiros nos ônibus foi melhorada, com uma redução da ocorrência de ônibus lotados, e conseqüentemente com uma diminuição do desconforto imposto aos passageiros que sofreram a regulação dentro dos ônibus.

IV.3.1.3 - Demanda recusada

Esta demanda refere-se aos passageiros que estavam na estação e não conseguiram subir no primeiro ônibus que chegou, pois o mesmo estava com a lotação completa. Tomando então como valores comparativos as porcentagens da demanda total gerada nas estações e que foi recusada, obtemos:

	Demanda recusada uma vez (% do total)	Demanda recusada duas vezes (% do total)
I. Situação de referência 8 ônibus/3 em 3 minutos	14.2	-
II. Regulação terminal 8 ônibus	8.8	2.0
III. Regulação terminal e em duas estações (8 ônibus)	7.5	-
IV. Situação de referência 8 ônibus /4 em 4 minutos	7.6	-

Tabela IV.3 - Valores comparativos da demanda recusada.

Os valores da tabela mostram que:

- a regulação dos intervalos entre ônibus consecutivos reduziu a demanda recusada. Isto ocorreu porque ao reduzirmos a ocorrência de grandes intervalos, então evitamos crescimentos anormais das filas dos passageiros nas estações e consequentemente as mesmas foram absorvidas com maior facilidade pelo primeiro ônibus que chegou;
- a regulação terminal não trouxe melhorias como a regulação em estações porque só regula o serviço nos pontos terminais, não agindo em perturbações durante o percurso. Além disto, a linha de ônibus usada como exemplo tem uma característica muito particular, que é possuir algumas estações no percurso onde os ônibus chegam frequentemente carregados. Como a regulação terminal tende a aumentar os intervalos entre ônibus para compensar as perturbações, então ocorre uma maior absorção dos passageiros que estão nos pontos anteriores a estes pontos críticos e consequentemente os passageiros dos mesmos não conseguem ser atendidos pelo primeiro ônibus, ainda que o serviço esteja mais regulado que na situação de referência.
- quando o horário fixo alocado está mais adequado ao funcionamento da linha e consegue absorver as pequenas perturbações, então o serviço fica realmente regulado e os resultados obtidos equiparam-se aos da regulação em estações, apesar de corresponder a uma situação de equilíbrio instável (ver item IV da tabela IV.3).

De qualquer forma notamos que o número de ônibus colocado em serviço foi insuficiente para absorver a demanda de passageiros gerada na linha simulada. São com o aumento deste número de veículos e a manutenção da frequência alta que obtemos melhores resultados, como pode ser visto no exemplo do Capítulo II.

IV.3.2 - Funcionamento com perturbações significativas

IV.3.2.1 - Sem uso de políticas excepcionais

Até agora vimos que em funcionamento normal, a adoção de um bom horário fixo de referência pode fornecer um serviço satisfatório sem a necessidade de se recorrer aos algoritmos de regulação terminal e em estações. Porém esta situação altera-se quando ocorrem perturbações no percurso, principalmente devido à pequena capacidade de recuperação que tem a situação de referência quando o serviço degenera-se.

Para exemplificar isto, introduzimos uma perturbação num dos cruzamentos do percurso, aumentando o atraso normal de 40 segundos para 4 minutos. Porém, mantivemos o número de ônibus em serviço (dez) e o intervalo fixo entre os mesmos (três minutos), que permitem um funcionamento ideal se não houver perturbações.

		Tempo de espera médio (minutos)	Demanda recusada 1 vez (% do <u>to</u> tal)	Demanda recusada 2 vezes (% do <u>to</u> tal)
sem pertur- bação	I. Situação de referência 10 ônibus / 3 em 3 minutos	1.95	1.1	-
	II. Regulação terminal e em duas estações (10 ônibus)	1.84	2.4	-
com pertur- bação	III. Situação de referência 10 ônibus / 3 em 3 minutos	3.20	9.4	0.2
	IV. Regulação terminal e em duas estações (10 ônibus)	2.58	6.5	0.2

Tabela IV.4 - Valores comparativos do tempo de espera médio e demanda recusada. Situação perturbada.

Os valores da tabela mostram que:

- a regulação de intervalos piora o serviço quando a linha de ônibus não sofre perturbações, e isto porque baseia-se num modelo de previsão impreciso e - tende a alongar os intervalos entre ônibus, embora mantenha a regularidade.
- porém, se a linha sofre perturbações, entre a regulação de intervalos consegue manter o serviço com a qualidade anterior, já que deteta a perturbação e evita a degeneração, ao passo que a situação de referência torna-se altamente instável.

Estes resultados podem ser visualizados nos diagramas espaço-tempo A5 e A6 do Anexo II. Também notamos pelo diagrama A5 que a regulação em estações poderia ter - fornecido melhores resultados, já que alguns emparelhamentos de ônibus não foram desfeitos. Isto aconteceu devido ao fato de que os tempos de percurso médios utilizados para a previsão de chegada dos ônibus nos terminais não foram atualizados para as condições perturbadas da linha e consequentemente alguns instantes de partida foram calculados erroneamente. Vemos aqui a importância da atualização dos dados para previsão.

IV.3.2.2 - Usando políticas excepcionais

A perturbação introduzida na simulação do funcionamento da linha ainda foi insuficiente, porém, para justificar a adoção de medidas como a injeção de ônibus reserva ou o retorno em linha.

Agora, se a perturbação ocorrida afetar o percurso de vários ônibus consecutivos, então as medidas de regulação utilizadas até o momento dificilmente conseguirão restabelecer a qualidade do serviço, pois o "buraco" criado pela perturbação não será eliminado, mesmo que a regularidade seja regenerada.

Verificamos, então, os efeitos da adoção destas medidas excepcionais numa situação altamente perturbada, sem contudo nos preocuparmos com a utilização de um método sistemático, pois cada situação é de fato um caso particular e só o conhecimento da mesma permite uma decisão adequada. O exemplo utilizado para isto foi baseado numa situação ideal, ou seja, na ocorrência de uma perturbação com duração conhecida.

	Tempo de espera médio		Intervalo médio ônibus (minutos)	Demanda recusada (% do total)		Tempo de percurso médio (minutos)
	minutos	Ganho relativo a I. (%)		uma vez	duas vezes ou mais	
I. Situação de referência 10 ônibus / 3 em 3 minutos	6.15	-	4.47	50.7	13.9	13.64
II. Regulação terminal 10 ônibus	5.53	10.1	4.83	35.8	13.3	13.93
III. Regulação terminal e em duas estações (10 ônibus)	5.52	10.2	4.97	33.5	21.0	14.00
IV. Idem + injeção de ônibus reserva após a perturbação	4.60	25.2	4.74	23.9	8.6	14.68
V. Idem + retorno em linha	5.50	10.6	4.81	17.8	4.9	13.63
VI. Idem + injeção de ônibus reserva durante a perturbação	3.46	43.7	4.57	17.1	2.8	14.32

Tabela IV.5 - Valores comparativos para situação perturbada (12 minutos no cruzamento 21)

Os resultados, apesar de corresponder a uma situação particular, permitem várias conclusões:

- a situação de referência forneceu o tempo de espera médio dos passageiros três vezes maior que em funcionamento normal e não conseguiu absorver de imediato mais da metade da demanda total de passageiros, mostrando claramente a incapacidade que o horário fixo tem de regenerar a regularidade perdida, permitindo a propagação e o aumento do distúrbio (diagrama A7).
- as regulações terminal e em estações, apesar de conseguirem reduzir significativamente o tempo de espera médio e a demanda recusada, não restabeleceram qualidade anterior do serviço, pois além de não eliminarem o inevitável "buraco" criado pela perturbação, que proporcionou aumentos anormais nas filas das estações seguintes, dificilmente absorvidos de imediato, não produziram instantes adequados de partida de ônibus, já que basearam-se em previsões com tempos de percurso desatualizados para a situação perturbada da linha. Isto fica claro nos diagramas A8 e A9 do Anexo II, onde vemos que a perturbação ocorrida, influenciando também no tráfego dos demais veículos, propiciou um congestionamento na região atingida, que se manteve até o fim da simulação e consequentemente os ônibus tiveram tempos de percurso bem maiores que os previstos.
- a regulação de intervalo, apesar de reduzir a propagação do distúrbio, o fez às custas de um aumento excessivo dos intervalos entre ônibus. Com is-

to o intervalo criado pela perturbação foi reduzido mas não eliminado totalmente. Esta também é uma causa da pequena recuperação conseguida. Agora, ao injetarmos um ônibus de reserva no terminal mais atingido, logo após o desaparecimento da perturbação, então conseguimos eliminar totalmente a propagação do distúrbio, além de aumentarmos a capacidade total da linha. A melhoria conseguida (Item - IV da tabela IV.5, visualização no diagrama A10) , tanto no tempo de espera médio como na demanda recusada deixa isto claro.

- a política anterior, mesmo impedindo a propagação do distúrbio, não age durante a duração do mesmo , permitindo que o intervalo criado continue até o terminal. Então uma solução possível para este problema é o retorno de um ônibus da linha e que se dirige para a região perturbada. Para isto o mesmo deve parar numa estação estratégica, descarregar todos os passageiros, que devem ser recolhidos pelo próximo ônibus que chegar, e então retornar no percurso crítico. Porém, as limitações e desvantagens desta política de regulação facilmente inviabilizam sua execução: os passageiros que estão a bordo são incomodados, com um aumento do seu tempo de espera e tempo de percurso; dependendo do local da perturbação, a carga de passageiros transferida pode ser grande, afetando a capacidade de absorção dos ônibus seguintes; a linha deve ter alta frequência para que o atraso de transferência seja minimizado; o trajeto atingido pela perturbação deve estar próximo do trajeto que o ônibus seguia, para que o atraso de retorno não inviabilize a decisão-tomada; deve haver espaço físico para que seja feita

to o retorno. Além disto, podemos notar (Item V - da tabela IV.5, diagrama A11) que o tempo de espera médio obtido foi pior que na política anterior, e isto porque ao retornarmos um ônibus, o mesmo - fará falta no terminal do trajeto que seguia, e simplesmente transferimos a propagação do distúrbio de um terminal para outro.

- agora, se injetamos um ônibus reserva cujo papel seja equivalente ao da política anterior, então - eliminamos as desvantagens desta última, além de aumentarmos a capacidade total da linha. As melhorias conseguidas são evidentes (Item VI da tabela IV.5, diagrama A12), porém é um procedimento de - difícil utilização, pois a decisão de injeção do - ônibus deve ser tomada num instante em que o de - desenvolvimento da perturbação é desconhecido.

Estes resultados permitem-nos afirmar que - perturbações muito severas no funcionamento de uma linha de ônibus dificilmente têm suas consequências anuladas. Os algoritmos de regulação e os respectivos modelos de previsão - fornecem, entretanto, uma ajuda valiosa nas decisões que um controlador pode tomar, principalmente ao impedir que o distúrbio se propague.

IV.3.3 - Sensibilidade dos critérios

Todos os testes que realizamos até agora - basearam-se em um número fixo de ônibus em serviço e as regulações de intervalos foram feitas com apenas duas estações de controle.

Um aspecto interessante que podemos salien

tar então é a variação dos critérios de desempenho quando - alteramos o número de ônibus e de estações.

IV.3.3.1 - Número de estações de regulação

Fazendo um teste da sensibilidade dos critérios tempo de espera médio e tempo de percurso médio relativamente ao número de estações reguladoras no percurso, - consideramos sucessivamente 2, 4 e 6 estações igualmente - repartidas nos dois sentidos.

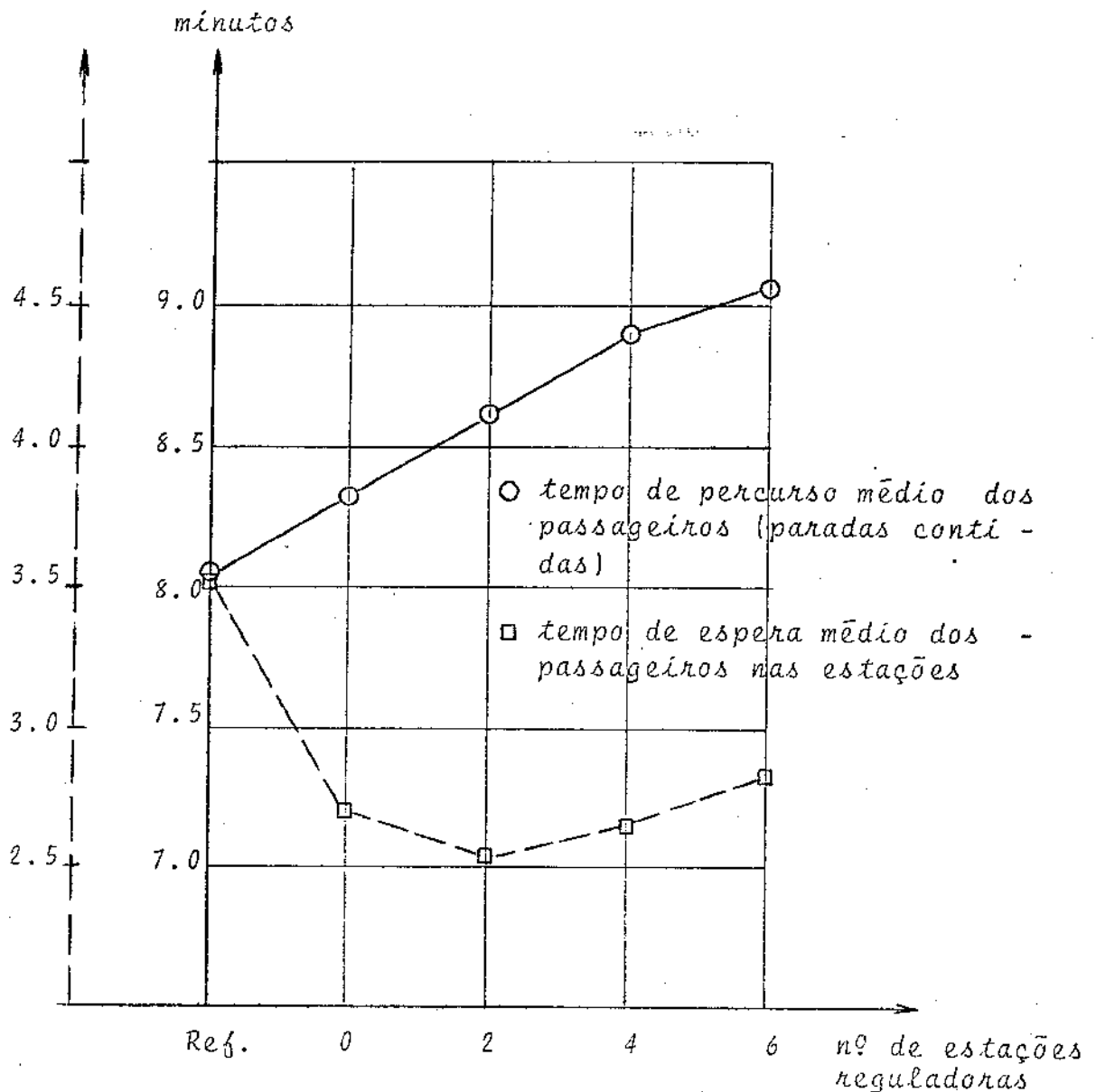


Fig. IV.1 - Evolução do tempo de espera médio e do tempo de percurso médio em função do número de estações de regulação além da terminal (Ref. é a situa

Os resultados obtidos na figura IV.1, e - que correspondem à linha com funcionamento normal, mostram - que duas estações de regulação bem localizadas, uma em cada sentido, fornecem o máximo ganho no tempo de espera médio - sem penalizar muito o tempo de percurso médio, ao passo que um maior número de estações de controle, além de não manter o tempo de espera no valor conseguido (e isto em parte é - consequência das características particulares da linha simulada), ainda aumenta o tempo de percurso, o que não é satisfatório, principalmente se o serviço requer o maior número - de ônibus circulando para atender a demanda existente. Por - outro lado, como a linha simulada é pequena em extensão, então o crescimento do tempo de percurso com o aumento do número de estações não é linear e tende a ficar constante à medida em que as mesmas localizam-se em regiões sem perturbação - e o tempo de regulação é nulo.

Fazendo esta mesma análise de sensibilidade para a linha com a perturbação do Item IV.3.2.2, verificamos que os resultados reforçam as conclusões anteriores, mostrando que as mesmas se mantêm, independentemente do comportamento do tráfego em geral e dos usuários.

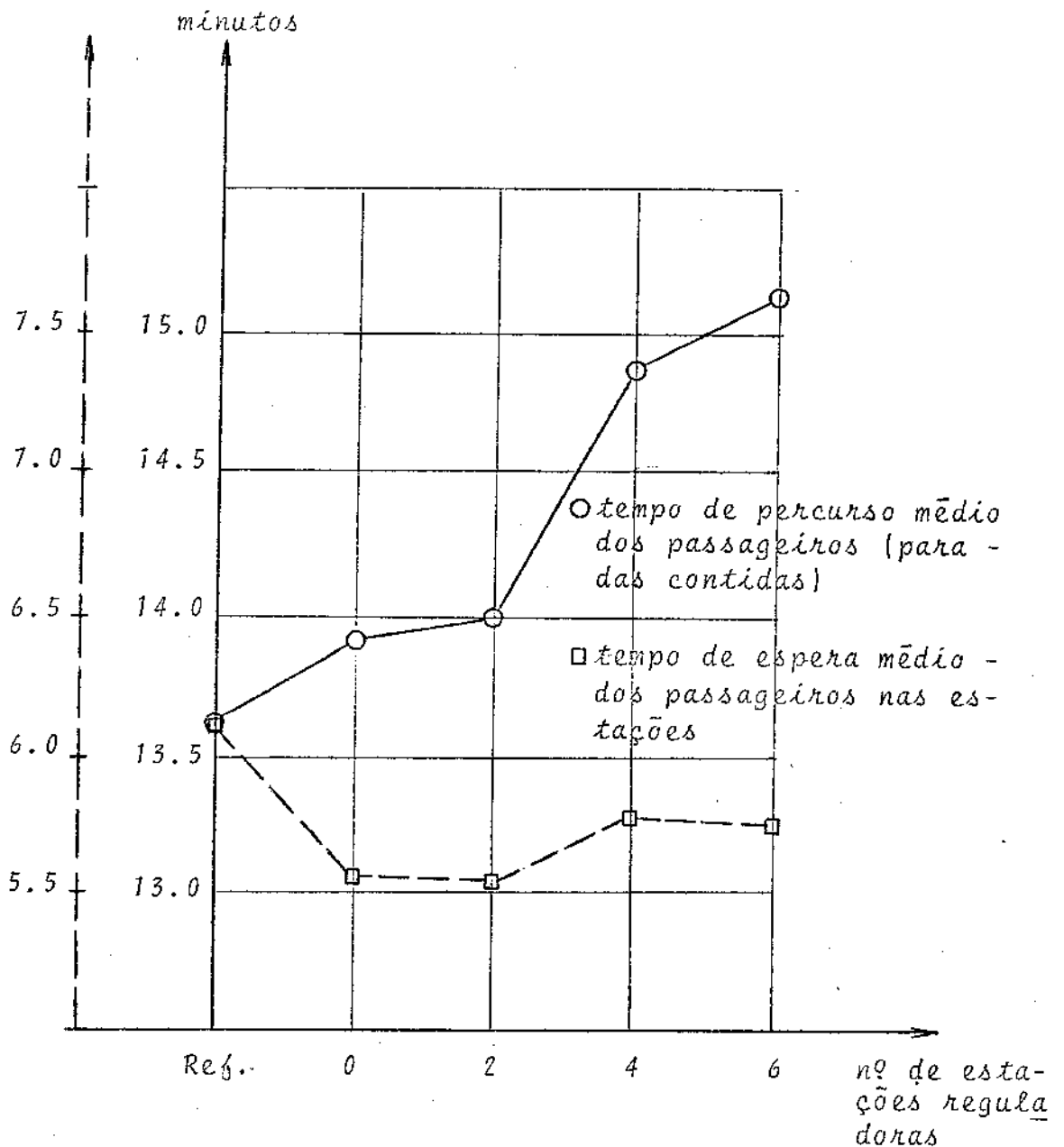


Fig. IV.2 - Evolução do TEM e do TPMP em função do número de estações de regulação além do terminal. - Funcionamento com perturbações.

IV.3.3.2 - Número de ônibus em serviço

Um aspecto econômico possível de ser salientado no funcionamento de uma linha de ônibus é o quanto que a variação do número dos mesmos influe no atendimento aos -

usuários. Para isto mantivemos a frequência de atendimento - nas estações num valor fixo e variamos a quantidade de ônibus alocada para o serviço.

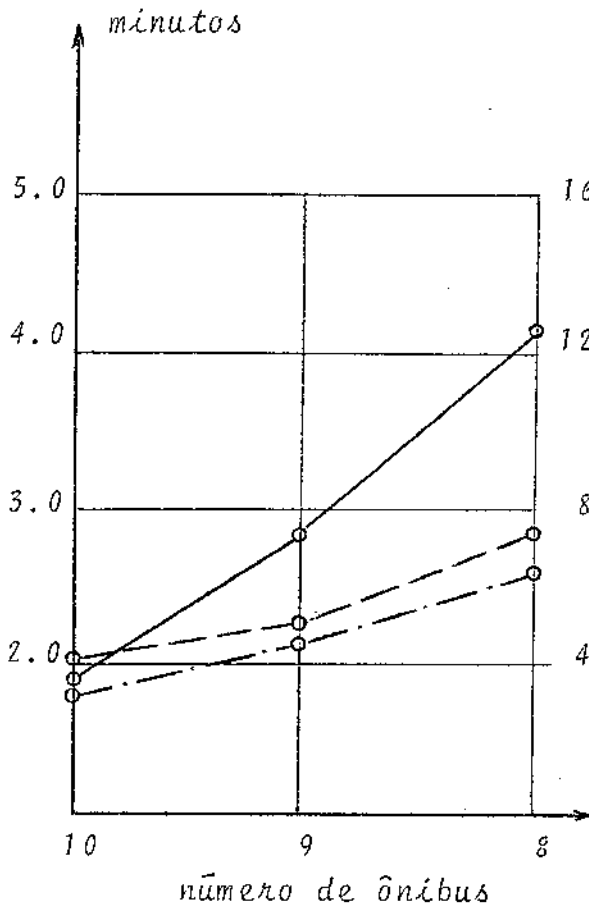


Fig. IV.3 - Evolução do tempo de espera médio em função do número de ônibus em serviço

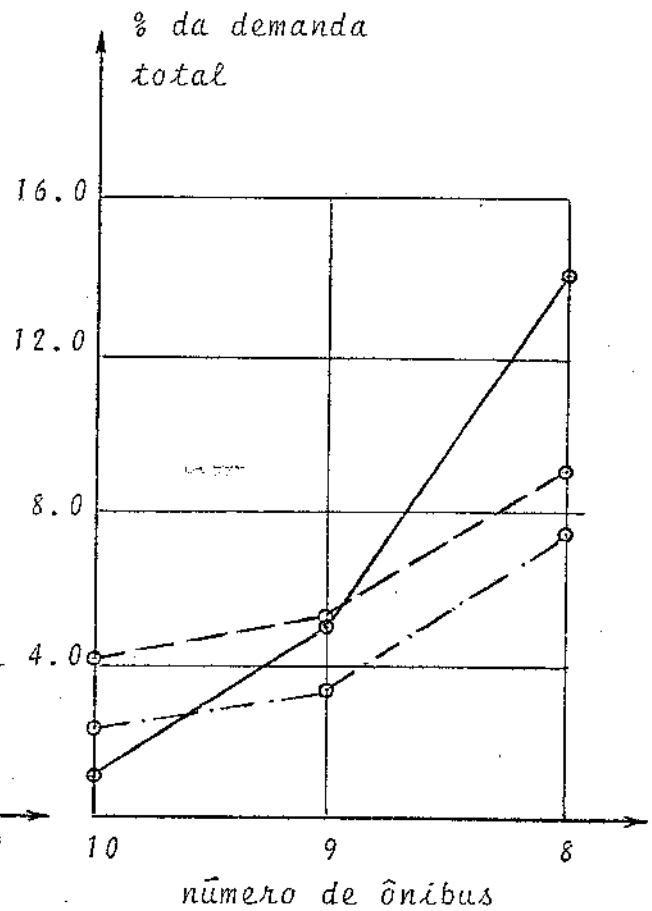


Fig. IV.4 - Evolução da demanda recusada em função do número de ônibus em serviço.

Legenda {

- - situação de referência (regulação de horário)
- - regulação terminal.
- - regulação terminal e em duas estações

Os resultados nos mostram claramente as vantagens das regulações terminal e em estações em relação à adoção de um horário fixo a ser obedecido (situação de referência). A perturbação causada pela retirada de um ônibus necessário ao serviço é grandemente sentida pela última, ao passo que regulação de intervalos consegue manter a qualidade do atendimento anterior de forma bem satisfatória. Notamos também que a diferença entre a regulação terminal e em estações é mais quantitativa do que qualitativa, o que justifica nossa preocupação em colocar esta última apenas como ação complementar da primeira.

Finalizando, esta regulação de intervalos permite melhorias significativas no atendimento dos usuários à medida em que os mesmos são poucos prejudicados pela retirada de um ônibus do serviço, quer seja devido à falta de uma equipe de trabalho, quer seja pela quebra do veículo. Por outro lado, torna-se um aspecto econômico interessante o fato de que esta regulação mantém a qualidade do serviço com um menor número de ônibus, mostrando inclusive que o sistema apoiado num horário fixo é ineficiente.

IV.4 - Conclusões

O estudo aqui realizado teve como objetivo principal a obtenção de algoritmos que permitam melhorar o funcionamento atual das linhas de ônibus urbanos.

A análise do sistema que representa uma linha de ônibus mostrou que a qualidade do seu funcionamento depende essencialmente da boa adaptação da tabela básica de horários à variação do meio exterior e das possibilidades de ação em tempo real oferecida pelo modo de exploração dos serviços. A existência de um sistema automático de coleta -

de dados permitiu a passagem satisfatória, notadamente em períodos perturbados, do modo de exploração por horário fixo a um modo menos rígido e mais adaptado às características aleatórias que tem a marcha de um ônibus: a regulação de intervalos em tempo real. Enquanto que a regulação terminal trouxe melhorias significativas em relação a uma situação de referência perturbada, a regulação em estações, por corrigir as variações dos tempos de percurso entre o terminal e as regiões mais congestionadas do trajeto trouxe uma melhoria complementar, ainda que menos importante. No caso de grandes perturbações, medidas como a injeção de ônibus-reserva ou retorno em linha se justificaram, porém o estudo breve que fizemos não permitiu tirar conclusões definitivas, mostrando apenas que um estudo das causas, frequência e lugares de aparição destas perturbações pode fornecer ajuda valiosa à utilização sistemática destes métodos excepcionais, além da indispensável experiência no local.

Os procedimentos de regulação propostos tiveram por base a minimização do tempo de espera dos passageiros nas estações, e agiram nos instantes de partida dos ônibus a partir do estado conhecido da linha, e isto graças a um sistema de localização automática dos mesmos em tempo real. O conhecimento deste estado nos instantes necessários e a otimização das partidas baseou-se num modelo de previsão do avanço dos ônibus, cuja precisão condicionou a eficácia dos procedimentos. De fato, a imprecisão é uma característica de toda previsão de tempos de percurso de um veículo em zona urbana e leva ao fracasso toda tentativa de otimização num horizonte longo. De qualquer forma, os resultados obtidos em simulação forneceram a garantia de melhoria em relação ao funcionamento tradicional, notadamente devido ao aumento da regularidade através da diminuição de intervalos importantes resultantes de um serviço degenerado.

A aplicação prática de um sistema de regulação e de controle em tempo real nos permite prever interessantes melhorias no funcionamento das linhas de ônibus. O controle permanente da evolução do estado das mesmas e as decisões provenientes dos algoritmos devem permitir aos controladores de intervir de forma eficaz, notadamente em casos de grandes perturbações. Esta aplicação também nos permitiria evidenciar certas limitações das aproximações teóricas que fizemos. O conhecimento mais detalhado das variações de parâmetros tais como a demanda dos passageiros ou os tempos de percurso dos ônibus surge como necessário se quisermos realmente otimizar o funcionamento das linhas.

Apesar de todos os resultados favoráveis conseguidos, parece-nos que, em razão do estado de saturação crescente da rede viária urbana de nossas cidades, gerador de fortes perturbações nos tempos de percurso, então as políticas de regulação estudadas, mesmo tornando-se intrinsecamente necessárias, não conseguem produzir melhorias do serviço competitivas com aquelas obtidas a partir de soluções mais radicais: criação de faixas reservadas, modificações de infraestrutura, limitações aos veículos particulares.

Melhorias nos tempos de viagem, na regularidade do serviço e nas condições de conforto são ingredientes essenciais de qualquer política que vise o transporte público. Elas devem resultar de uma preocupação conjunta de empresários, autoridades e comunidade, e como uma mudança radical neste sistema afeta o movimento diário de milhares de pessoas, todos devem estar conscientes da necessidade de um melhor uso das vias existentes em termos do movimento tanto de passageiros como mercadorias. Aliás, deve ser consenso geral o fato de que a otimização da operação de um sistema -

de ônibus deve ser baseada na minimização dos custos totais da comunidade, e não dos custos dos empresários.

Finalizando, os algoritmos de regulação - aqui propostos não têm seus usos limitados a um sistema de ônibus, mas a qualquer outro que vise o transporte em massa de pessoas (metrô, ferrovias), e podem trazer bons resultados. Por outro lado, os mesmos são mais úteis como procedimentos complementares de outras ações mais radicais, conforme citamos anteriormente. Fica aqui então uma proposição para novos trabalhos.

ANEXO I

DADOS DA REDE E DOS USUÁRIO DA LINHA DE ÔNIBUS

DADOS DE ENTRADA

INTERVALO MINIMO DAS ENTRADAS (SEG) 0.73

ENTRADA	FLUXO MEDIO (VEIC/HORA)	SEGMENTO PERTENCENTE
1	20	1
2	20	24
3	180	80
4	90	79
5	90	81
6	360	86
7	180	85
8	180	83
9	150	78
10	450	76
11	900	74
12	90	72
13	900	69
14	90	67
15	540	65
16	180	63
17	180	61
18	540	60
19	180	58
20	90	55
21	180	54
22	180	51
23	180	50
24	180	49
25	180	56
26	180	57
27	360	59
28	360	62
29	540	64
30	180	66
31	150	68
32	900	70
33	180	71
34	900	73
35	450	75

NUMERO MAXIMO DE VEICULOS NA REDE 2970

NUMERO MAXIMO DA TABELA AUXILIAR 200

TAMANHO MEDIO DOS VEICULOS (METROS) 5.00

DADOS DE SEGMENTO								
INTERVALO MEDIO ACEITO NA SAIDA DO SEGMENTO							(SEG)	
DESVIO PADRAO DO INTERVALO ACEITO							5.000	
DESVIO PADRAO DO INTERVALO DE ESCUAMENTO							1.000	
SEGMENTO	NUMERO FAIXAS,	TIPO FAIXA	TIPO CRUZ	COMPR (M)	VELS, LIVRE (M/S)	DESVIO VELS, (M/S)	PORCENT A DIREITA	PORCENT A FRENTE
1	2	2	01	120	11.10	1.00	30.0	70.0
2	2	2	0	120	11.10	1.00	50.0	40.0
3	2	2	01	120	11.10	1.00	70.0	30.0
4	2	2	0	120	11.10	1.00	50.0	50.0
5	1	1	0	120	11.10	0.70	30.0	30.0
6	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
7	2	2	0	120	11.10	1.00	5.0	95.0
8	2	2	0	120	11.10	1.00	10.0	90.0
9	2	2	0	120	11.10	1.00	10.0	90.0
10	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
11	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
12	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
13	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
14	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
15	2	2	0	120	11.10	1.00	50.0	50.0
16	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
17	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
18	2	2	0	120	11.10	1.00	10.0	90.0
19	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
20	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	98.0
21	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
22	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
23	1	1	01	120	11.10	0.70	0.0	95.0
24	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	80.0
25	1	1	0	120	11.10	0.70	30.0	40.0
26	1	1	1	120	11.10	0.70	20.0	80.0
27	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
28	1	1	1	120	11.10	0.70	85.0	10.0
29	2	2	0	120	11.10	1.00	7.0	93.0
30	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
31	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
32	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
33	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
34	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
35	2	2	0	120	11.10	1.00	5.0	95.0
36	2	2	0	120	11.10	1.00	10.0	90.0
37	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
38	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
39	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
40	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
41	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
42	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
43	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
44	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
45	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
46	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
47	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	99.0
48	1	1	1	120	11.10	0.70	40.0	60.0
49	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	70.0
50	2	2	01	120	11.10	1.00	0.0	50.0
51	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	80.0
52	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
53	2	2	0	120	11.10	1.00	13.0	87.0
54	2	2	01	120	11.10	1.00	0.0	90.0
55	1	1	1	120	11.10	0.70	0.0	50.0
56	1	1	1	120	11.10	0.70	70.0	20.0
57	1	1	0	120	11.10	0.70	60.0	30.0
58	1	1	0	120	11.10	0.70	5.0	95.0
59	2	2	0	120	11.10	1.00	50.0	50.0
60	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
61	1	1	1	120	11.10	0.70	85.0	5.0
62	1	1	0	120	11.10	0.70	70.0	30.0
63	1	1	0	120	11.10	0.70	70.0	30.0
64	1	1	0	120	11.10	0.70	70.0	30.0
65	1	1	0	120	11.10	0.70	60.0	40.0
66	1	1	1	120	11.10	0.70	100.0	0.0
67	1	1	1	120	11.10	0.70	100.0	0.0
68	1	1	1	120	11.10	0.70	95.0	0.0
69	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	40.0
70	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	40.0
71	1	1	1	120	11.10	0.70	100.0	0.0
72	1	1	1	120	11.10	0.70	100.0	0.0
73	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
74	2	2	0	120	11.10	1.00	20.0	80.0
75	1	1	0	120	11.10	0.70	10.0	60.0
76	1	1	0	120	11.10	0.70	25.0	70.0
77	1	1	0	120	11.10	0.70	30.0	40.0
78	1	1	0	120	11.10	0.70	90.0	0.0
79	1	1	01	120	11.10	0.70	70.0	30.0
80	2	2	01	120	11.10	1.00	45.0	50.0
81	1	1	1	120	11.10	0.70	10.0	70.0
82	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0
83	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	70.0
84	2	2	0	120	11.10	1.00	30.0	70.0
85	1	1	1	120	11.10	0.70	0.0	80.0
86	2	2	0	120	11.10	1.00	0.0	100.0



Cont

DADOS DE SEGMENTO

SEGMENTO	CRUZ CHEG	FASE CHEG	SEGMENTOS CHEGANDO			SEGMENTOS SAINDO			FAIXA ESO	LARGURA A ATRAVESSAR		
			NSSEG1	NSSEG2	NSSEG3	ISEG1	ISEG2	ISEG3		ESO	FRENT	DIR.
1	1	1	50	0	0	0	0	2	1	500	300	1.00
2	2	3	51	0	53	0	3	52	3	500	300	1.00
3	3	5	54	0	0	0	0	4	5	500	300	1.00
4	4	7	55	0	0	0	0	5	7	500	300	1.00
5	5	9	47	0	52	0	48	53	9	500	300	1.00
6	6	11	0	45	50	0	7	0	10	500	300	1.00
7	7	13	58	45	57	0	8	0	12	500	300	1.00
8	8	15	60	44	59	0	9	0	14	500	300	1.00
9	9	17	61	43	0	0	10	0	16	500	300	1.00
10	10	19	63	42	62	0	11	0	18	500	300	1.00
11	11	21	65	41	64	0	12	0	20	500	300	1.00
12	12	23	0	40	66	0	13	0	22	500	300	1.00
13	13	25	67	39	0	0	14	0	24	500	300	1.00
14	14	27	0	38	68	0	15	0	26	500	300	1.00
15	15	29	69	37	0	0	16	0	28	500	300	1.00
16	16	31	0	36	70	0	17	0	30	500	300	1.00
17	17	33	0	35	71	0	18	0	32	500	300	1.00
18	18	35	72	34	0	0	19	0	34	500	300	1.00
19	19	37	74	33	73	0	20	0	36	500	300	1.00
20	20	39	0	32	75	0	21	0	38	500	300	1.00
21	21	41	76	31	0	0	22	0	40	500	300	1.00
22	22	43	78	30	77	0	23	0	42	500	300	1.00
23	23	45	0	29	80	24	0	0	44	500	300	1.00
24	24	47	0	0	81	25	0	0	46	500	300	1.00
25	25	49	82	0	29	30	26	84	47	500	300	1.00
26	26	51	83	0	0	0	0	27	48	500	300	1.00
27	27	53	85	0	0	0	0	28	49	500	300	1.00
28	28	55	86	0	84	0	0	29	51	500	300	1.00
29	29	58	25	82	0	0	30	26	52	500	300	1.00
30	22	43	77	22	78	21	31	0	54	500	300	1.00
31	21	41	0	21	76	0	32	0	56	500	300	1.00
32	20	39	75	20	0	0	33	0	58	500	300	1.00
33	19	37	73	19	74	0	34	0	60	500	300	1.00
34	18	35	0	18	72	0	35	0	62	500	300	1.00
35	17	33	71	17	0	0	36	0	64	500	300	1.00
36	16	31	70	16	0	0	37	0	66	500	300	1.00
37	15	29	0	15	69	0	38	0	68	500	300	1.00
38	14	27	68	14	0	0	39	0	70	500	300	1.00
39	13	25	0	13	67	0	40	0	72	500	300	1.00
40	12	23	66	12	0	0	41	0	74	500	300	1.00
41	11	21	64	11	65	0	42	0	76	500	300	1.00
42	10	19	62	10	63	0	43	0	78	500	300	1.00
43	9	17	0	9	61	0	44	0	80	500	300	1.00
44	8	15	59	8	60	0	45	0	82	500	300	1.00
45	7	13	57	7	58	0	46	0	84	500	300	1.00
46	6	11	56	6	0	0	47	0	86	500	300	1.00
47	5	10	0	52	5	48	53	0	88	500	300	1.00
48	20	57	49	0	0	0	0	1	90	500	300	1.00
49	29	58	0	0	48	0	1	0	91	500	300	1.00
50	1	2	0	0	1	0	2	0	93	500	300	1.00
51	2	4	0	53	2	3	52	0	95	500	300	1.00
52	3	10	5	47	0	0	6	48	97	500	300	1.00
53	2	4	0	51	0	0	0	3	99	500	300	1.00
54	3	6	0	0	3	0	4	0	101	500	300	1.00
55	4	8	0	0	4	0	5	0	103	500	300	1.00
56	6	12	0	0	46	47	0	7	104	500	300	1.00
57	7	14	0	53	45	46	0	8	105	500	300	1.00
58	7	14	45	57	7	8	0	46	106	500	300	1.00
59	8	16	0	60	44	45	0	9	107	500	300	1.00
60	8	16	44	59	8	9	0	45	109	500	300	1.00
61	9	18	43	0	9	10	0	44	111	500	300	1.00
62	10	20	10	63	42	43	0	11	112	500	300	1.00
63	10	20	42	62	10	11	0	43	113	500	300	1.00
64	11	22	11	65	41	42	0	12	114	500	300	1.00
65	11	22	41	64	11	12	0	42	115	500	300	1.00
66	12	24	12	0	40	41	0	13	116	500	300	1.00
67	13	26	39	0	13	14	0	40	117	500	300	1.00
68	14	28	14	0	38	39	0	15	118	500	300	1.00
69	15	30	37	0	15	16	0	38	119	500	300	1.00
70	16	32	16	0	36	37	0	17	121	500	300	1.00
71	17	34	17	0	35	36	0	18	123	500	300	1.00
72	18	36	34	0	18	19	0	35	124	500	300	1.00
73	19	38	19	74	33	34	0	20	125	500	300	1.00
74	19	38	33	73	19	20	0	34	127	500	300	1.00
75	20	40	20	0	32	33	0	21	129	500	300	1.00
76	21	42	31	0	21	22	0	32	130	500	300	1.00
77	22	44	22	70	30	31	0	82	131	500	300	1.00
78	22	44	30	77	22	82	23	11	132	500	300	1.00
79	23	45	80	23	0	0	77	24	133	500	300	1.00
80	23	46	23	0	79	77	24	0	134	500	300	1.00
81	24	48	24	0	0	0	29	0	136	500	300	1.00
82	23	50	0	29	25	26	84	0	137	500	300	1.00
83	26	52	0	0	26	0	27	0	139	500	300	1.00
84	28	56	28	86	0	0	0	0	141	500	300	1.00
85	27	54	0	0	27	0	28	0	143	500	300	1.00
86	28	56	0	84	20	0	29	0	144	500	300	1.00

Cont

DADOS DE FAIXA

FLUXO MAXIMO NA FAIXA (VEIC/HORA) 1575.

NUMERO DA FAIXA	SEGMENTO POSSUIDOR
1	1
2	1
3	2
4	2
5	3
6	3
7	4
8	4
9	5
10	6
11	6
12	7
13	7
14	8
15	8
16	9
17	9
18	10
19	10
20	11
21	11
22	12
23	12
24	13
25	13
26	14
27	14
28	15
29	15
30	16
31	16
32	17
33	17
34	18
35	18
36	19
37	19
38	20
39	20
40	21
41	21
42	22
43	22
44	23
45	24
46	24
47	25
48	26
49	27
50	27
51	28
52	29
53	29
54	30
55	30
56	31
57	31
58	32
59	32
60	33
61	33
62	34
63	34
64	35
65	35
66	36
67	36
68	37
69	37
70	38
71	38
72	39
73	39
74	40
75	40
76	41
77	41
78	42
79	42
80	43
81	43
82	44
83	44

84	43
85	43
86	46
87	46
88	47
89	47
90	48
91	49
92	49
93	50
94	50
95	51
96	51
97	52
98	52
99	53
100	53
101	54
102	54
103	55
104	56
105	57
106	58
107	59
108	59
109	60
110	60
111	61
112	62
113	63
114	64
115	65
116	66
117	67
118	68
119	69
120	69
121	70
122	70
123	71
124	72
125	73
126	73
127	74
128	74
129	75
130	76
131	77
132	78
133	79
134	80
135	80
136	81
137	82
138	82
139	83
140	83
141	84
142	84
143	85
144	85
145	86

CRUZAMENTO	1	INDICE	FASE	DURACAO
		1	1	***
		2	1	3
		3	2	***
		4	2	3
CRUZAMENTO	2	INDICE	FASE	DURACAO
		1	3	24
		2	3	3
		3	4	48
		4	4	3
CRUZAMENTO	3	INDICE	FASE	DURACAO
		1	5	***
		2	5	3
		3	6	***
		4	6	3
CRUZAMENTO	4	INDICE	FASE	DURACAO
		1	7	***
		2	7	3
		3	8	***
		4	8	3
CRUZAMENTO	5	INDICE	FASE	DURACAO
		1	9	26
		2	9	3
		3	10	34
		4	10	3
CRUZAMENTO	6	INDICE	FASE	DURACAO
		1	11	***
		2	11	3
		3	12	***
		4	12	3
CRUZAMENTO	7	INDICE	FASE	DURACAO
		1	13	42
		2	13	3
		3	14	18
		4	14	3
CRUZAMENTO	8	INDICE	FASE	DURACAO
		1	15	44
		2	15	3
		3	16	26
		4	16	3
CRUZAMENTO	9	INDICE	FASE	DURACAO
		1	17	***
		2	17	3
		3	18	***
		4	18	3
CRUZAMENTO	10	INDICE	FASE	DURACAO
		1	19	40
		2	19	3
		3	20	30
		4	20	3
CRUZAMENTO	11	INDICE	FASE	DURACAO
		1	21	34
		2	21	3
		3	22	46
		4	22	3
CRUZAMENTO	12	INDICE	FASE	DURACAO
		1	23	***
		2	23	3
		3	24	***
		4	24	3
CRUZAMENTO	13	INDICE	FASE	DURACAO
		1	25	***
		2	25	3
		3	26	***
		4	26	3
CRUZAMENTO	14	INDICE	FASE	DURACAO
		1	27	***
		2	27	3
		3	28	***
		4	28	3

CRUZAMENTO 16	INDICE	FASE	DURACAO
	1	31	30
	2	31	3
	3	32	40
	4	32	3

CRUZAMENTO 17	INDICE	FASE	DURACAO
	1	33	***
	2	33	3
	3	34	***
	4	34	3

CRUZAMENTO 18	INDICE	FASE	DURACAO
	1	35	***
	2	35	3
	3	36	***
	4	36	3

CRUZAMENTO 19	INDICE	FASE	DURACAO
	1	37	42
	2	37	3
	3	38	38
	4	38	3

CRUZAMENTO 20	INDICE	FASE	DURACAO
	1	39	42
	2	39	3
	3	40	38
	4	40	3

CRUZAMENTO 21	INDICE	FASE	DURACAO
	1	41	42
	2	41	3
	3	42	38
	4	42	3

CRUZAMENTO 22	INDICE	FASE	DURACAO
	1	43	44
	2	43	3
	3	44	16
	4	44	3

CRUZAMENTO 23	INDICE	FASE	DURACAO
	1	45	***
	2	45	3
	3	46	***
	4	46	3

CRUZAMENTO 24	INDICE	FASE	DURACAO
	1	47	***
	2	47	3
	3	48	***
	4	48	3

CRUZAMENTO 25	INDICE	FASE	DURACAO
	1	49	14
	2	49	3
	3	50	46
	4	50	3

CRUZAMENTO 26	INDICE	FASE	DURACAO
	1	51	***
	2	51	3
	3	52	***
	4	52	3

CRUZAMENTO 27	INDICE	FASE	DURACAO
	1	53	***
	2	53	3
	3	54	***
	4	54	3

CRUZAMENTO 28	INDICE	FASE	DURACAO
	1	55	***
	2	55	3
	3	56	***
	4	56	3

CRUZAMENTO 29	INDICE	FASE	DURACAO
	1	57	***
	2	57	3
	3	58	***

DADOS DE FASE

FASE

FAIXAS QUE DEPENDEM DA FASE

1	1	2	0	0
2	93	94	0	0
3	3	4	0	0
4	95	96	99	100
5	5	6	0	0
6	101	102	0	0
7	7	8	0	0
8	103	0	0	0
9	9	0	0	0
10	88	89	97	98
11	10	11	86	87
12	104	0	0	0
13	12	13	84	85
14	105	106	0	0
15	14	15	82	83
16	107	108	109	110
17	16	17	80	81
18	111	0	0	0
19	18	19	78	79
20	112	113	0	0
21	20	21	76	77
22	114	115	0	0
23	22	23	74	75
24	116	0	0	0
25	24	25	72	73
26	117	0	0	0
27	26	27	70	71
28	118	0	0	0
29	28	29	68	69
30	119	120	0	0
31	30	31	66	67
32	121	122	0	0
33	32	33	64	65
34	123	0	0	0
35	34	35	62	63
36	124	0	0	0
37	36	37	60	61
38	125	126	127	128
39	38	39	58	59
40	129	0	0	0
41	40	41	56	57
42	130	0	0	0
43	42	43	54	55
44	131	132	0	0
45	44	45	0	0
46	134	135	0	0
47	46	47	0	0
48	136	0	0	0
49	48	49	0	0
50	52	53	137	138
51	48	0	0	0
52	139	140	0	0
53	49	50	0	0
54	143	0	0	0
55	51	0	0	0
56	141	142	144	145
57	50	0	0	0
58	51	52	0	0

INITIALIZACAO

FASE ESTADO

1	1
2	1
3	1
4	0
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	0
11	1
12	1
13	1
14	0
15	1
16	0
17	1
18	1
19	1
20	0
21	1
22	0
23	1
24	1
25	1
26	1
27	1
28	1
29	1
30	0
31	1
32	0
33	1
34	1
35	1
36	1
37	1
38	0
39	1
40	0
41	1
42	0
43	1
44	0
45	1
46	1
47	1
48	1
49	1
50	0
51	1
52	1
53	1
54	1
55	1
56	1
57	1
58	1

CRUZAMENTO	INDICE	INPMF
1	1	30000
2	1	12
3	1	30000
4	1	30000
5	1	13
6	1	30000
7	1	21
8	1	22
9	1	30000
10	1	23
11	1	17
12	1	30000
13	1	30000
14	1	30000
15	1	17
16	1	15
17	1	30000
18	1	30000
19	1	21
20	1	21
21	1	21
22	1	22
23	1	30000
24	1	30000
25	1	7
26	1	30000
27	1	30000
28	1	30000
29	1	30000

DADOS DOS ONIBUS

PERCURSO DE: IDA - ENTRADA 1

SEGMENTO	DIRECAO NO FINAL DO SEGMENTO	TEM PARADA	PASSAGEIROS POR HORA
1	1	1	104,0
2	0	0	0,0
3	1	1	42,0
4	1	1	36,0
5	-1	0	0,0
6	0	1	40,0
7	0	1	15,0
8	0	1	25,0
9	0	1	25,0
10	0	1	60,0
11	0	1	79,0
12	0	1	79,0
13	0	1	66,0
14	0	1	50,0
15	0	1	25,0
16	0	1	25,0
17	0	1	5,0
18	0	1	15,0
19	0	1	3,0
20	0	1	1,0
21	0	1	0,0
22	1	1	0,0
23	-1	0	0,0

DADOS DOS ONIBUS.

PERCURSO DE VOLTA-ENTRADA 2

SEGMENTO	DIRECAO NO FINAL DO SEGMENTO	TEM PARADA	PASSAGEIROS POR HORA
24	-1	1	106,0
25	0	0	0,0
26	1	0	0,0
27	1	1	36,0
28	1	0	0,0
29	0	1	60,0
30	0	1	15,0
31	0	1	30,0
32	0	1	35,0
33	0	1	5,0
34	0	1	60,0
35	0	1	30,0
36	0	1	45,0
37	0	1	66,0
38	0	1	54,0
39	0	1	90,0
40	0	1	50,0
41	0	1	60,0
42	0	1	15,0
43	0	1	5,0
44	0	1	5,0
45	0	1	3,0
46	0	1	1,0
47	-1	1	0,0
48	1	0	0,0

DADOS DOS ONIBUS

ORDEN DE ENTRADA DOS ONIBUS NO PERCURSO 1

1 2 3 4 5 0 0 0 0 0

ORDEN DE ENTRADA DOS ONIBUS NO PERCURSO 2

6 7 8 9 10 0 0 0 0 0

FREQUENCIA TEORICA DE PASSAGEM NO PERCURSO (SEG),IDA	180VOLT	120
CAPACIDADE MAXIMA DOS ONIBUS (PASSAG)	50	
TEMPO DE SUBIDA (SEG/PASSAG)	125	
TEMPO DE DESCIDA (SEG/PASSAG)	0.5	
FATOR DE ACELERAÇÃO E DESACELERAÇÃO (SEG)	1000	

RESULTADOS DA SIMULACAO

SEGMENTO	PASSADAS	FLUXO	PARADAS	ATRASO	ATRASO (VEIC.3/5)	ATRASO C/ PARADAS
1	264	1762	10	19	0.004	0.0018
2	245	1632	193	5377	1.008	1.374
3	257	1712	32	157	0.029	0.0076
4	483	3222	45	192	0.036	0.0071
5	317	2112	265	7237	1.340	1.733
6	385	2572	23	41	0.008	0.0040
7	582	3922	395	4213	0.730	1.365
8	740	4922	443	7831	1.450	2.104
9	929	6192	104	237	0.044	0.198
10	872	5812	578	11721	2.171	3.027
11	1050	7202	982	31170	5.772	7.527
12	1385	8702	306	1062	0.197	0.650
13	1554	10352	455	1265	0.234	0.908
14	1131	7542	158	367	0.068	0.302
15	1347	8982	1282	46831	8.672	10.572
16	1060	7072	950	27554	5.103	6.525
17	1464	9782	510	1513	0.284	1.039
18	1716	11442	638	1823	0.338	1.283
19	1562	10412	1486	53293	9.869	12.071
20	1528	10132	1314	50045	9.260	11.214
21	1560	10402	1351	46480	8.609	10.610
22	1281	8542	923	14658	2.714	4.082
23	273	1822	63	123	0.023	0.116
24	284	1892	10	25	0.005	0.0019
25	171	1142	161	6177	1.144	1.382
26	137	912	13	20	0.004	0.0023
27	260	1732	8	21	0.004	0.0016
28	315	2102	75	115	0.027	0.138
29	788	5252	402	4709	0.872	1.468
30	786	5242	673	11536	2.136	3.133
31	794	5272	614	14765	2.734	3.644
32	981	6542	597	10424	1.930	2.815
33	889	5932	467	11549	2.139	2.831
34	973	6492	172	472	0.087	0.342
35	1103	7352	174	428	0.079	0.337
36	1054	7032	1012	41823	7.715	9.243
37	1345	8972	1297	62196	11.518	13.439
38	1730	11532	709	2716	0.503	1.553
39	1430	9532	300	874	0.125	0.569
40	1552	10352	456	1446	0.268	0.943
41	1252	8352	1251	****	25.614	27.367
42	1392	9282	1213	28467	5.272	7.069
43	1195	7972	216	468	0.087	0.407
44	1438	9592	1074	26323	4.875	6.466
45	1348	8992	977	14905	2.760	4.208
46	1012	6752	229	557	0.103	0.442
47	726	4842	557	6038	1.118	1.943
48	157	1052	15	25	0.005	0.0027
49	268	1792	1	4	0.001	0.0002
50	307	2052	30	43	0.008	0.0052
51	262	1752	139	2301	0.426	0.532
52	330	2202	197	3500	0.648	0.940
53	822	5482	514	8484	1.571	2.333
54	288	1922	14	15	0.003	0.0024
55	132	882	19	31	0.006	0.0034
56	271	1812	38	88	0.016	0.0073
57	259	1732	245	10227	1.894	2.257
58	292	1952	275	11869	2.198	2.605
59	548	3652	447	12303	2.278	2.941
60	778	5132	696	19758	3.659	4.690
61	280	1872	42	74	0.014	0.0076
62	526	3512	488	17127	3.172	3.895
63	305	2032	249	6608	1.224	1.573
64	813	5422	745	20460	3.790	4.894
65	827	5512	738	21543	3.982	5.083
66	237	1712	20	35	0.006	0.0036
67	122	812	4	8	0.001	0.0007
68	225	1502	15	25	0.005	0.0027
69	1335	8702	1183	31280	5.794	7.547
70	1331	8872	1109	23126	4.283	5.926
71	253	1692	16	27	0.005	0.0029
72	129	862	6	11	0.002	0.0011
73	1396	9312	1328	48687	9.016	10.984
74	1293	8622	1184	34334	6.350	8.106
75	640	4272	593	19269	3.560	4.447
76	693	4622	672	37916	7.021	8.817
77	71	472	63	1734	0.321	0.414
78	219	1462	205	7729	1.431	1.735
79	150	1052	6	8	0.001	0.0010
80	256	1712	16	21	0.004	0.0020
81	142	932	11	12	0.002	0.0010
82	1059	7002	880	13515	2.503	3.818
83	321	2012	4	10	0.002	0.0008
84	1094	7292	407	1289	0.202	0.805
85	270	1802	33	71	0.013	0.0062
86	511	3410	5	10	0.002	0.0009

ANEXO II

DIAGRAMAS ESPAÇO - TEMPO DAS POLÍTICAS ESTUDADAS

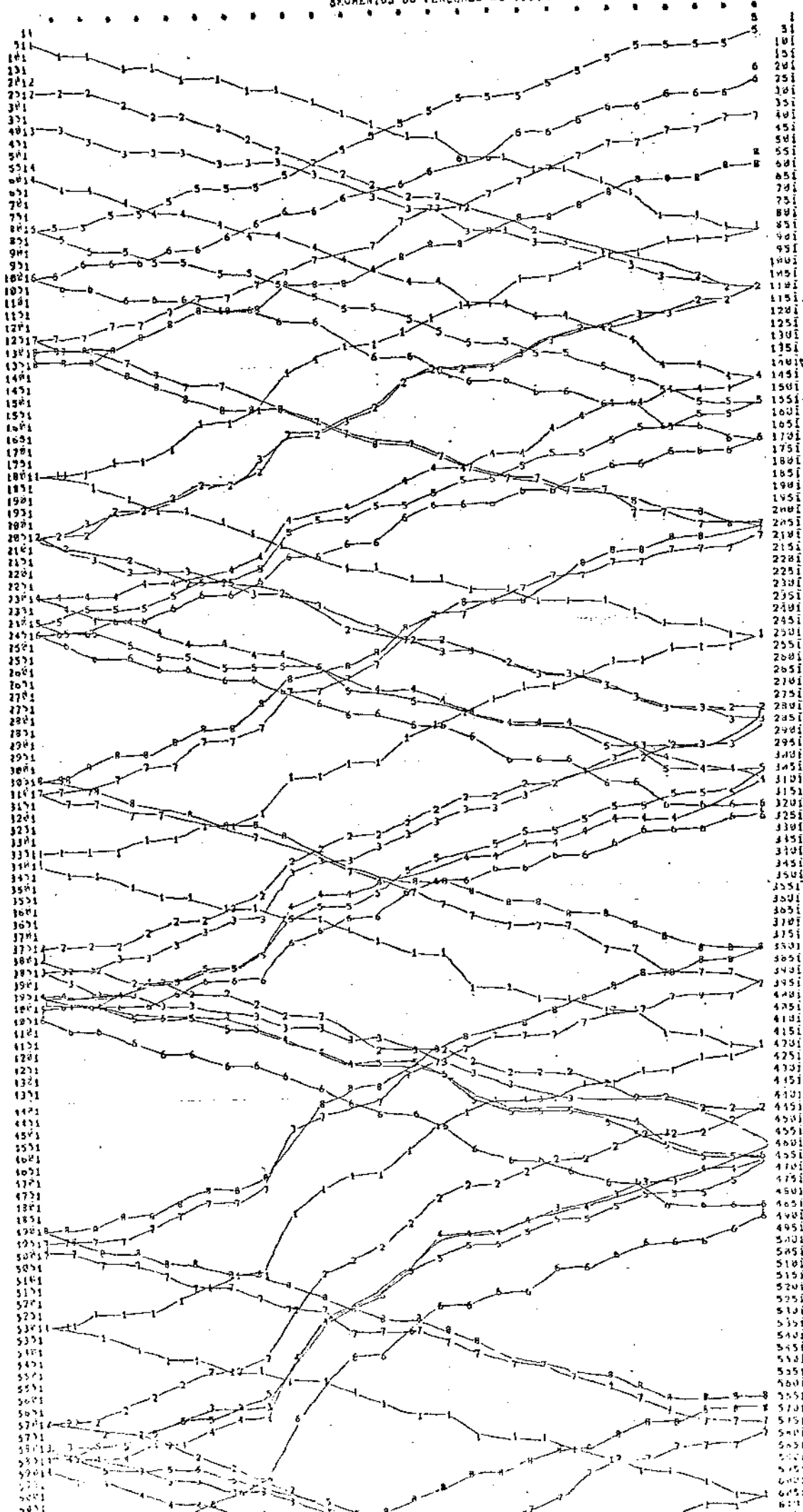
DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DOS ÔNIBUS

C

SEGMENTOS DO PERCURSO DE IDA

SEGMENTOS DO PERCURSO DE VOLTA

-117-



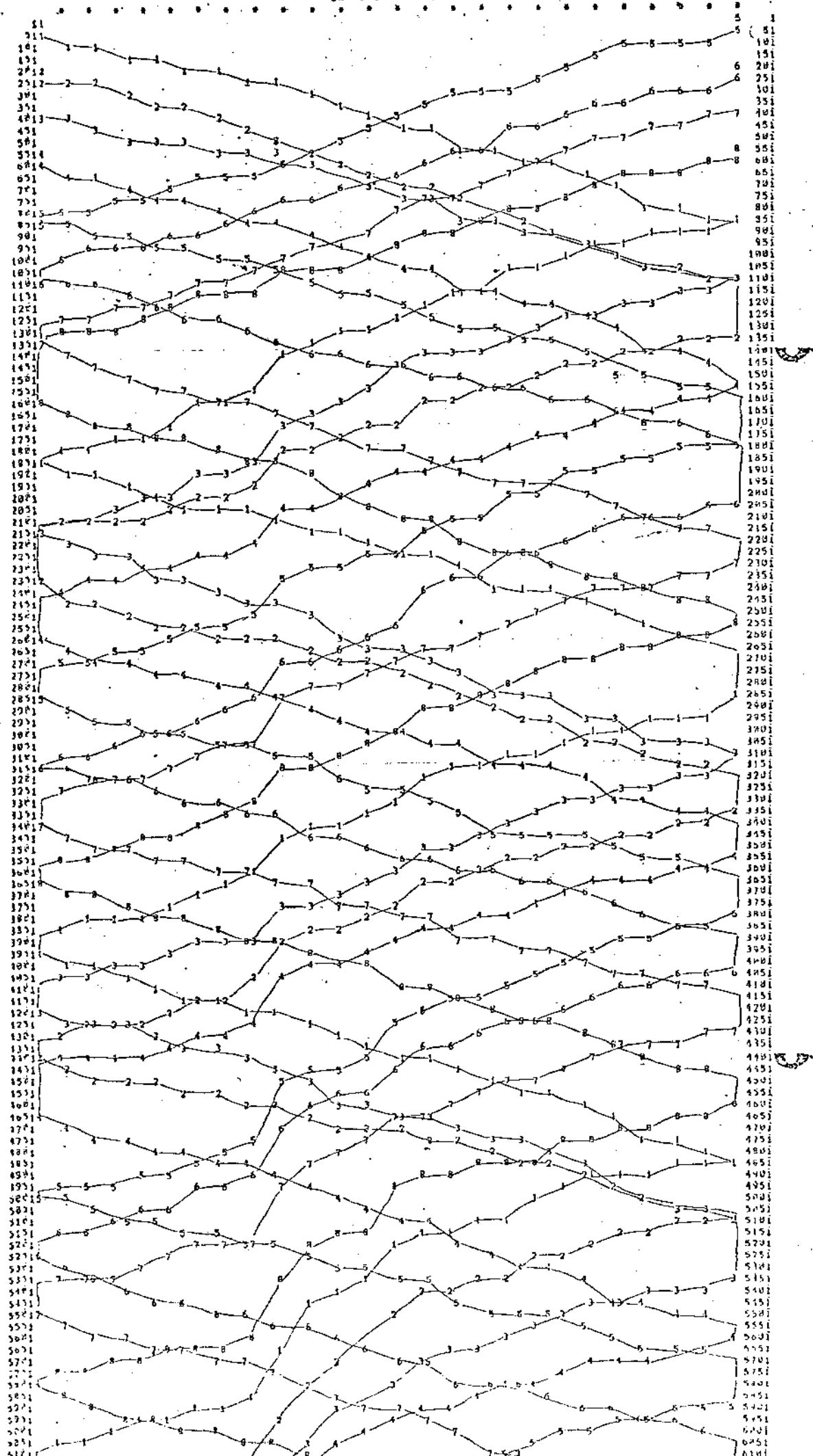
A1 - Diagrama espaço-tempo. Situação de referência-ônibus, intervalo de 3 minutos. Funcionamento normal.

DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DOS ÔNIBUS

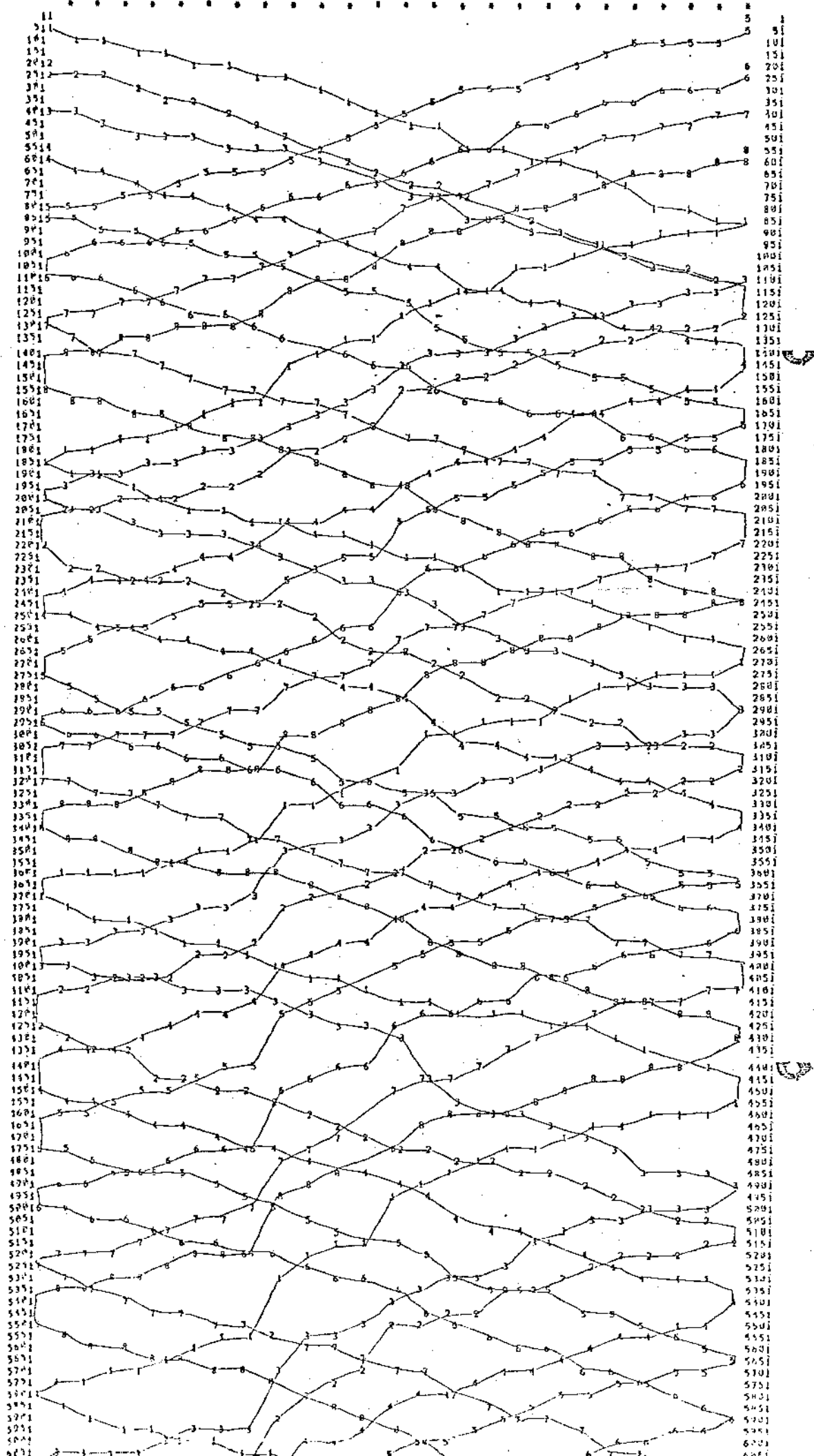
SEGMENTOS DO PERCURSO DE IDA

SEGMENTOS DO PERCURSO DE VOLTA

-118-



A2 - Diagrama espaço-tempo. Regulação Terminal - 8 ônibus. Funcionamento normal.

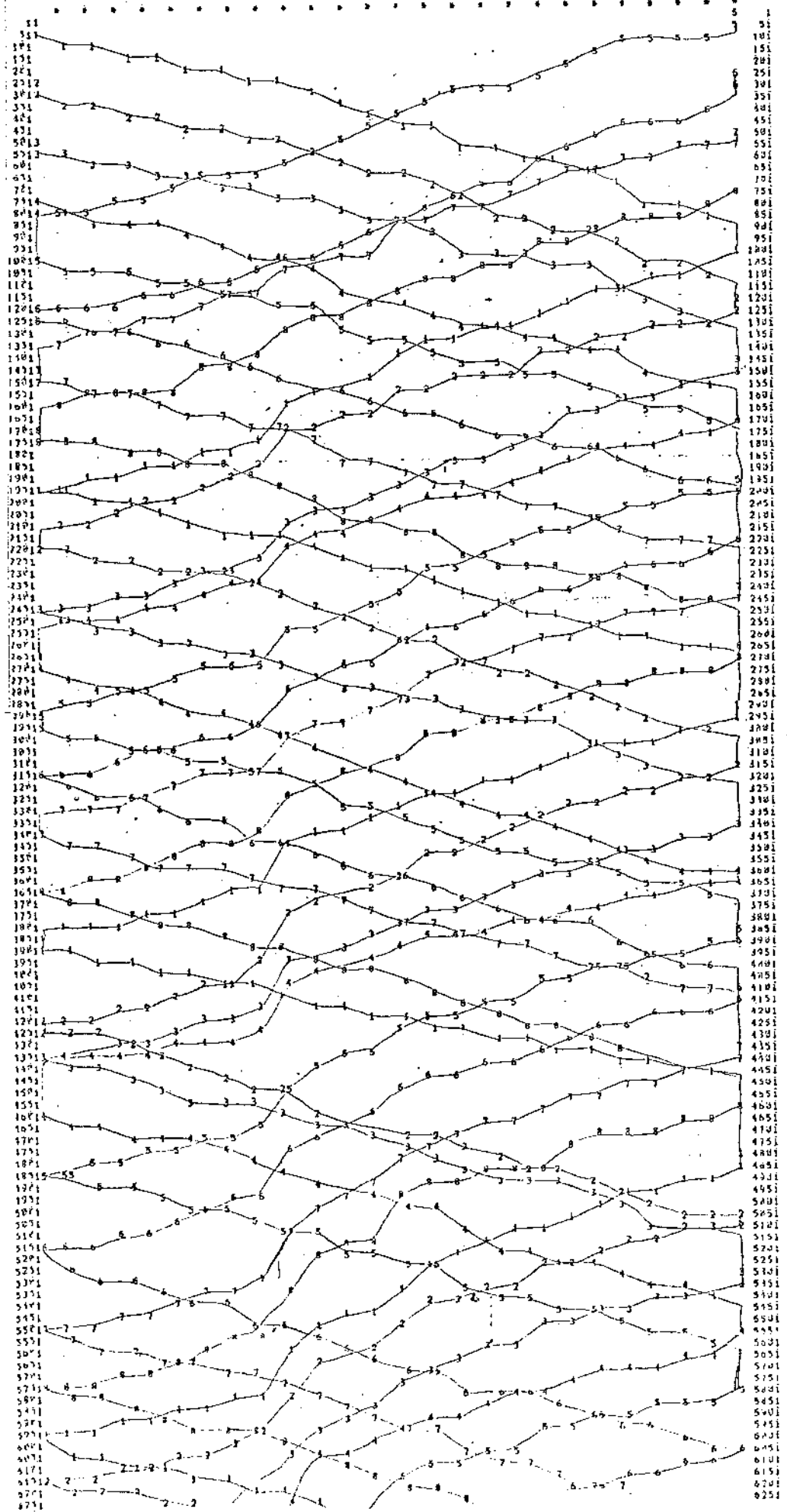


A3 - Diagrama espaço-tempo. Regulação terminal e em duas estações
8 ônibus . Funcionamento normal.

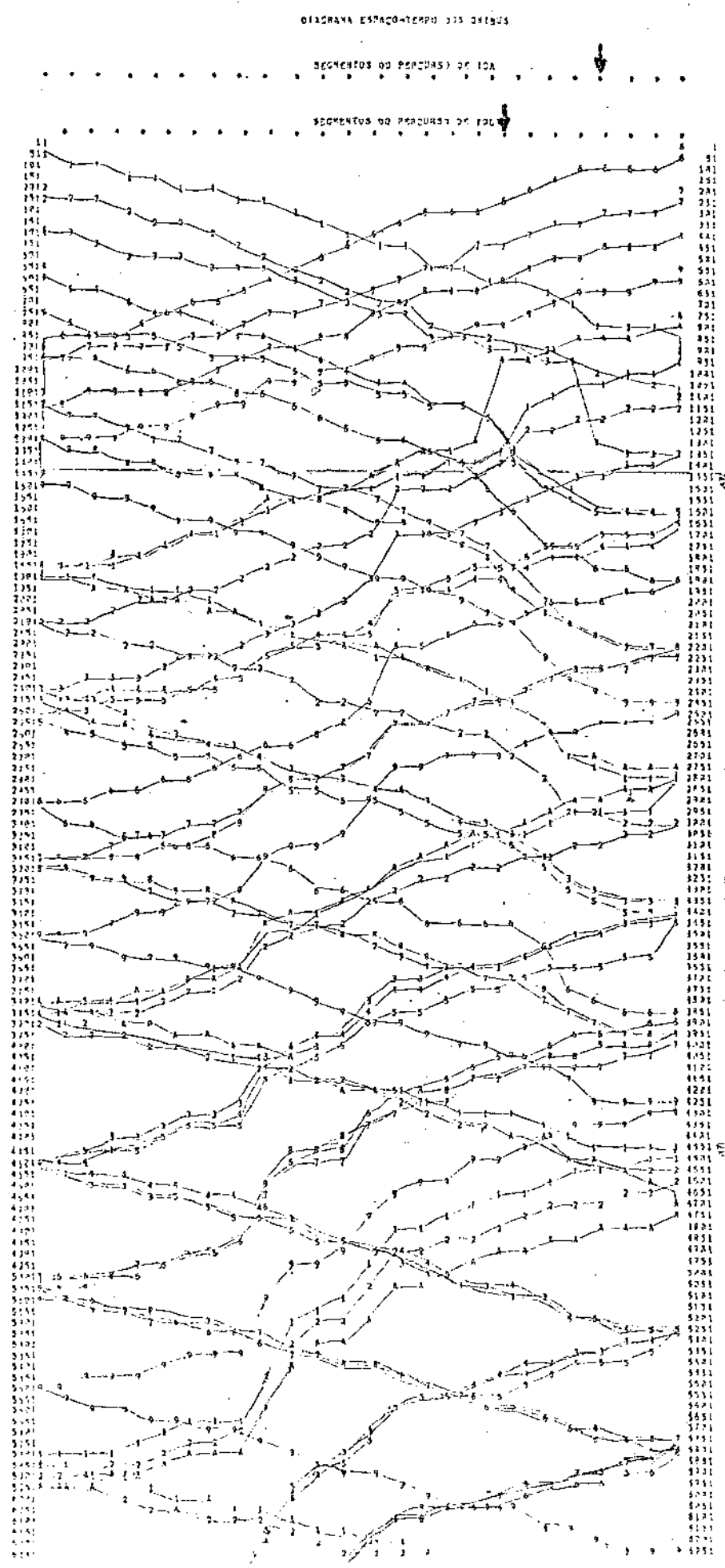
DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DOS ÔNIBUS

SEGMENTOS DO PERCURSO DE IDA

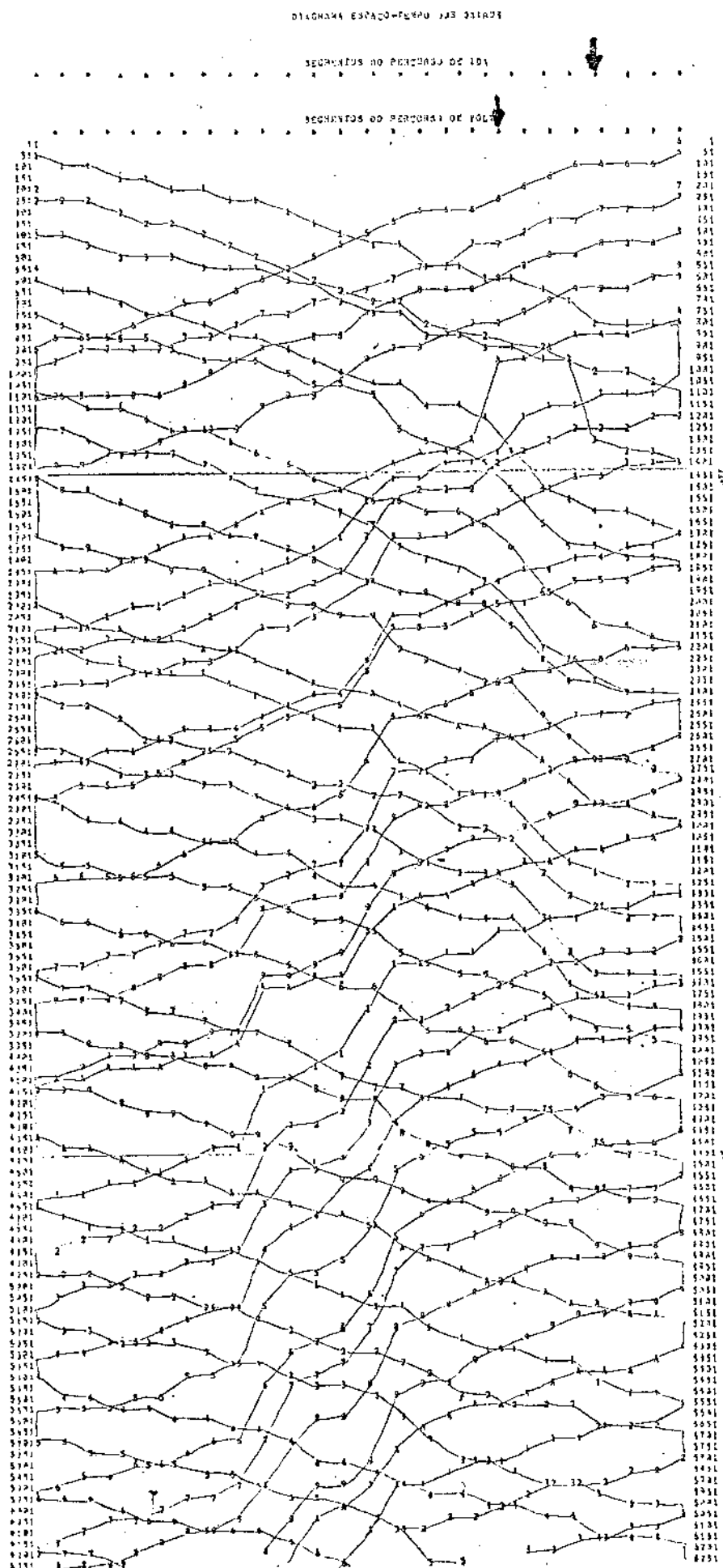
SEGMENTOS DO PERCURSO DE VOLTA



A4 - Diagrama espaço-tempo. Situação de referência - 8 ônibus, intervalo de 4 minutos. Funcionamento normal.



A5 - Diagrama espaço-tempo. Situação de referência - 10 Ônibus, intervalo de 3 minutos. Funcionamento com perturbação no cruzamento 21.



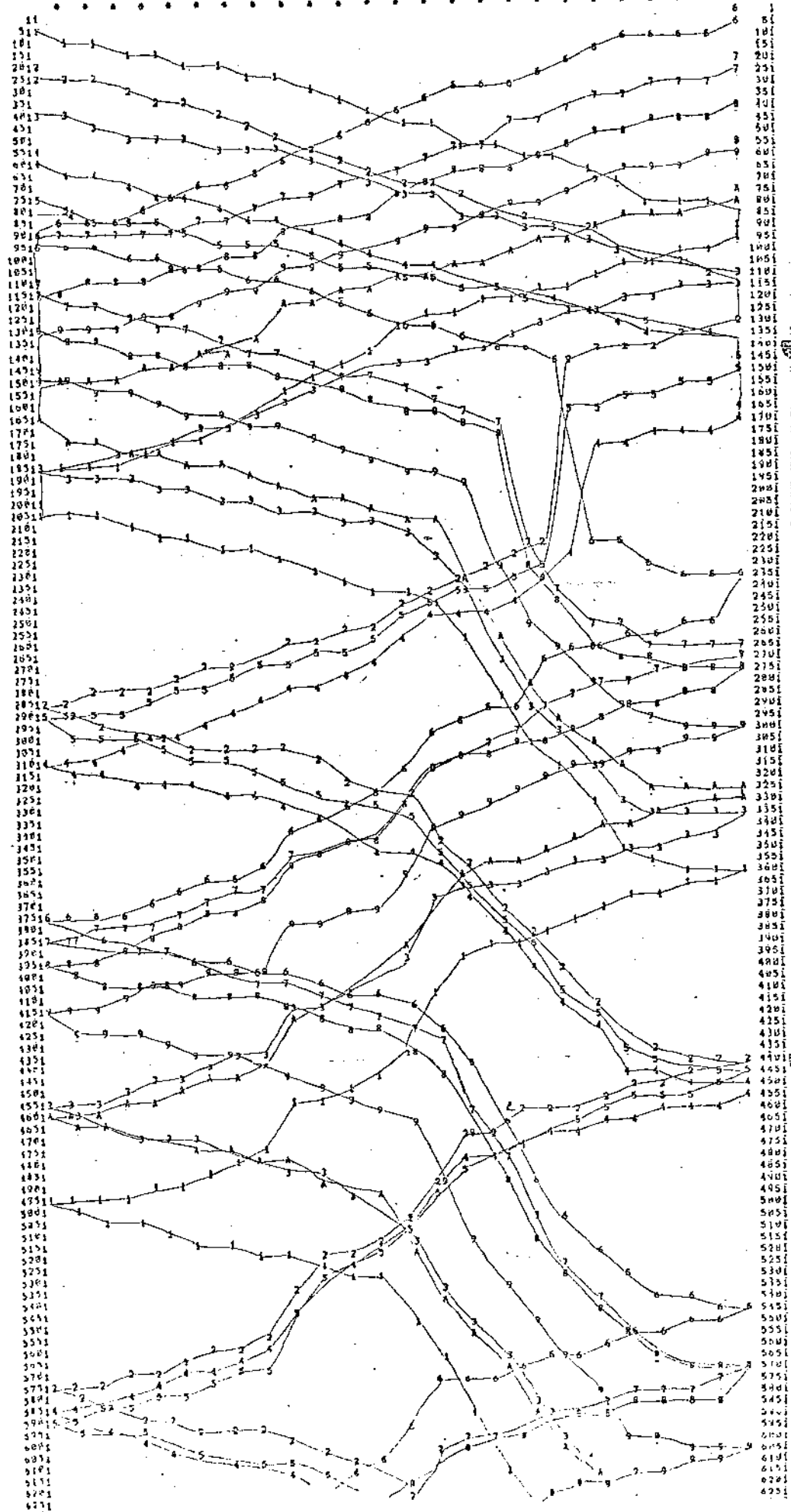
A 6 - Diagrama espaço-tempo. Regulação terminal e em duas estações. 10 Ônibus.
Funcionamento com perturbação no cruzamento 21.

DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DOS ÔNIBUS

-123-

SEGMENTOS DO PERCURSU DE LNA

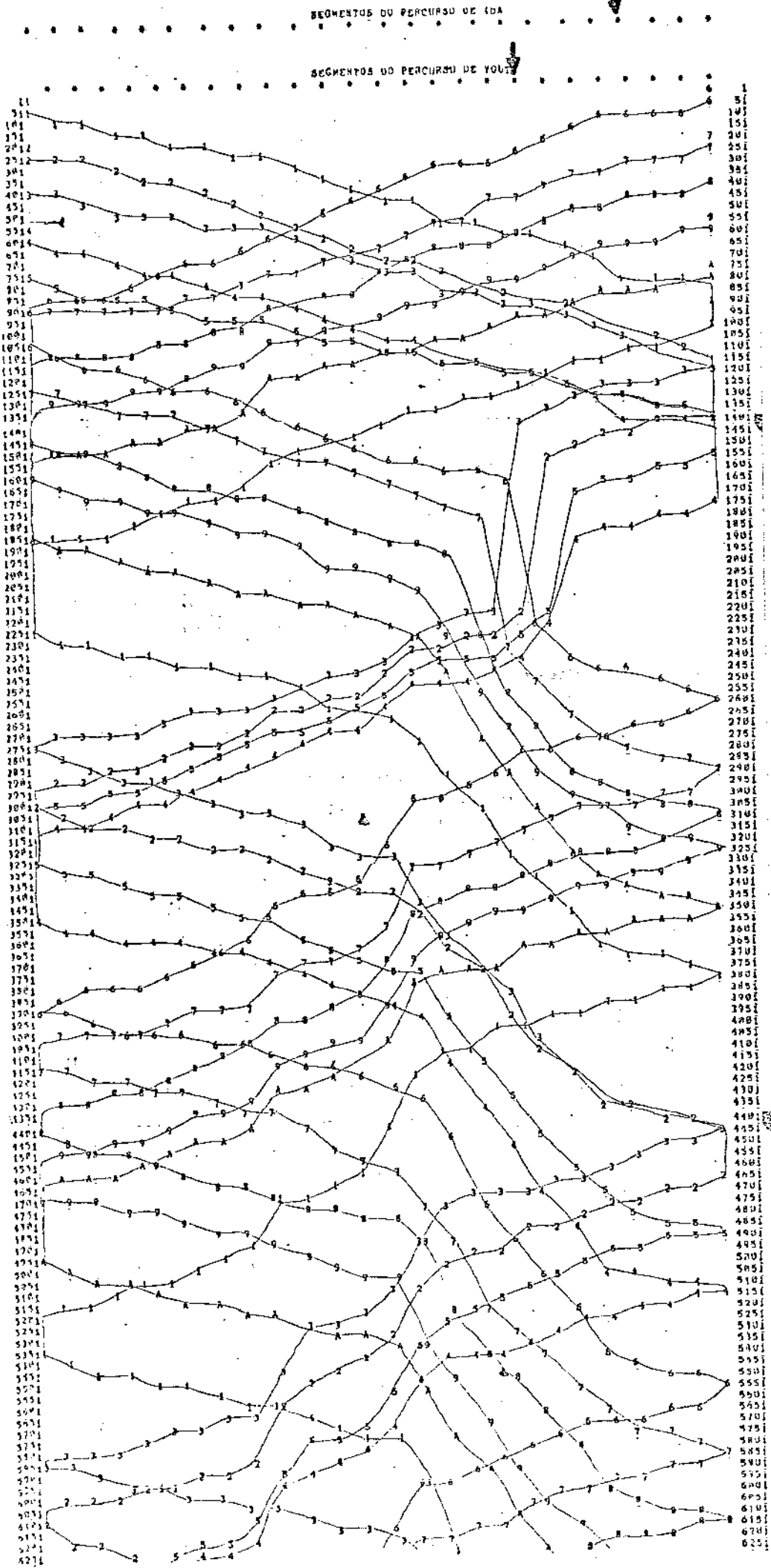
SEGMENTOS DO PERCURSU DE VOLTA



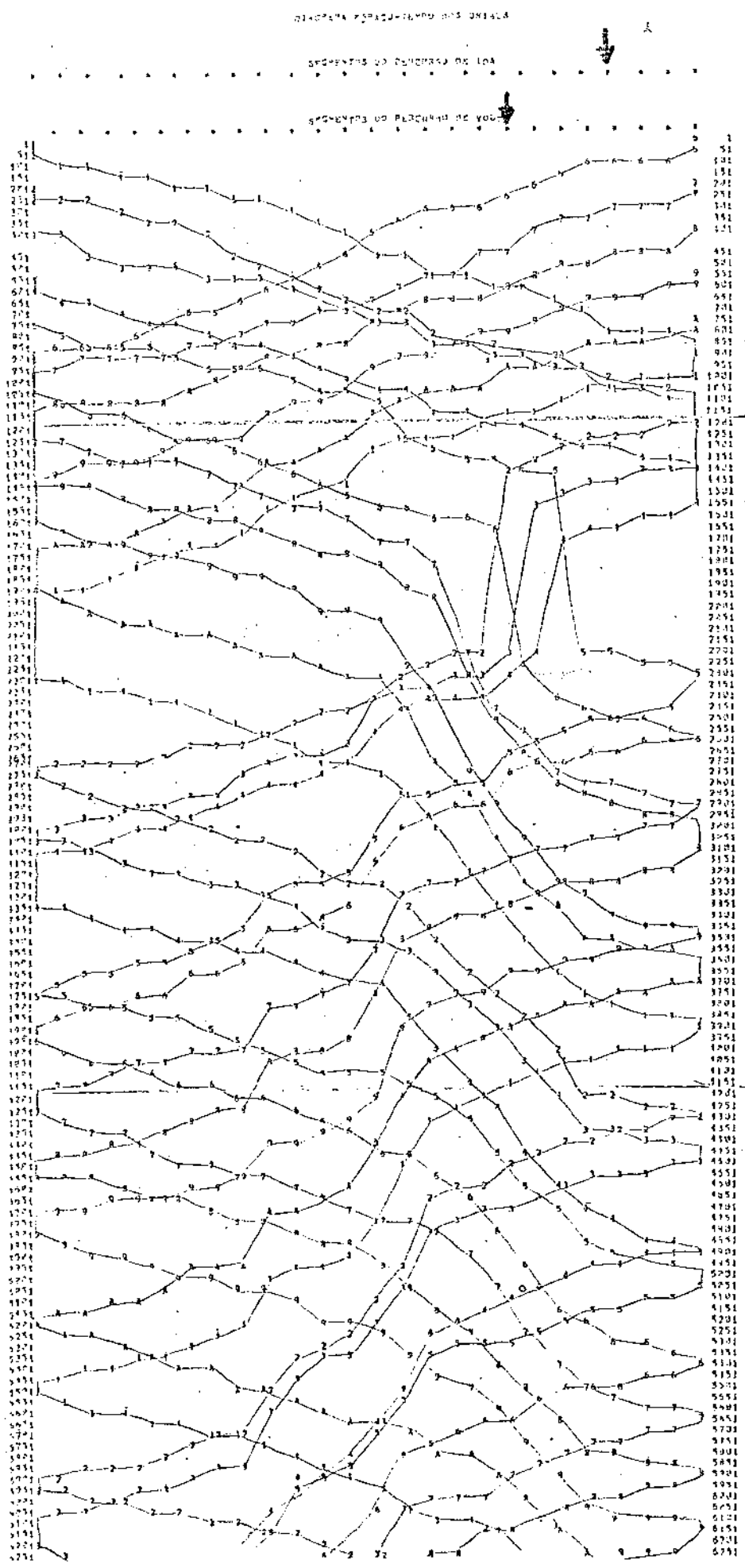
A7 - Diagrama espaço-tempo. Situação de referência - 10 ônibus, intervalo de 3 minutos. Grande perturbação no cruzamento 21.

DIAGRAMA ESPACO-TEMPO DOS ONIBUS

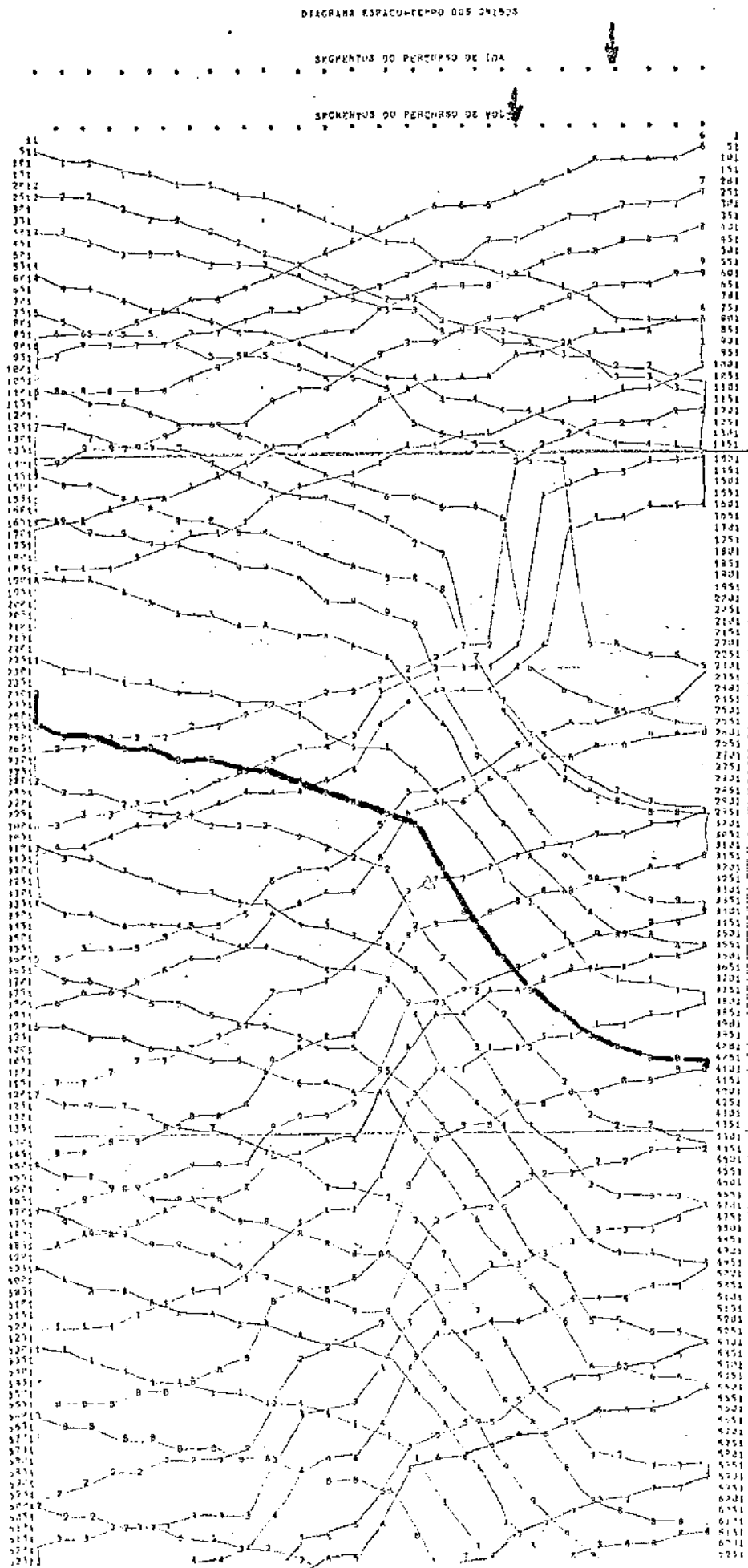
-124-



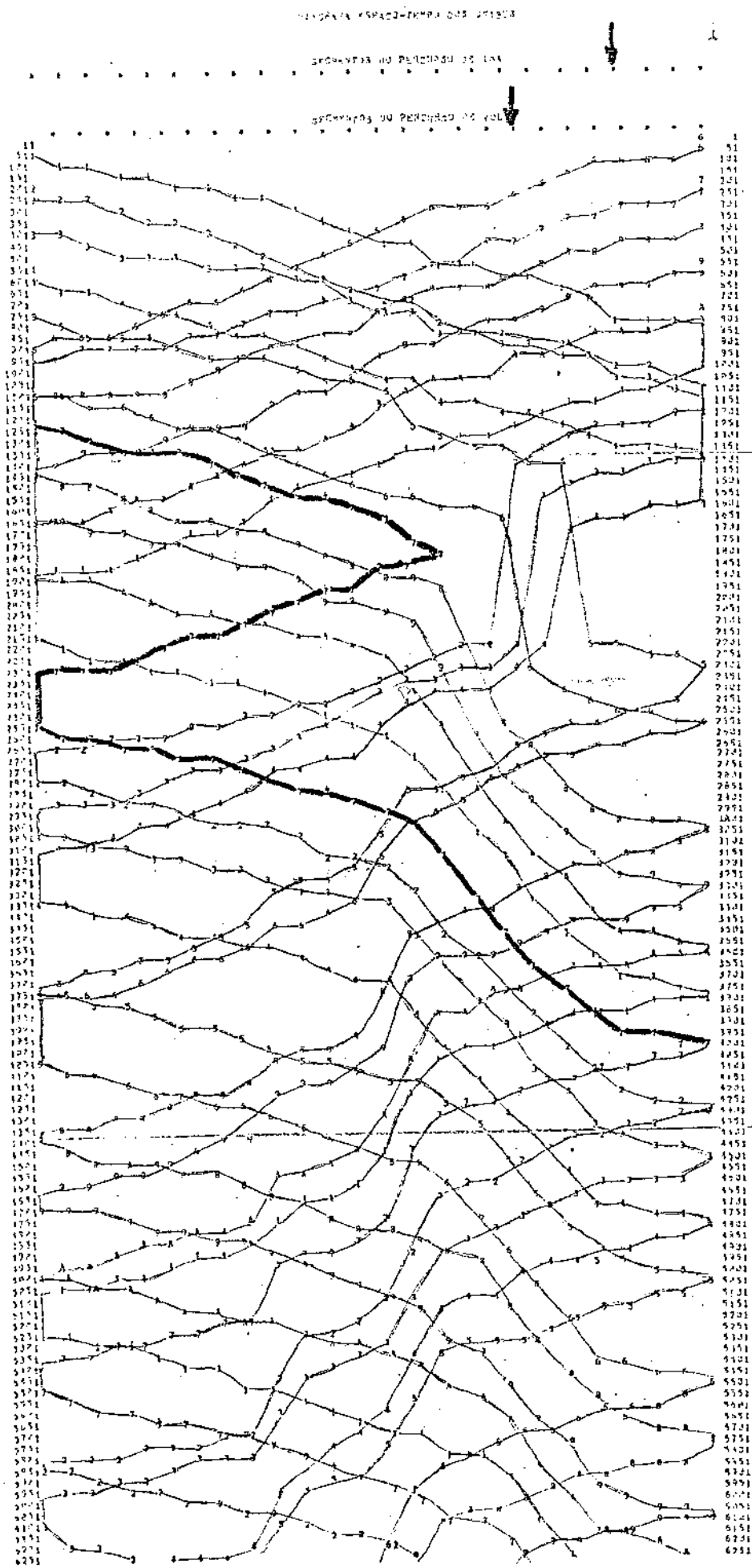
A8 - Diagrama espaço-tempo. Regulação terminal. 10 Ônibus
Grande perturbação no cruzamento 21.



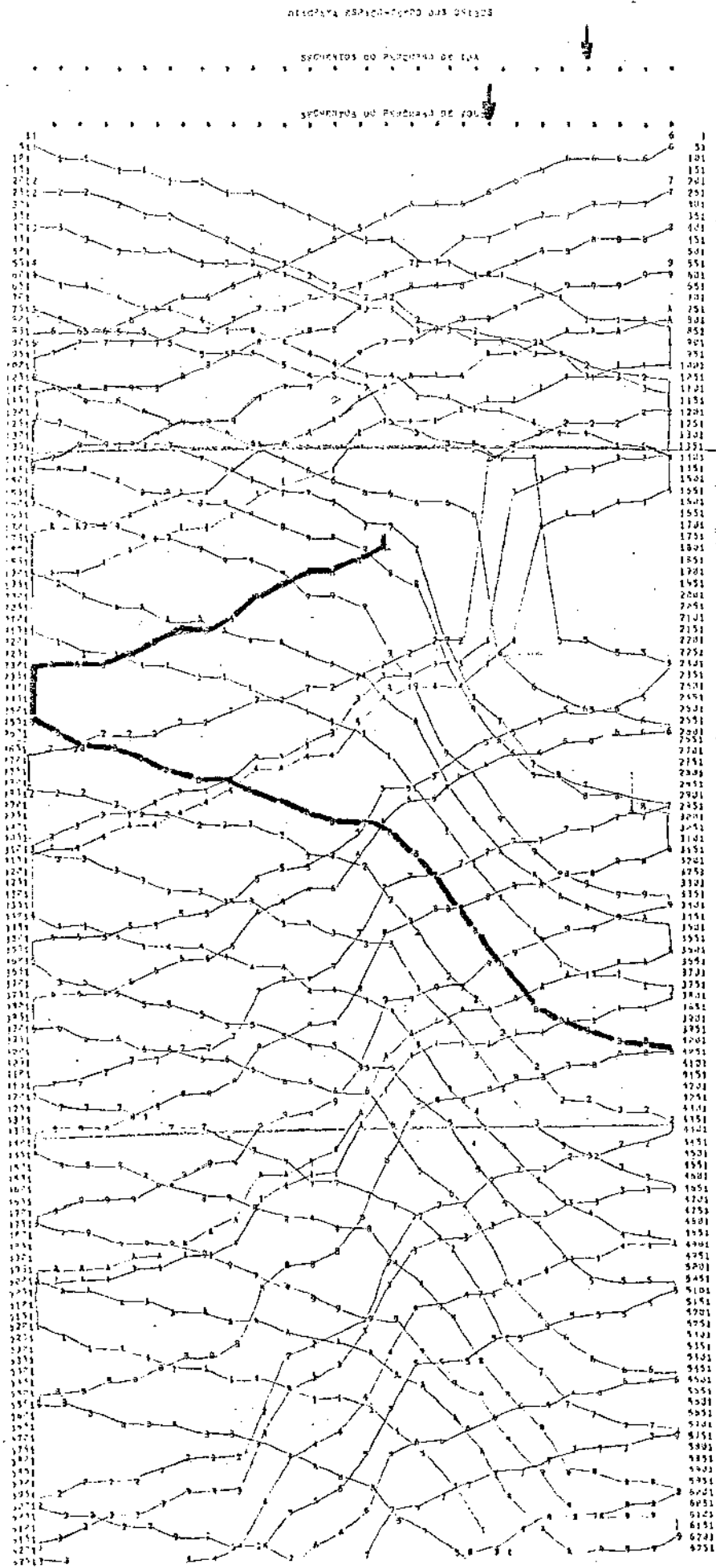
A9 - Diagrama espaço-tempo. Regulação terminal e em duas estações.
10 ônibus. Grande perturbação no cruzamento 21.



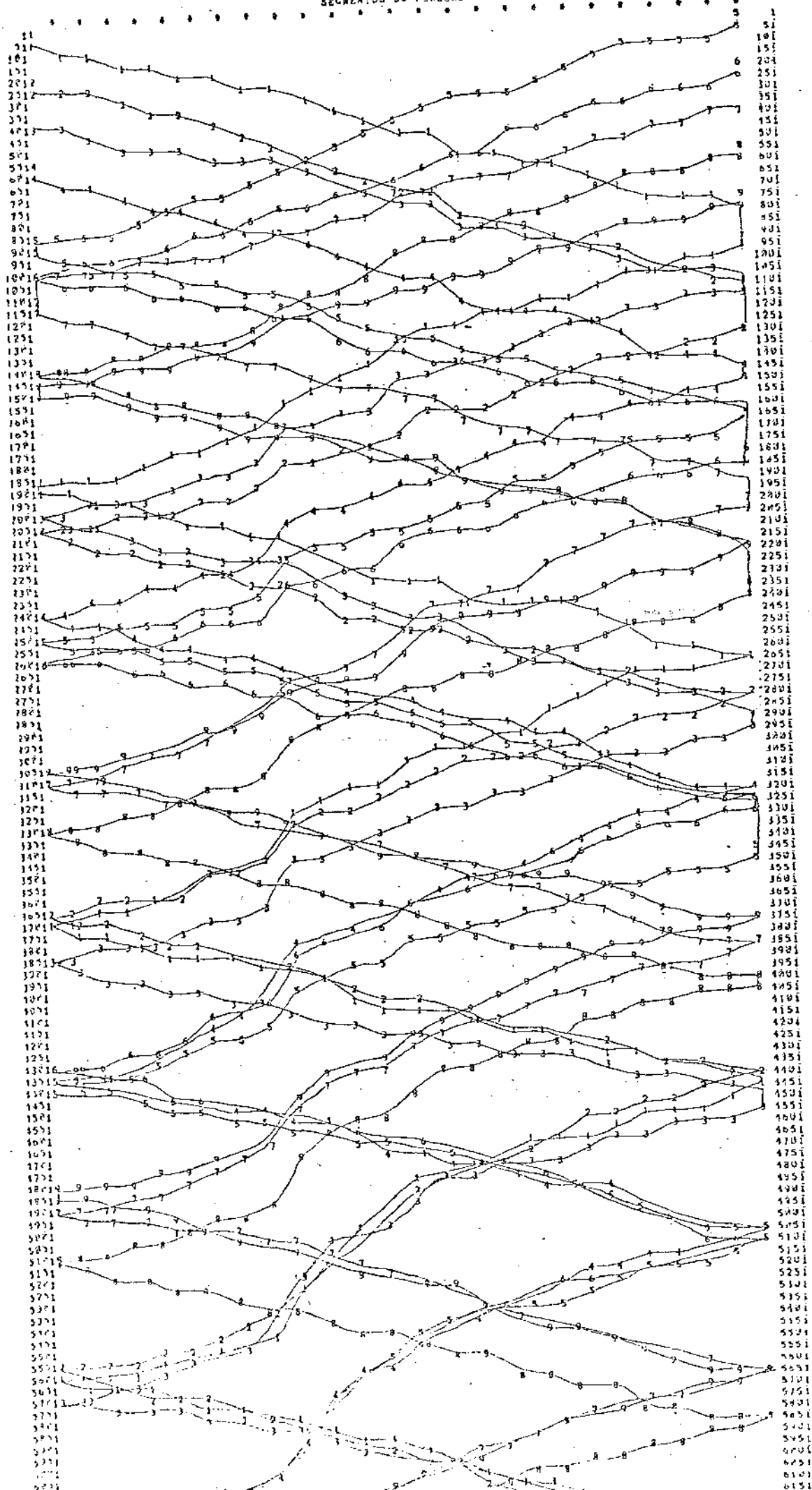
A10 - Diagrama espaço-tempo. Regul. terminal e em duas estações
mais injeção de ônibus reserva após a perturbação.



A11 - Diagrama espaço-tempo. Regul. terminal e em duas estações
mais retorno do ônibus 7.



A12 - Diagrama espaço-tempo. Regul. terminal e em duas estações mais injeção de ônibus reserva durante a perturbação.



A13 - Diagrama espaço-tempo. Situação de referência - 9 ônibus, intervalo de 3 minutos. Funcionamento normal.

BIBLIOGRAFIA

1. CASSY M. e SNITER A.
"Systeme experimental de controle automatique du mouvement des autobus"
2nd Symposium Traffic Control and Transportation Systems, Monte Carlo, Sep. 1974, 163-176.
2. STONE D.
"Systems for the automatic monitoring and control of bus services"
Traffic Engineering and Control, 1970, vol.12, n°12, 410-420.
3. SOARES, SECUNDINO
"Um simulador de tráfego urbano"
Tese de Mestrado, FEC-UNICAMP, Setembro/1974
4. NEWELL G.F. e R.B. POTTS
"Maintaining a bus schedule"
2nd Conf. Aust. Road Research Board, 1964, 388-393
5. FINNAMORE, A.J. e BLY P.H.
"Bus control systems: some evidence on their effectiveness"
2nd Symposium Traffic Control and Transportation Systems, Monte Carlo, Sep. 1974, 147-161
6. ERIKSEN, A.R. et al.
"Effectiveness of alternative downtown area bus distribution systems"
Highway Research Record-HRR 459, 1973, 29-39
7. MUZYKA, A.
"Bus priority strategies and Traffic Simulation"
Transportation Research Board, NRC, Special Report 153, 1975
39-49

8. WOHL AND MARTIN
"Traffic Systems Analysis for Engineers and Planners"
Mc Graw-Hill Book Company, 1967.
9. HUDDART, K.W.
"Bus bunching and regularity of service"
Traffic Engineering and Control, vol.14,nº 12,592-594.
10. LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE ET D'ANALYSE DES SYSTEMES
(L.A.A.S., TOULOUSE)
"Etude des possibilites d'aide électronique aux transports en commun de la ville de Toulouse - Annexe Regulation"
Rapport de contrat DGRST 72.7.0157/Sept.1973.
11. WALKER, W.P. e FLYNT, R.A.
"Mass Transit in the Utilization of City Streets"
Highway Research Board, HRB 167, 1-9, Washington D.C. ,
1957.
12. Highway Capacity Manual, Highway Research Board, Special
Report 87, 1965.
13. MEYER, P.L.
"Probabilidade, Aplicações à Estatística"
Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1974.
14. SAGLIER, F.
"Contribution a l'etude des procédures de regulation automatique de lignes d'autobus"
Thèse de Docteur - Ingénieur, Université Paul Sabatier
Toulouse, Nov. 1975.

15. LABORATOIRE D'AUTOMATIQUE ET D'ANALYSE DES SYSTEMES
(L.A.A.S., TOULOUSE)

"Etude des possibilites d'aide électronique aux transports en commun de la ville de Toulouse - Annexe Enquete"
Rapport de contrat DGRST 72.0157/Sept.1973.

16. NAVLOR, T.H. e outros

"Técnica de Simulação em Computadores"
Editora Vozes Ltda., 1971.

17. GIRAUD, A. e HENRY, J.J.

"On line control of a bus route studies and experiments in Toulouse"

3d. International Symposium on Control in Transportation Systems (IFAC/IFIP/IFORS), Columbus, August, 1976
USA.