

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGE

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ÔNIBUS  
EM CORREDORES EXCLUSIVOS**

Mestrando: Rodrigo Alberto de Castilho

Orientador: Luis Antonio Lindau, Ph.D

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Porto Alegre, janeiro de 1997

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGE

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE ÔNIBUS  
EM CORREDORES EXCLUSIVOS**

Mestrando: Rodrigo Alberto de Castilho

Orientador: Luis Antonio Lindau, Ph.D

Esta dissertação foi julgada pela banca examinadora e considerada adequada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção, com concentração em Transportes.

**Coordenador do Programa:**

Luis Antonio Lindau, Ph.D. \_\_\_\_\_

**Banca examinadora:**

José Reynaldo A. Setti, Ph.D. \_\_\_\_\_

Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D. \_\_\_\_\_

Luis Henrique Rodrigues, Ph.D. \_\_\_\_\_

Porto Alegre, janeiro de 1997

Aos meus pais e irmãos, com carinho.

## **Agradecimentos**

Agradeço ao meu orientador, Prof. Luis Antonio Lindau, por ter dividido comigo parte de seu vasto conhecimento sobre transportes, por seu apoio e amizade.

Aos demais professores do Programa, pelas inúmeras idéias trocadas. Especialmente, aos Profs. Luiz Afonso dos Santos Senna, Helena Beatriz Bettella Cybis e José Luis Duarte Ribeiro.

Agradeço também ao meu irmão, Bernardo, pelas sugestões, revisão do texto e, principalmente, pelo companheirismo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

## Sumário

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de símbolos (usados a partir do Capítulo 3)</b> .....	<b>vii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>viii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Transporte público nos países em desenvolvimento.....	1
1.2. Objetivos e relevância da pesquisa .....	5
1.3. Escopo da pesquisa .....	6
1.4. Estrutura do trabalho.....	6
<b>2. Revisão da literatura</b> .....	<b>8</b>
2.1. Medidas de priorização de ônibus.....	8
2.1.1. Interferência de tráfego .....	9
2.1.2. Paradas .....	11
2.1.3. Semáforos.....	18
2.1.4. Capacidade dos ônibus.....	20
2.2. Estudos empíricos .....	21
2.2.1. Comparações práticas .....	22
2.2.2. Testes em laboratório.....	26
2.3. Estudos de simulação.....	27
2.3.1. SIBULA.....	27
2.3.2. BUSWAY.....	28
2.3.3. IRENE.....	28
2.3.4. BRSM.....	29
2.3.5. Bus-Monitor .....	30
2.3.6. TSM.....	30
2.4. Estudos analíticos.....	31
2.5. Comentários finais .....	34
<b>3. Modelagem conceitual de uma parada</b> .....	<b>36</b>
3.1. Parada com um berço.....	36
3.2. Parada com múltiplos berços .....	40
3.3. Paradas em série.....	43
3.4. Conclusão.....	45
<b>4. Descrição do modelo de simulação</b> .....	<b>47</b>
4.1. Objetivos do modelo de simulação .....	47
4.2. Estrutura do modelo de simulação.....	48
4.3. Entidades do modelo de simulação.....	49
4.3.1. Ônibus .....	50
4.3.2. Passageiros .....	53
4.3.3. Semáforos.....	54
4.3.4. Entidade despachadora.....	54
4.3.5. Reinicializador de estatísticas.....	55
4.4. Principais simplificações do modelo de simulação .....	55
4.5. Parâmetros de calibração e validação .....	57

4.5.1. Calibração .....	57
4.5.2. Validação.....	59
<b>5. Simulação de uma parada.....</b>	<b>61</b>
5.1. Comparação dos modelos conceitual e de simulação.....	61
5.1.1. Parada com um berço.....	62
5.1.2. Parada com múltiplos berços .....	63
5.2. Análise de sensibilidade a efeitos estocásticos.....	65
5.2.1. Efeito da demanda estocástica .....	66
5.2.2. Efeito do desempenho estocástico dos ônibus.....	67
5.2.3. Efeito do tempo de embarque estocástico.....	69
5.2.4. Efeito do tempo perdido estocástico.....	70
5.2.5. Efeito da oferta estocástica .....	71
5.3. Conclusões sobre os experimentos .....	73
<b>6. Simulação de um corredor.....</b>	<b>76</b>
6.1. O experimento de Scheel e Foote .....	77
6.1.1. Modelagem analítica.....	77
6.1.2. Simulação determinística.....	78
6.1.3. Simulação estocástica .....	81
6.2. Simulação de um corredor hipotético.....	84
6.2.1. Cenário 1 .....	85
6.2.2. Cenário 2.....	86
6.2.3. Cenário 3 .....	86
6.2.4. Resultados simulados.....	88
6.3. Conclusões sobre os experimentos .....	90
<b>7. Conclusão .....</b>	<b>92</b>
7.1. Resumo das principais conclusões.....	92
7.2. Avaliação das técnicas usadas.....	94
7.3. Sugestões para pesquisas futuras .....	94
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>96</b>
<b>Anexo: Listagem do programa de simulação .....</b>	<b>100</b>

### Lista de símbolos (usados a partir do Capítulo 3)

$udt$	unidade de tempo;
$udd$	unidade de distância;
$\lambda_i$	demanda de passageiros na parada $i$ (pas/udt);
$\lambda_{i, cap}$	demanda máxima que pode ser atendida na parada $i$ para um dado nível de serviço arbitrário e sustentável ao longo do tempo (pas/udt);
$\Lambda$	demanda global no corredor de ônibus. $\Lambda = \sum \lambda_i$ (pas/udt);
$\Lambda_{cap}$	demanda máxima que pode ser atendida em um corredor para um dado nível de serviço arbitrário e sustentável no tempo. $\Lambda_{cap} = \sum \lambda_i$ , com $\lambda_i = \lambda_{i, cap}$ para algum $i$ (pas/udt);
$\phi_i$	fluxo de ônibus através da parada $i$ (ônibus/udt);
$\phi_{i, cap}$	fluxo máximo de ônibus através da parada $i$ (ônibus/udt);
$\Phi_{cap}$	fluxo máximo de ônibus através do corredor. $\Phi_{cap} = \min \{ \phi_{i, cap} \}$ (ônibus/udt);
$k_i$	número de passageiros que embarca em cada ônibus na parada $i$ . $k_i = \lambda_i / \phi_i$ para $\lambda_i < \lambda_{i, cap}$ (pas/ônibus);
$K$	ocupação dos ônibus no trecho mais carregado. $K = \sum k_i$ , para $\Lambda < \Lambda_{cap}$ (pas/ônibus);
$V_{des}$	velocidade desejada dos ônibus no modelo de progressão (udd/udt);
$A_{máx}$	aceleração máxima dos ônibus no modelo de progressão (udd/udt <sup>2</sup> );
$D_{máx}$	desaceleração máxima dos ônibus no modelo de progressão (udd/udt <sup>2</sup> );
$\mu$	taxa de embarque dos passageiros no ônibus (udt/pas);
$H$	headway entre ônibus (udt);
$t_e$	tempo de embarque (udt);
$t_p$	tempo perdido na parada (udt);
$t_w$	intervalo de tempo para a renovação de ônibus (comboios) na parada (udt);
$t_{w, min}$	intervalo de tempo mínimo para a renovação de ônibus (comboios) na parada (udt);
$n$	número de berços da parada (número de ônibus que compõe um comboio)

## **Resumo**

O crescimento rápido da demanda por transporte público urbano nas grandes cidades dos países em desenvolvimento, aliado ao esgotamento (ou quase esgotamento) da capacidade das redes, às preocupações ambientais e às restrições orçamentárias que impedem a implantação de sistemas sofisticados de transporte de massa têm constituído um enorme desafio aos planejadores de transporte urbano.

A experiência de alguns países em desenvolvimento, em particular do Brasil, com ônibus operando com direito exclusivo de circulação tem possibilitado fluxos de passageiros bastante altos em alguns corredores, comparáveis aos de sistemas sobre trilhos, a custos significativamente menores.

O objetivo deste trabalho é demonstrar as relações básicas entre as principais características físicas, operacionais e de demanda em um corredor exclusivo de ônibus e suas características de desempenho. Para tanto, desenvolve-se primeiramente um modelo conceitual simples do funcionamento de uma parada isolada do corredor, que captura a essência destas relações e que pode ser estendido para representar um sistema de paradas em série.

A seguir, apresenta-se um modelo de simulação que tem como função permitir uma análise mais realista do sistema, levando em conta os efeitos estocásticos inerentes aos sistemas reais, e sob um grande número de configurações físicas, operacionais e de demanda. O modelo de simulação é inicialmente validado contra o modelo conceitual, e então usado na análise de capacidade e nível de serviço de uma parada isolada do sistema e de um corredor hipotético. Sugerem-se modificações de projeto no corredor estudado para incrementar sua capacidade.

Finalmente, o trabalho encerra resumindo as principais conclusões, avaliando as técnicas usadas na pesquisa, e sugerindo tópicos para pesquisas futuras na área.

## **Abstract**

The rapid growth of demand for urban public transportation in developing countries, associated with traffic congestion, environmental concerns and severe budget constraints has faced decision makers with a great challenge: to provide cheap, efficient and good quality transit systems.

The experience of some developing countries, particularly Brazil, has shown that buses operating on their own dedicated lane (or busway) can achieve passenger flows similar to those of more sophisticated systems, such as LRT and metros, at significantly lower costs. The correct understanding of the mechanisms of such schemes is therefore essential, to improve the performance of existing systems and to design future ones.

The main objective of this study is to demonstrate the basic relationships amongst the main physical, operational and demand parameters of a busway and its main performance parameters. To achieve that, a simple conceptual model of the functioning of a single bus stop is presented, which can readily be extended to a series of bus stops.

A simulation model which allows the representation of rather complex configurations of the system is then described. It is firstly compared to the conceptual model and then used to access the system's sensibility to various stochastic parameters. A hypothetical system is also analyzed and its design modified in order to achieve better performance.

The study concludes by summarizing the main findings, evaluating the techniques used in the research and suggesting topics for further research.

## **1. Introdução**

Este capítulo introduz o assunto da pesquisa, a análise e simulação da operação de ônibus em corredores exclusivos. A Seção 1.1 apresenta um breve diagnóstico do transporte público urbano nos países em desenvolvimento, ressaltando o crescimento rápido da demanda, a participação expressiva dos ônibus no mercado de transporte urbano e a dificuldade de implantação de sistemas mais sofisticados. A Seção 1.2 apresenta os objetivos e a relevância da pesquisa. A Seção 1.3 apresenta o escopo e as técnicas usadas na pesquisa. Finalmente, a Seção 1.4 apresenta a estrutura da pesquisa.

### **1.1. Transporte público nos países em desenvolvimento**

Ao longo das últimas décadas, a demanda por transporte público urbano tem crescido rapidamente nos países em desenvolvimento. Dentre as causas deste fenômeno, a literatura cita como principais:

- O crescimento demográfico acentuado, que representa mais usuários potenciais de sistemas de transporte;
- Expansão rápida e desorganizada das fronteiras urbanas das grandes cidades, que significa viagens mais longas e portanto maior dependência das populações em relação aos sistemas de transporte motorizados (mais confortáveis e mais rápidos que a opção “a pé”);
- Intensificação das atividades econômicas, que significa populações com maior poder aquisitivo, e portanto mais aptas a usarem algum sistema de transporte mecanizado.

Na maioria das grandes cidades dos países em desenvolvimento, a população mais pobre mora nas periferias e depende de algum sistema de transporte para chegar aos centros geradores de empregos. Essa tendência implica o surgimento de corredores de transporte urbano bem definidos e com demandas muito concentradas.

Nesses corredores, o modo de transporte predominante é o ônibus, principalmente devido a seu baixo custo de implantação e alta flexibilidade. A Tabela 1.1 mostra estimativas do Banco Mundial sobre a participação dos principais modos no

transporte urbano motorizado nos países em desenvolvimento (Armstrong-Wright, 1993):

<b>Modo de Transporte</b>	<b>Participação (viagens)</b>
Ônibus e micro-ônibus	50 a 70 %
Paratrânsito	5 a 20 %
VLT e Metrô	10 a 20 %
Automóvel privado e táxi	15 a 30 %

*Tabela 1.1 - Transporte urbano motorizado nos países em desenvolvimento*

Além disso, a expectativa do Banco Mundial é de que as 600 milhões de viagens diárias no mundo usando ônibus irão dobrar até o ano 2000 (UNCHS, 1993).

Contudo, a forma tradicional com que os ônibus operam, isto é, dividindo o espaço viário com outros tipos de veículos, resulta em uma capacidade de transporte bastante limitada. Quando um sistema qualquer é submetido a uma demanda maior que sua capacidade, o nível de serviço ofertado se deteriora: crescem os tempos de viagem, os tempos de espera, as filas de passageiros nas paradas e a lotação dos veículos. Além disso, crescem também os custos operacionais, a emissão de poluentes e a segurança do sistema diminui.

A opção tradicional para incrementar a capacidade de corredores de transporte é a implantação de sistemas sobre trilhos, como metrô ou VLT (veículo leve sobre trilhos). Esses sistemas são mais sofisticados que ônibus, mas também apresentam custos de capital muito superiores. A Tabela 1.2 mostra estimativas do custo total do transporte de passageiros para os principais modos, em valores de 1986 segundo Armstrong-Wright (1986). Os custos totais são calculados considerando-se os custos de capital, operação e depreciação de equipamentos e infraestrutura, e níveis típicos de demanda para cada modo.

<b>Modo de transporte</b>	<b>Custo total (US\$/pas-km)</b>
Ônibus em via segregada	0.05 a 0.08
VLT	0.10 a 0.15
Automóvel	0.12 a 0.24
Metrô	0.15 a 0.25

*Tabela 1.2 - Custo total dos principais modos de transporte*

O principal desafio dos nossos planejadores de transporte urbano pode ser traduzido pela pergunta:

*“Como prover um sistema de transporte de passageiros de média a alta capacidade, com boa qualidade e baixo custo?”*

Os tradicionais sistemas sobre trilhos do tipo metrô atendem os requisitos de capacidade e qualidade, mas seus custos são altos. Já sistemas de ônibus, com custos mais baixos, têm se mostrado capazes de atender satisfatoriamente a níveis variados de demanda, desde que propriamente projetados e operados.

Dada a escassez de recursos dos países mais pobres e a já expressiva participação dos ônibus no transporte público destes países, é natural que a priorização dos ônibus tenha se tornado uma prática comum nas últimas décadas. Mesmo nos Estados Unidos e Europa, onde o modo ônibus tem mais claramente o papel de coletor e distribuidor, complementando os modos de transporte de massas sobre trilhos, o interesse por explorar a aplicação dos ônibus é justificado pela possibilidade de oferecer alternativas a sistemas tipo VLT, alcançando benefícios similares em termos de capacidade e velocidade operacional, mas com custos menores e períodos de implantação mais curtos.

Citando o relatório da NATO/CCMS (1976):

*“parece razoável supor que, já que os ônibus normalmente carregam mais passageiros que os automóveis em relação ao uso do espaço viário (muitas vezes congestionado), a eficiência do transporte público como todo seria aumentada priorizando os ônibus sobre os demais veículos”.*

A experiência recente de vários países em desenvolvimento, em particular do Brasil, com ônibus operando em faixas ou corredores exclusivos, tem mostrado ser possível transportar quantidades de passageiros muitas vezes comparáveis a VLTs, e algumas vezes comparáveis a metrôs, a um custo muito mais baixo. A Tabela 1.3 mostra exemplos de fluxos de passageiros observados em alguns corredores exclusivos de ônibus em países em desenvolvimento. Os fluxos dos metrôs do Rio de Janeiro e São Paulo também são apresentados, para fins de comparação (Gardner et al, 1991).

<b>Corredor de ônibus</b>	<b>Local</b>	<b>Fluxos observados (pas/h/sentido)</b>
Besevler-Dikimevi	Ankara, Turquia	7.300
Eixo Sul	Curitiba, Brasil	9.900
Taksim-Zincirlikuyu	Istambul, Turquia	10.700
Av. Cristiano Machado	Belo Horizonte, Brasil	15.800
Av. Farrapos	Porto Alegre, Brasil	17.500
Blvd. de la Republique	Abidjan, Costa do Marfim	19.500
Av. 9 de Julho	São Paulo, Brasil	20.300
Av. Assis Brasil	Porto Alegre, Brasil	26.100
<b>Metrô</b>	<b>Local</b>	<b>Fluxos observados (pas/h/sentido)</b>
Metrô do Rio de Janeiro	Rio de Janeiro, Brasil	21.000
Metrô de São Paulo	São Paulo, Brasil	56.000

**Tabela 1.3 - Fluxos observados de passageiros**

A provisão de direito exclusivo de circulação para ônibus tem duas vantagens claras:

- a redução do atrito de tráfego, gerado pelas interações entre os ônibus e os demais veículos;
- a facilidade de implantação de medidas complementares de operação que visam a reduzir os atrasos em interseções e paradas.

Neste sentido, White (1986) salienta que:

*"Grande parte dos aspectos técnicos relacionados à operação de ônibus diz respeito aos veículos em si. Mas também grandes melhorias podem ser alcançadas enfocando o problema de forma sistêmica. Investimentos fixos no controle, sistemas de informação e faixas reservadas à operação de ônibus podem render muitos dos benefícios normalmente associados aos sistemas sobre trilhos".*

Segundo Nelson e Hills (1990):

*"... a chave para a maior eficiência da operação de ônibus parece residir na maior coordenação entre ônibus e passageiros. Isso implicaria maior controle sobre os ônibus que entram no corredor e a progressão deles ao longo da via, e maior informação por parte dos passageiros de onde aguardar um determinado ônibus que atenda a seus destinos".*

## 1.2. Objetivos e relevância da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é identificar as relações básicas entre as principais características físicas, operacionais e de demanda em um corredor exclusivo de ônibus e suas características de desempenho. Conhecidas estas relações, podem-se compreender as razões do mau funcionamento de um determinado sistema e de que forma medidas operacionais complementares podem melhorar as características de desempenho do corredor. As características de desempenho consideradas pertencem a dois grupos distintos, definidos como:

- **Nível de serviço:** compreende indicadores da qualidade do serviço ofertado para o passageiro. Os indicadores mais comuns e que são usados nesta pesquisa são lotação média dos veículos, velocidade operacional média, tempo médio de espera dos passageiros nas paradas e fila média de passageiros nas paradas.
- **Capacidade:** demanda máxima de passageiros que o sistema pode absorver, para um dado nível de serviço arbitrário, sem que o sistema entre em um processo de deterioração.

Normalmente existe um “trade-off” entre o nível de serviço e a capacidade ofertada por um certo sistema. Ou seja, os corredores mais carregados, que absorvem maiores demandas são também os que apresentam maiores problemas de velocidade operacional, tempos de espera de passageiros nas paradas e veículos super-lotados. Logo, estabelecer uma relação clara entre as características que definem um corredor e seu desempenho pode levar a uma configuração ideal de operação de um determinado sistema.

Como objetivo secundário, este trabalho procura desenvolver um modelo de simulação que sirva como uma ferramenta de análise prática, que possibilite a comparação de cenários alternativos de um determinado corredor.

A relevância deste tipo de estudo é justificada pela necessidade dos países em desenvolvimento de prover sistemas de transporte público mais eficientes, de boa qualidade e baratos.

### **1.3. Escopo da pesquisa**

O presente trabalho trata principalmente dos aspectos operacionais de corredores de ônibus, isto é, da quantificação e análise da capacidade e nível de serviço do sistema. Não serão abordados explicitamente os aspectos econômicos, de uso do solo, tecnologia dos veículos e de treinamento de pessoal, embora estes sejam também de fundamental importância em qualquer projeto de engenharia.

O desempenho operacional de ônibus em corredores exclusivos depende de uma série de características dos próprios ônibus, da via, das paradas, dos semáforos, da demanda e da política de operação sob a qual estão submetidos. Dada a complexidade do sistema, o presente trabalho usa dois tipos de técnicas de análise:

- *modelos conceituais analíticos*, bastante simplificados mas que permitem identificar e quantificar as principais relações que governam o sistema;
- *simulação em computador* com um nível de complexidade bem maior, que permite uma análise mais realista, embora menos intuitiva, transparente e genérica do que os modelos analíticos.

O uso destas duas ferramentas em conjunto tem a vantagem de proporcionar um bom entendimento do sistema, de permitir a validação de um modelo contra o outro e de preencher, ainda que parcialmente, um vazio existente na literatura com respeito a princípios básicos de projeto e operação deste tipo de sistema.

### **1.4. Estrutura do trabalho**

O trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 contém uma revisão da literatura a respeito da operação de ônibus em corredores exclusivos. O capítulo está dividido conforme o tipo de análise usada nos estudos: estudos empíricos, estudos envolvendo modelagem por simulação e estudos envolvendo modelagem analítica. Esta revisão serve para estabelecer referências de capacidade e nível de serviço de corredores de ônibus sob diversas características operacionais, físicas e de demanda, e para subsidiar o desenvolvimento dos modelos apresentados nos capítulos seguintes.

O Capítulo 3 propõe um modelo analítico conceitual do funcionamento de uma parada de ônibus, com uma série de simplificações. Esse modelo é uma primeira aproximação do funcionamento real de uma parada, e serve para revelar algumas relações básicas envolvidas na operação de um corredor real.

O Capítulo 4 descreve um modelo de simulação que representa o sistema de maneira mais realista. O modelo é capaz de simular com bom nível de detalhe a operação de um corredor de ônibus, sob diversas características de operação e demanda. Sua estrutura é bastante aberta, para permitir no futuro as alterações que se julguem necessárias.

O Capítulo 5 trata da modelagem por simulação de uma parada de ônibus. Os resultados obtidos com o modelo conceitual do Capítulo 3 são comparados aos obtidos com simulação. Também são explorados casos mais realistas, com a presença de parâmetros estocásticos.

O Capítulo 6 apresenta a aplicação do modelo de simulação a um corredor hipotético, baseado em características típicas descritas na literatura. O modelo é usado para testar o corredor sob diferentes cenários, com o objetivo de melhorar seu desempenho. O capítulo encerra resumindo as principais conclusões do experimento.

Finalmente, o Capítulo 7 resume as conclusões da pesquisa, avalia as técnicas usadas na pesquisa e sugere tópicos para estudos futuros.

## **2. Revisão da literatura**

A literatura disponível sobre sistemas de ônibus urbano é bastante farta e abrangente. Especialmente a partir da década de 70, quando diversas medidas de priorização de ônibus passaram a ser empregadas em todo o mundo, uma grande quantidade de trabalhos foram publicados, procurando explorar ao máximo a capacidade e o nível de serviço de sistemas de ônibus.

Este capítulo apresenta alguns dos principais trabalhos, classificados segundo as técnicas de análise usadas. A Seção 2.1 apresenta algumas das principais medidas de priorização de ônibus. A Seção 2.2 apresenta estudos empíricos do desempenho de ônibus sob algumas dessas medidas de priorização. A Seção 2.3 apresenta estudos de simulação. A Seção 2.4 contém estudos analíticos. Finalmente, a Seção 2.5 faz comentários sobre a literatura revisada.

### **2.1. Medidas de priorização de ônibus**

Inicialmente, vale a pena salientar que o termo “medida de priorização” nem sempre é bem empregado na literatura, já que “priorização” pressupõe o favorecimento de um em detrimento de outro. Embora muitas vezes o termo “medida paliativa” seja mais correto, será usado o primeiro para manter a consistência com a literatura.

Quando o tráfego em uma via se aproxima de sua capacidade, uma série de efeitos indesejáveis se manifesta sob a forma de atrasos, baixos níveis de serviço, pouca segurança, altos custos de operação e taxas elevadas de emissão de poluentes.

Na tentativa de minimizar estes efeitos, a aplicação de medidas de priorização do transporte público vem sendo uma prática comum tanto em países em desenvolvimento como nos já desenvolvidos. A origem destas medidas remonta ao início do século, quando, segundo Young (1973 apud Lindau, 1983), faixas reservadas ao uso exclusivo de bondes foram empregadas em uma artéria de Liverpool em 1914, para aumentar a eficiência do sistema e compensar as restrições nos preços de tarifas a que eram submetidas as companhias de transporte público da época.

As medidas de priorização usualmente usadas podem ser resumidas segundo o tipo de limitante de desempenho que procuram atacar, conforme a Tabela 2.1.

<b>Limitantes de desempenho</b>	<b>Medidas de priorização</b>
Interferência de tráfego	Tratamentos localizados Segregação de tráfego
Paradas	Localização adequada Paradas divididas e alternadas Comboios ordenados Cobrança adiantada de tarifa Paradas fora-de-linha
Semáforos	Ajuste do tempo de ciclo semafórico Progressão Detecção
Capacidade dos ônibus	Ônibus articulados

***Tabela 2.1 - Principais limitantes de desempenho e medidas de priorização***

### **2.1.1. Interferência de tráfego**

Em condições de tráfego misto, ônibus e demais veículos interagem, e o atrito resultante impõe restrições à livre movimentação dos mesmos. A consequência é a queda de desempenho do tráfego em geral, e dos ônibus em particular, que carecem da manobrabilidade e aceleração dos veículos menores. A interferência de tráfego pode ser tratada, basicamente, em dois níveis: local e ao longo de um trecho.

#### **Tratamentos localizados**

Tratamentos localizados compreendem, essencialmente, medidas de gerenciamento de tráfego. São geralmente utilizados para dar prioridade aos ônibus em interseções (semaforizadas ou não) e paradas de ônibus.

Prioridade em interseções não semaforizadas pode ser obtida através de mudanças nas regras de circulação, ou alterações simples de infraestrutura, que concedem aos ônibus movimentos exclusivos de conversão (TRL/ODA, 1993). Em interseções semaforizadas, Vuchic (1981) sugere a aplicação de pré-semáforos que, quando adequadamente localizados e programados, permitem aos ônibus ingressar ou deixar uma determinada via em antecipação aos demais veículos. As manobras de conversão de ônibus podem ser facilitadas com o recuo da linha de retenção, conforme EBTU (1982).

As paradas de ônibus também podem ser tratadas com medidas de priorização localizadas. *Baias de ônibus* são espaços recortados no meio-fio que permitem aos ônibus parar fora da corrente de tráfego enquanto os passageiros embarcam e desembarcam. Embora a identificação física das paradas reduza a chance das mesmas serem obstruídas por veículos estacionados irregularmente, o relatório NATO/CCMS (1976) argumenta que o principal benefício deste tipo de medida é a redução nos atrasos do restante do tráfego. Contudo, quando o fluxo de veículos na via principal é significativo, o reingresso dos ônibus na corrente de tráfego torna-se difícil, e o tempo perdido nestas manobras muitas vezes supera os eventuais ganhos de tempo na parada. Por isso, na prática, muitas vezes os motoristas de ônibus tendem a não usá-las.

Para situações em que o fluxo de ônibus passa a ser considerável (a literatura em geral cita valores da ordem de 100 ônibus por hora), as interferências de tráfego tornam-se significativas, e medidas mais abrangentes são necessárias para melhorar o desempenho global dos ônibus.

### **Tratamentos de escopo mais abrangente**

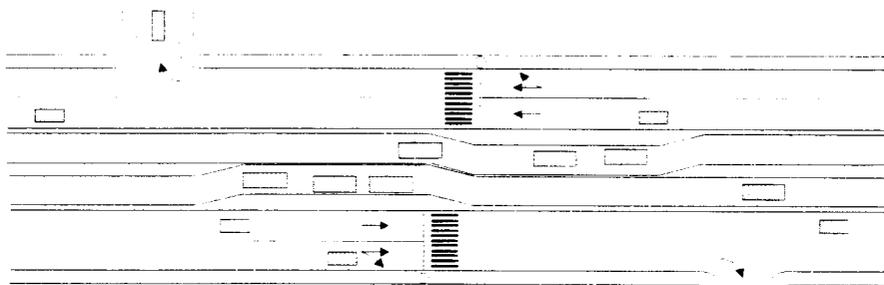
Tratamentos de escopo mais abrangente são baseadas na segregação de tráfego. A segregação pode ser obtida através de simples pintura e sinalização de uma faixa reservada ao uso exclusivo de ônibus, ou da colocação de obstáculos físicos que conferem aos ônibus direito exclusivo de circulação em vias já existentes. Embora menos comum, a literatura cita também a construção de vias especialmente destinadas à operação de ônibus, como as de Runcorn, na Inglaterra (IHT, 1987).

A segregação por pintura e sinalização resulta na criação de *faixas exclusivas de ônibus*, que são classificadas segundo vários critérios, como sentido de fluxo, localização na via, horário de operação e extensão sobre a rota. Lindau (1983) incorpora em seu trabalho análises comparativas dos diversos tipos de faixa exclusiva de ônibus, bem como os principais elementos de seus projetos e critérios de implantação.

A segregação física do tráfego dá origem a *corredores exclusivos de ônibus*, cuja principal vantagem é garantir o direito exclusivo de circulação (principalmente

quando a disciplina dos motoristas é precária) e prover um ambiente de operação que favoreça a aplicação de medidas complementares, como a utilização de comboios ordenados, serviços expressos e semáforos atuados.

A Figura 2.1 apresenta uma representação simplificada de uma seção típica de um corredor exclusivo de ônibus em Porto Alegre.



**Figura 2.1 - Seção típica de um corredor exclusivo de ônibus em Porto Alegre**

### **2.1.2. Paradas**

Grande parte do tempo total das viagens realizadas por ônibus se deve aos tempos gastos nas paradas de ônibus. Segundo Chapman (1975), cerca de um quinto do tempo total de viagens de ônibus é gasto nas paradas. Evidentemente, esta fração varia de local para local, tendendo a ser mais significativa nas situações em que os ônibus desfrutam de condições especiais de circulação (como em faixas ou corredores exclusivos), e menos significativa nas condições de tráfego misto (quando interferências entre veículos, congestionamentos e interseções respondem por maiores parcelas de atraso).

Gardner et al (1991) realizaram um estudo sobre o desempenho de sistemas de ônibus operando em direito exclusivo de circulação em vários países em desenvolvimento, e identificaram as paradas de ônibus como o principal limitante da capacidade e velocidade em grande parte dos sistemas estudados. As medidas que visam ao aumento da eficiência das paradas vão desde a localização adequada das mesmas até políticas especiais de operação de ônibus.

Segundo HCM (1985), geralmente a capacidade de sistemas de transporte público é governada pela parada ou estação crítica, onde um grande número de passageiros

embarcam ou desembarcam, da mesma forma em que a capacidade de uma artéria urbana é governada pelas interseções críticas.

### Localização de paradas

A localização das paradas de ônibus tem dois parâmetros principais: espaçamento entre paradas e posicionamento em relação às interseções.

O problema do espaçamento entre paradas é tipicamente um problema de otimização. White (1986) propõe uma aproximação para o tempo total de viagem de um passageiro, que inclui o tempo de caminhada até a parada e o tempo de viagem dentro do ônibus. O tempo de espera na parada é desconsiderado, por depender da frequência dos ônibus. Baseado em uma série de estudos que sugerem que o custo percebido do tempo de espera e caminhada do passageiro é aproximadamente duas vezes maior que o custo percebido durante viagem no interior do veículo, a aproximação é a seguinte:

$$TT = \frac{2 \cdot T}{F} + \frac{L}{D} \cdot \left( s + b + \frac{D - a}{V} \right), \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde:

$TT$  = tempo total de viagem;

$T$  = distância média de caminhada até a parada ( $0.25 \cdot D$  como aproximação prática);

$F$  = velocidade de caminhada;

$L$  = distância média de viagem dos passageiros no ônibus;

$D$  = espaçamento médio entre paradas;

$s$  = tempo médio gasto na parada;

$a$  = distância percorrida pelo ônibus durante a aceleração e desaceleração entre o repouso, a velocidade de cruzeiro e novamente o repouso;

$b$  = tempo gasto no mesmo processo que  $a$ ;

$V$  = velocidade de cruzeiro do ônibus [m/seg].

Derivando a Equação 2.1 com respeito a  $D$  e igualando a zero, obtém-se o valor de  $D$  para o qual  $TT$  é mínimo:

$$\frac{dT}{dD} = \frac{1}{2 \cdot F} - \frac{L}{D^2} \cdot \left( s + b - \frac{a}{V} \right) = 0,$$

portanto,

$$D = \sqrt{2 \cdot F \cdot L \cdot \left( s + b - \frac{a}{V} \right)}. \quad \text{Eq. 2.2}$$

Gibson e Fernández (1994) propõem uma outra expressão como função da demanda de passageiros, volume de ônibus e da taxa média de ocupação dos veículos, que minimiza o custo total associado aos tempos de detenção nas paradas. Atribuindo os valores normalmente usados para os parâmetros de custo, a expressão é:

$$D = 43.8 \cdot \sqrt{\frac{\lambda \cdot q \cdot LT}{DS + DB} (103 + dr \cdot TO)} \quad \text{Eq. 2.3}$$

onde:

- $D$  = distância entre paradas [metros];
- $\lambda$  = porcentagem do fluxo de ônibus que pára na parada [adimensional];
- $q$  = fluxo total de ônibus [ônibus/hora];
- $LT$  = extensão do trecho [km];
- $DS$  = volume de passageiros que embarca no trecho [passageiros/hora];
- $DB$  = volume de passageiros que desembarca no trecho [passageiros/hora];
- $dT$  = tempo médio de detenção do ônibus na parada [segundos];
- $TO$  = taxa média de ocupação dos ônibus [passageiros/ônibus].

Embora na prática existam outros fatores importantes que determinam a localização de paradas, como pontos geradores de demanda (shopping centers, supermercados, escolas, etc.) e restrições físicas da via (inconveniências para implantação de paradas), expressões como as equações 2.2 e 2.3 têm fornecido indicativos para o espaçamento médio a ser considerado. É interessante observar ainda que essas expressões procuram otimizar os custos associados aos tempos de viagem e de espera de passageiros, não necessariamente a capacidade do sistema.

Quanto ao posicionamento das paradas em relação às interseções, existem três possibilidades básicas: imediatamente a montante de uma interseção, imediatamente a jusante, ou aproximadamente a meio caminho entre as interseções.

As paradas localizadas imediatamente a montante tem a seu favor a chance de conciliar os tempos de serviço com o vermelho do semáforo e facilitar o reingresso dos ônibus na corrente de tráfego. Por outro lado, dificultam a manobra dos veículos que dobram à direita na interseção, e tornam-se desaconselháveis quando o volume deste tipo de manobra excede cerca de 250 veículos por hora (Crowell, 1978, apud Lindau, 1983).

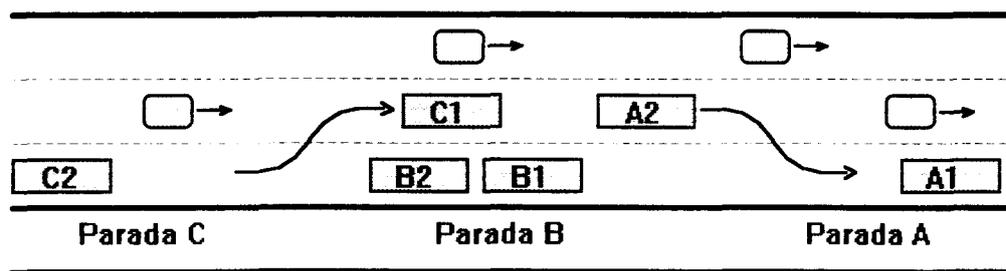
Paradas imediatamente a jusante tem a vantagem de não interferir nos conflitos de movimentos ocasionados nas interseções. A desvantagem é que em períodos de pico, fluxos intensos de ônibus e tempos de detenção longos implicam a criação de filas crescentes de ônibus e eventual bloqueio da interseção.

Paradas aproximadamente a meio caminho têm interferência mínima nas interseções, mas restringem o estacionamento de veículos particulares e comerciais ao longo do meio-fio. Sua aplicação é particularmente aconselhável em condições em que o fluxo de ônibus é elevado.

### **Paradas divididas e alternadas**

A colocação de várias paradas em série funciona bem para fluxos baixos. À medida que os fluxos aumentam, as flutuações nos tempos de embarque e desembarque causam interferências entre os ônibus, que bloqueiam uns aos outros, reduzindo a capacidade do corredor.

Uma solução possível para este problema são paradas divididas e alternadas. Ela consiste, fundamentalmente, em dividir as linhas de ônibus em dois ou mais grupos segundo a rota, parando cada grupo em uma sub-parada exclusiva àquele grupo. Desta forma, cada sub-parada recebe uma fração do número de ônibus e uma fração do número de passageiros. A Figura 2.2 ilustra esta medida.



**Figura 2.2 - Conceito de operação com paradas divididas e alternadas**

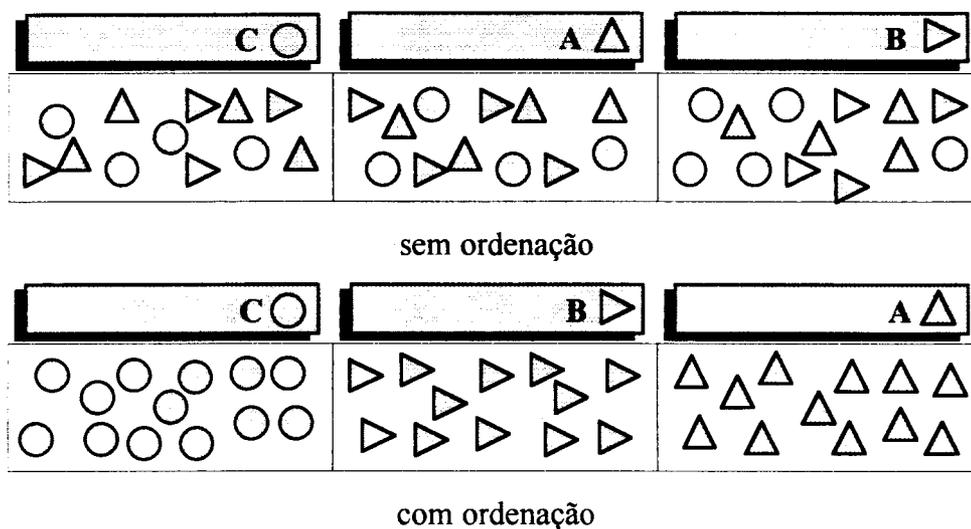
A desvantagem deste tipo de tratamento é que ultrapassagens entre ônibus devem ocorrer nos trechos entre sub-paradas. Em condições de tráfego misto, ultrapassagens geram maior atrito entre veículos; nos casos de faixas ou corredores exclusivos, faixas extras para ultrapassagens devem ser alocadas junto à parada, o que naturalmente encarece o projeto do corredor e pode gerar situações de conflito durante as ultrapassagens.

O número e a extensão de cada sub-parada para atender uma dada demanda podem ser determinados segundo o método proposto por Gibson e Fernández (1994).

### **Comboios de ônibus ordenados**

A operação com comboios ordenados é um conceito de operação parecido ao das paradas divididas e alternadas, no que diz respeito a divisão das linhas de ônibus e dos berços das paradas em grupos. A diferença é que cada parada recebe todos os grupos de ônibus, ao invés de ser dividida em sub-paradas alternadas ao longo do corredor. Para que este sistema de operação funcione bem, os ônibus devem ingressar no corredor na mesma ordem em que os berços das paradas foram divididos, ou seja, se a parada foi dividida em três berços (A, B e C), os ônibus devem ingressar no corredor na mesma ordem para que não haja riscos de um ônibus de um tipo (por exemplo, B) bloquear o ônibus de trás, que tenta parar em um berço mais adiante (A).

Como os passageiros sabem onde aguardar um determinado ônibus na parada, os embarques tendem a ser mais rápidos. A Figura 2.3 ilustra este conceito.

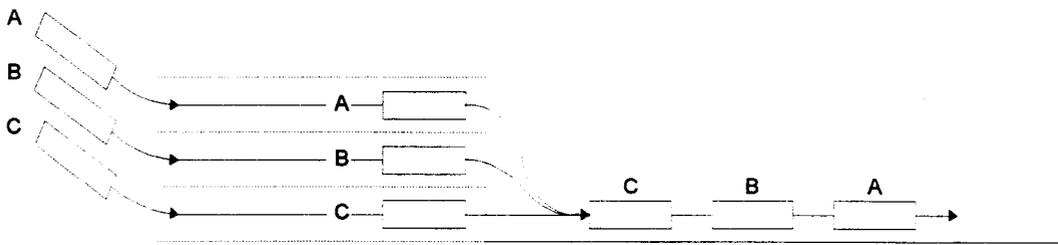


**Figura 2.3 - Conceito de operação com comboios ordenados**

Em relação às paradas divididas e alternadas, a principal vantagem dos comboios ordenados é que as ultrapassagens se tornam desnecessárias, já que a sequência dos ônibus obedece a sequência dos berços nas paradas. Com isso, podem-se projetar corredores mais baratos, de uma única faixa por sentido.

Por outro lado, existem duas restrições importantes a esse tipo de operação: em primeiro lugar, a necessidade de ordenar os ônibus antes de seus ingressos no corredor. Este processo necessita de um espaço no início do corredor, geralmente de três faixas (geralmente são usados três grupos de ônibus), e consome tempo. Em segundo, o sistema só funciona bem se a demanda de cada um dos tipos de ônibus for aproximadamente equivalente, para que haja um carregamento aproximadamente uniforme em cada tipo de ônibus. Caso contrário, os ônibus menos carregados gastam mais tempo que o necessário na parada, porque permanecem bloqueados pelos ônibus mais carregados.

Em geral, os ônibus que formam os comboios ordenados chegam no início do corredor de forma desordenada. Isso faz com que seja necessária a existência de uma área de ordenação, que estoca os veículos até o momento em que um comboio completo esteja presente. A Figura 2.4 é uma representação simplificada de uma destas áreas.



**Figura 2.4 - Representação de uma estação ordenadora**

### **Cobrança rápida de tarifa**

Além de reduzir os tempos de parada e reingresso no fluxo de veículos, podem-se reduzir os tempos na parada reduzindo o tempo de embarque de passageiros. Onde o embarque de passageiros ocorre sem os atrasos causados por cobrança de tarifa ou validação de passagem a bordo, o tempo médio de embarque por passageiro é menor (da ordem de um segundo por passageiro, de acordo com Gardner et al, 1991).

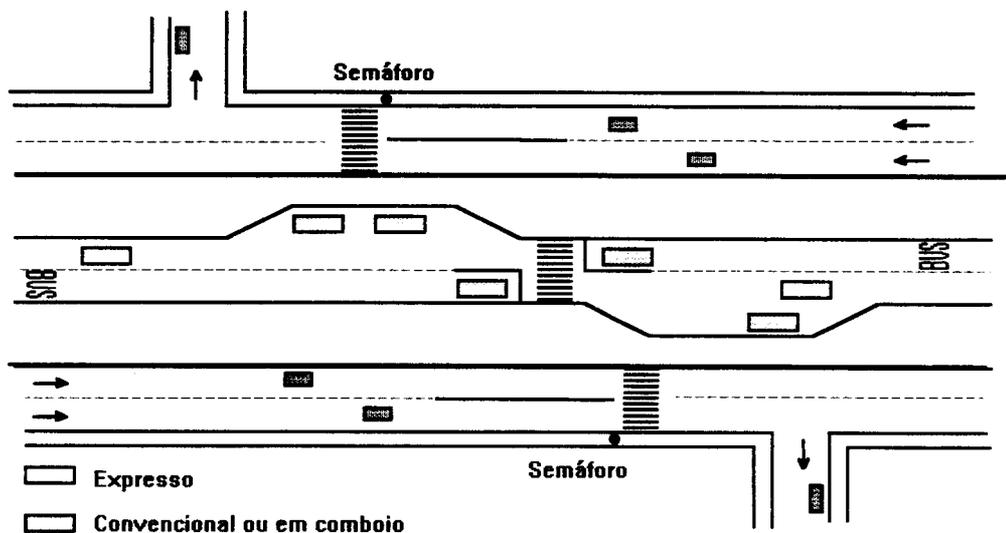
Conseqüentemente, a cobrança adiantada de tarifa oferece a possibilidade de reduzir os tempos de serviço e de detenção dos ônibus na parada, incrementando o fluxo e a velocidade comercial dos ônibus no corredor.

Embora os benefícios da implantação da cobrança adiantada de tarifa dependam fundamentalmente dos sistemas atuais e futuros de cobrança, facilidades para embarque e fiscalização, estudos sugerem que o tempo de viagem de ônibus através da parada é tipicamente reduzido em cerca de 20 a 25% (Gardner et al, 1991).

### **Paradas fora-de-linha**

A provisão de paradas fora-de-linha, que permitem ultrapassagens, pode incrementar o fluxo de ônibus e reduzir o tempo de viagem através da parada, ambos em cerca de 50% (Gardner et al, 1991).

Paradas fora-de-linha são especialmente adequadas quando serviços expressos ou semi-expressos também estão presentes no corredor. A Figura 2.5 ilustra este conceito



*Figura 2.5 - Corredor exclusivo de ônibus com paradas fora-de-linha*

### 2.1.3. Semáforos

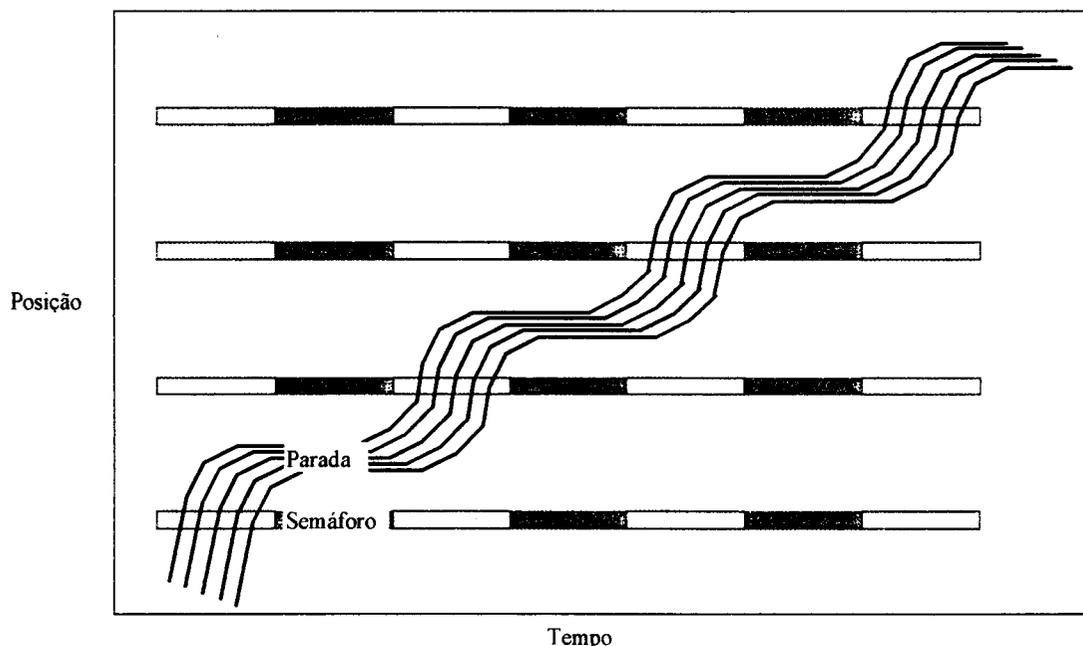
Juntamente com as paradas, os semáforos são uma das principais causas de atrasos de ônibus. Em muitos casos, estes atrasos podem ser substancialmente reduzidos através do ajuste do tempo de ciclo, coordenação ou atuação de semáforos.

#### Ajuste do ciclo semafórico

O ajuste do tempo de ciclo semafórico é um problema amplamente documentado na literatura (White, 1986; Koshi, 1989; Joyce e Yagar, 1990), e existem vários programas de computador que realizam essa otimização (por exemplo Sidra). Por outro lado, os métodos existentes não contemplam especificamente altos fluxos de ônibus, já que os ônibus são invariavelmente convertidos em veículos equivalentes.

#### Progressão semafórica

A técnica da progressão consiste na coordenação eficiente dos semáforos de uma via, de forma que os veículos encontrem sempre os semáforos na fase verde. A Figura 2.6 ilustra este conceito.



**Figura 2.6 - Conceito de progressão semafórica**

Este esquema funciona particularmente bem quando a progressão dos veículos é previsível e pouco variável. No caso dos ônibus, a variabilidade nos tempos de parada torna a coordenação difícil.

Ribeiro (1996) e Willumsen e Coeymans (1989) argumentam também, com base em estudos práticos da aplicação do programa TRANSYT no Rio de Janeiro e Santiago, que os métodos consagrados e disponíveis para o cálculo da progressão não são diretamente aplicáveis a situações de elevado fluxo de ônibus, características da América Latina.

### **Atuação de semáforos**

A priorização de ônibus em semáforos também pode ser obtida através de sistemas mais sofisticados, que detectam a aproximação dos ônibus nas interseções. Neste caso, a fase verde do semáforo pode ser estendida, ou a vermelha encurtada, de forma a manter o ciclo semafórico atualizado com o fluxo. Segundo EBTU (1983), as reduções nos atrasos de ônibus devido a sistemas de detecção flutua tipicamente entre 10% e 30%.

Como esta medida pressupõe que não haja obstruções entre o ponto de detecção e o semáforo, ela é particularmente aplicável a faixas e corredores exclusivos de ônibus.

Por outro lado, onde o fluxo de ônibus é intenso, a chamada muito freqüente da fase verde pode bloquear as vias transversais, e a medida pode se tornar inapropriada.

Uma alternativa para esse problema, descrita em Branco (1985 apud Lindau, 1991), é atuar os semáforos das vias transversais. Assim, o fluxo de ônibus só é interrompido quando necessário, evitando o bloqueio nas vias não-prioritárias. Segundo Branco (1985 apud Lindau, 1991), reduções médias no tempo de viagem em torno de 10 a 15% foram obtidas no corredor da Assis Brasil, Porto Alegre, devidas a essa medida

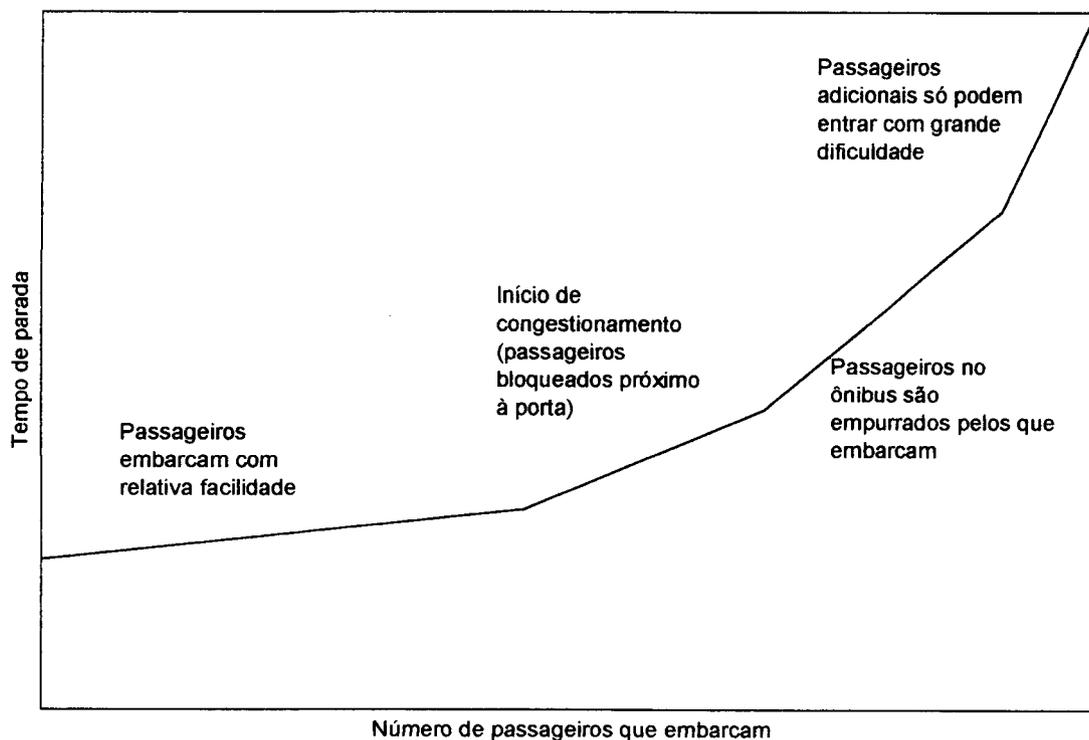
#### ***2.1.4. Capacidade dos ônibus***

A capacidade dos ônibus, ou a quantidade máxima de passageiros que cabe no veículo, está fortemente relacionada ao desempenho do sistema. Em princípio, da mesma forma com que ônibus comuns usam o espaço viário mais eficientemente que automóveis, ônibus articulados usam o espaço viário mais eficientemente que ônibus comuns.

Contudo, TRL/ODA (1993) observa que a capacidade de transferência de passageiros é de fato o fator mais importante, e que a configuração das portas e métodos de cobrança de tarifa são freqüentemente mais importantes que o tamanho do veículo apenas.

A partir de um dado instante, a restrição de espaço físico no veículo afeta a capacidade de transferência de passageiros, e o tempo de parada deixa de ser uma função linear do número de passageiros que embarca. Qualitativamente, a Figura 2.7 mostra a relação entre o tempo de parada e o número de passageiros que embarca., conforme TRL/ODA (1993).

Quantitativamente, essa relação não está bem documentada na literatura pesquisada, e normalmente é tratada como uma relação linear.



*Figura 2.7 - Tempo de parada versus embarques*

## 2.2. Estudos empíricos

Uma parte considerável da literatura sobre o desempenho de corredores exclusivos de ônibus provém de estudos empíricos. A provável razão disto é o grande número de corredores que operam com baixo desempenho, e a necessidade de diagnosticar o sistema antes de intervir. Naturalmente, os resultados dos estudos empíricos carecem de generalidade, porque também dependem de particularidades locais, que além de serem bastante diversas, são difíceis de quantificar. Tais particularidades compreendem, por exemplo, o estado dos veículos e do pavimento, a disciplina dos motoristas e passageiros, formas de pagamento de tarifa (vale transporte, necessidade de troco) e outros. Por outro lado, estes estudos são valiosos para estabelecer referências de desempenho, evidenciar problemas práticos da operação de corredores e comparar o desempenho de diferentes sistemas sob diferentes características físicas, de operação e de demanda.

### **2.2.1. Comparações práticas**

Um dos estudos empíricos mais bem documentados na literatura é o relatório do Transportation Road Research Laboratory (Gardner et al, 1991). Este relatório descreve as características geométricas, de operação e de demanda de oito corredores de ônibus em diferentes países em desenvolvimento e suas características de desempenho. Este estudo é bastante valioso porque além de abranger corredores com características variadas, os métodos e o pessoal envolvidos na coleta de dados foram os mesmos em todos os casos, o que dá consistência aos dados.

Os corredores estudados e suas principais características foram:

- **Boulevard de La Republique (Abidjan, Costa do Marfim).** Na avenida com um total de oito faixas (4 para cada sentido), as faixas centrais foram convertidas em faixas exclusivas de ônibus (uma para cada sentido). As paradas não permitem ultrapassagens entre ônibus e nenhuma medida complementar é usada. O desempenho do corredor foi considerado insatisfatório, já que longas filas de ônibus se formam na entrada das duas paradas mais carregadas do sistema. As paradas foram consideradas inadequadas para comportar o grande número de passageiros que se acumulam. As cercas de segurança que protegem os passageiros se deterioraram devido à falta de manutenção.
- **Besevler-Dikimevi (Ankara, Turquia).** Grandes movimentos de pedestres, ônibus e outros veículos convergem em um ponto central da cidade, por onde passa o corredor exclusivo de ônibus, junto ao canteiro central. O desempenho do sistema depende fortemente da interseção localizada neste ponto. Os congestionamentos freqüentemente requerem a intervenção da polícia e de fiscais das companhias de ônibus para gerenciar o tráfego. Os ônibus são separados do restante do tráfego por cercas de 1.5 metros de altura. O número de ônibus operando ao longo do corredor é baixo em relação a demanda, e por isso a taxa de ocupação dos ônibus é alta. Devido à superlotação dos ônibus, ocorrem longos atrasos em algumas paradas.
- **Avenida Cristiano Machado (Belo Horizonte, Brasil).** O corredor de ônibus da Av. Cristiano Machado liga o centro da cidade aos subúrbios mais afastados de baixa renda. A principal característica deste corredor é a possibilidade de

ultrapassagem nas paradas, e a identificação das diferentes linhas de ônibus que operam no corredor por cores, o que facilita a orientação dos passageiros e torna o embarque mais ágil.

- **Eixo Sul (Curitiba, Brasil).** Dentre os casos pesquisados, Curitiba apresenta um dos mais completos sistemas de transporte público por ônibus. As rotas e as paradas de ônibus são claramente identificadas, de maneira semelhante a sistemas de metrô. Os corredores exclusivos de ônibus formam cinco eixos estruturais, dos quais o Eixo Sul é o mais carregado. A operação é do tipo tronco-alimentação, com terminais ao longo dos corredores, onde os passageiros trocam de ônibus em uma área fechada, sem necessidade de pagamento de novas tarifas. Este procedimento torna o embarque mais eficiente. O embarque pode se dar pelas quatro portas dos ônibus, já que a cobrança de tarifas é feita previamente nas paradas (enquanto os passageiros aguardam pelos ônibus). Os ônibus são operados por várias companhias privadas, e são claramente identificados por cores.
- **Taksim-Zincirlikuyu (Istanbul, Turquia).** A maioria dos ônibus que circulam no corredor exclusivo pertence à companhia pública de transporte urbano. Mais de 80 linhas circulam no corredor, todas usando as mesmas paradas, resultando em desordem nos embarques e congestionamento nas paradas. Alguns ônibus circulam super-lotados e outros quase vazios. Como ultrapassagens não são possíveis, os ônibus mais carregados atrasam os mais vazios. Os semáforos de algumas interseções têm o tempo de verde muito curto, o que provoca a formação de longas filas de ônibus.
- **Assis Brasil (Porto Alegre, Brasil).** O corredor da rua Assis Brasil liga o centro de Porto Alegre aos subúrbios mais afastados e a cidades próximas. Os ônibus que operam neste corredor pertencem a companhias privadas, sujeitas a regulamentação municipal, e são de tipos variados, desde ônibus comuns até articulados e com reboques. Durante o pico da tarde, os ônibus entram no corredor em ordem, mas não necessariamente em comboios. O estado do pavimento e das paradas é ruim, devido à falta de manutenção. Operacionalmente, o corredor transporta grandes quantidades de passageiros, sendo sua capacidade

limitada pela parada Obirici, que concentra uma grande quantidade de passageiros que embarcam no pico da tarde.

- **Farrapos (Porto Alegre, Brasil).** O corredor da Farrapos liga o centro de Porto Alegre aos subúrbios mais afastados e ao corredor Assis Brasil, seguindo paralelo ao metrô (TRENSURB). Embora também transporte grandes quantidades de passageiros, hoje a demanda ao longo do corredor é relativamente baixa. O projeto físico do corredor e as características de operação são semelhantes as do corredor da Assis Brasil.
- **Avenida 9 de Julho/Santo Amaro (São Paulo, Brasil).** A principal característica deste corredor é a possibilidade de ultrapassagem em todas as paradas, exceto duas, o que permite a operação expressa ou semi-expressa de alguns ônibus. Contudo, parece haver uma relativa falta de informação dos passageiros, que torna os embarques pouco eficientes, dado o grande número de linhas que operam no corredor (mais de 150). Uma das duas paradas que não permitem ultrapassagem (parada São Lourenço) é responsável pelos maiores congestionamentos no pico da tarde.

As velocidades operacionais observadas e a demanda nas paradas críticas desses corredores estão representadas na Figura 2.8.

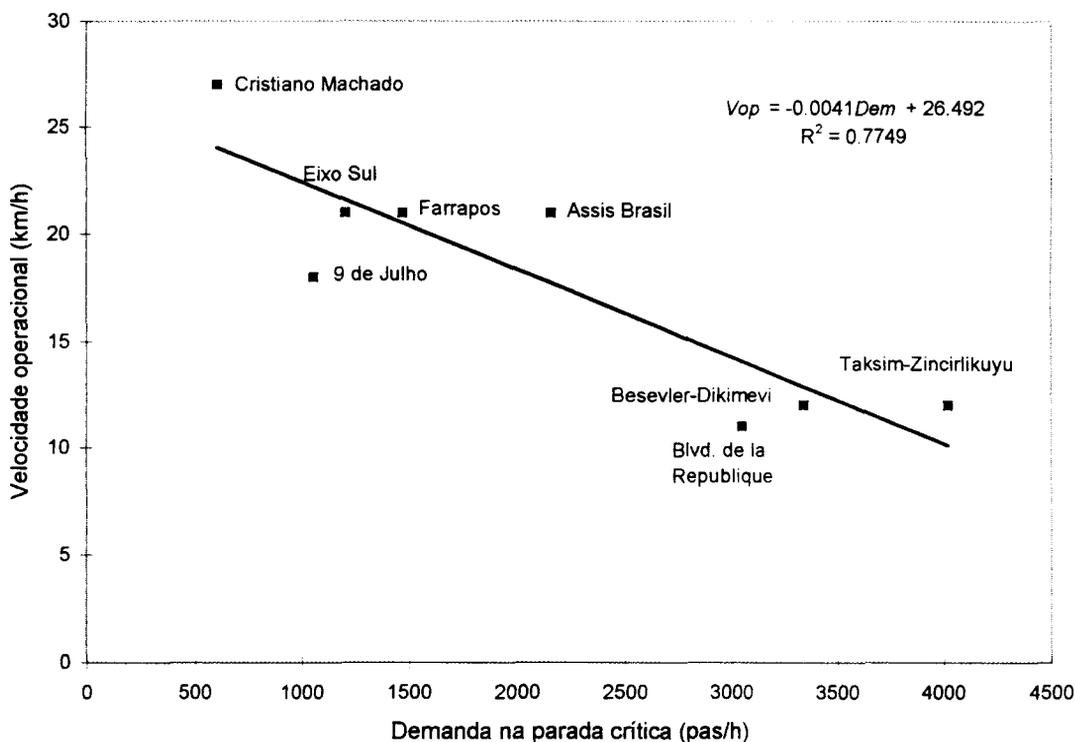
Como se pode observar na Figura 2.8, para os corredores estudados por Gardner et al (1991) existe uma forte correlação entre as demandas na parada crítica e a velocidade operacional dos ônibus. Entretanto, em princípio, não se podem generalizar correlações deste tipo, já que a uma série de fatores que sabidamente também influenciam a velocidade operacional dos ônibus (número de paradas não-críticas e suas demandas, existência de semáforos, fluxo de ônibus) não estão representadas.

De fato, Gardner et al (1991) apresentam um modelo de regressão múltipla que leva em conta vários fatores: características operacionais do sistema, predominância de embarques ou desembarques, número de paradas de grande demanda, densidade linear de paradas de pequena demanda, número de semáforos muito restritivos e densidade linear de semáforos pouco restritivos. O modelo apresentado é:

$$Speed(km/h) = 18.8 (Feature) + 6.3 (Direction) - 2.8 (LargeStops) + 2.4 (SmallStops/km) - 0.46 (MajorJunctions + MinorJunctions km),$$

onde *Feature* vale 1 se paradas fora-de-linha, ordenação de ônibus ou operação tronco-alimentação é usada e 0 caso contrário; *Direction* vale 1 para predominância de desembarques e 0 caso contrário; *LargeStops* é o número de paradas de grande demanda, definidas a seguir; *SmallStops km* é a densidade de paradas de pequena demanda; *MajorJunctions* é o número de semáforos muito restritivos (não definidos no estudo) e *MinorJunctions* é a densidade de semáforos pouco restritivos. Esse modelo tem  $R^2 = 0.64$ .

Gardner et al (1991) definem paradas de grande demanda aquelas em que o número de embarques ou desembarques por hora excede a 2500.



**Figura 2.8 - Demanda na parada crítica versus velocidade operacional nos corredores estudados por Gardner et al (1991)**

### **2.2.2. Testes em laboratório**

Comboios ordenados de ônibus tiveram sua origem nos laboratórios da General Motors, no final da década de 60. Do experimento realizado em uma pista com 2,5 milhas, onde comboios de até dez ônibus foram montados e operados, foram derivados modelos de veículo-seguidor que previam fluxos acima de 1.450 ônibus/hora para uma corrente de tráfego contínua (Herman et al, 1970).

A validade do experimento da General Motors, porém, foi criticada por Vuchic e Day (1975), que atribuíram os altos volumes previstos às condições artificiais em que o experimento foi realizado. Entre elas:

- o teste realizado em condições de fluxo ininterrupto não contemplou as operações de embarque e desembarque de passageiros, que representam o principal gargalo do sistema;
- a aplicação de equações de tração veicular e comportamento dinâmico mostraram que, para o fluxo reportado de 1.450 ônibus/hora à velocidade de 35 milhas/hora, as condições de segurança estavam bem abaixo das mínimas consideradas satisfatórias para qualquer sistema de transporte coletivo;
- o teste foi realizado sob condições tendenciosamente favoráveis, que dificilmente se encontrariam em um corredor real (infraestrutura, veículos e motivação).

Outros experimentos realizados em 1968, também em condições de laboratório, indicaram que capacidades entre 350 e 400 ônibus/hora, com velocidades comerciais entre 20 e 25 km/h poderiam ser atingidas por comboios de 6 ônibus, viajando com velocidade de cruzeiro de 50 km/h entre estações afastadas de 500 metros, com tempos de serviço em paradas de 30 segundos (Scheel e Foote, 1968).

No final da década de 70, o conceito de comboios ordenados foi introduzido no Brasil. A Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo desenvolveu o projeto COMONOR (COMboio de ÔNibus ORdenados) para aumentar a capacidade do corredor 9 de Julho (Szász, 1979).

Testes de laboratório também foram realizados para determinar a distância ótima entre o final de uma faixa exclusiva de ônibus e uma interseção, ou “off-set” da faixa exclusiva (Coburn e Cooper, 1973). Os testes, contudo, foram realizados contemplando fluxos de ônibus característicos de países da Europa, muito inferiores àqueles encontrados em países em desenvolvimento, em particular da América Latina.

### **2.3. Estudos de simulação**

Assim como estudos empíricos, a simulação também ocupa um papel importante na investigação do desempenho de corredores exclusivos de ônibus. A simulação vem cada vez mais ganhando importância na investigação de sistemas complexos como o estudado aqui, especialmente com o barateamento de computadores digitais e a grande oferta de bibliotecas, linguagens e ambientes projetados especialmente para simulação. Alguns dos principais simuladores e estudos de simulação são revisados nesta seção.

#### **2.3.1. SIBULA**

SIBULA (*Simulation of Bus Lanes*), está descrito em Lindau (1983). É um modelo de simulação microscópica de uma seção de uma via com três faixas de tráfego, onde trafegam vários tipos de veículos além de ônibus. O modelo simula a interação entre os veículos, (inclusive ultrapassagens) e pode ser usado para testar diferentes configurações da via (como faixa exclusiva para ônibus junto ao meio-fio ou ao canteiro central) e de operação (comboios ordenados, sincronização de semáforos, etc.).

As aplicações de SIBULA levaram às seguintes conclusões:

- os benefícios da implantação de faixas exclusivas de ônibus dependem da extensão do trecho em consideração. Em princípio, quanto maior for o trecho, maiores tendem a ser os benefícios para os ônibus;
- a coordenação de semáforos não se mostrou especialmente eficiente devido a aleatoriedade nos tempos de detenção dos ônibus nas paradas;

- a operação com comboios ordenados de ônibus mostrou ser capaz de incrementar significativamente a capacidade do trecho estudado. Em princípio, quanto maior forem os comboios, maior a capacidade do sistema, sendo que o tamanho máximo dos comboios é limitado pelo tempo de verde dos semáforos.

### **2.3.2. BUSWAY**

BUSWAY é um modelo derivado de SIBULA, adaptado para microcomputadores e descrito em Kuhn e Michel (1993). Ao contrário de seu antecessor, BUSWAY se limita a simular a operação de ônibus em um corredor de faixa simples.

Uma das principais aplicações de BUSWAY foi na comparação do desempenho de um corredor exclusivo de ônibus e o sistema de VLT da Tunísia (Michel et al, 1994). O modelo foi usado na execução de um projeto de experimentos e possibilitou a formulação de regressões lineares múltiplas para a velocidade operacional média de ambos sistemas.

### **2.3.3. IRENE**

IRENE é um modelo de simulação de uma parada isolada do sistema (Gibson e Baeza, 1989). Esse modelo foi desenvolvido para permitir a análise de situações bastante desordenadas. Portanto, o modelo é especialmente adequado para representar a realidade de países em desenvolvimento, particularmente da América Latina, onde a competição por passageiros leva aos ônibus a parar múltiplas vezes em uma mesma parada, de forma bastante indisciplinada.

As aplicações do modelo por Gibson e Fernández (1994) levaram às seguintes principais conclusões:

- o aumento marginal de capacidade devido ao acréscimo de um berço à parada é fortemente decrescente; cerca de 3 berços por parada parece ser o número mais adequado às vias chilenas de grande fluxo de ônibus.
- para as demandas típicas de paradas em corredores da América Latina (em torno de 2000 passageiros/hora), fluxos acima de 400 ônibus/hora se tornam altamente instáveis, e o nível de serviço do sistema cai drasticamente.

#### **2.3.4. BRSM**

BRSM é um modelo de simulação descrito em Vijayakumar e Jacobs (1990), que simula um dia de operação de uma determinada linha de ônibus. O tempo de viagem entre duas paradas é dado por uma distribuição aleatória, por exemplo, uma Gama ou uma Normal, dependendo das observações no local da investigação. O tempo de embarque é calculado como uma função linear do número de passageiros que embarca e desembarca. Os passageiros são gerados conforme um processo de Poisson. O modelo calcula então uma série de indicadores de desempenho, entre eles o custo operacional diário total e por veículo, tempo de viagem médio, total de passageiros transportados, ocupação dos veículos, etc.

Vijayakumar e Jacobs (1990) aplicaram o modelo para analisar o efeito do tamanho dos ônibus no desempenho da linha, usando como critério “custo total do sistema”, dado pela soma do custo operacional e do custo do tempo de viagem dos passageiros. Suas principais conclusões são:

- quaisquer que sejam as características da linha e dos veículos que operam a linha, existe um trade-off básico entre o aumento dos custos operacionais (pela adição de mais veículos na linha) e a diminuição nos custos de tempo de viagem (pelo serviço mais freqüente);
- o valor do tempo dos passageiros é um fator crítico neste tipo de análise. A operação com vários veículos pequenos traz mais benefícios quanto maior for o valor do tempo dos passageiros.
- o custo total do sistema é relativamente pouco sensível ao custo operacional dos ônibus individuais, já que o custo operacional representa uma parte relativamente pequena do custo total.
- a demanda também é um fator crítico na análise. O custo total do sistema cresce rapidamente quando a mesma quantidade de ônibus passa a servir demandas maiores.
- veículos maiores são tão mais preferíveis quanto maior for a distância de viagem dos passageiros.

### **2.3.5. Bus-Monitor**

Bus-Monitor é um modelo de simulação desenvolvido por Seneveriante (1990) para analisar o impacto de diferentes estratégias de operação sobre duas características de qualidade de um corredor de ônibus: a variabilidade de headways e a aderência ao horário dos ônibus. As estratégias de operação incluem pontos de controle de horário, medidas de priorização, perfil de demanda e outros. Ao invés de conter um modelo de progressão de veículos para atualização do estado dos ônibus, este modelo usa uma distribuição gama para calcular o tempo de viagem de cada ônibus em cada arco (seção entre duas paradas). Tanto a aceleração como a desaceleração dos ônibus são sorteadas de uma distribuição uniforme, com valor mínimo de  $0.5 \text{ m/s}^2$  e máximo de  $2.5 \text{ m/s}^2$ , para melhor representar as diferenças de comportamento dos motoristas. Os passageiros são gerados conforme um processo de Poisson. Seneveriante usa uma distribuição gama para o tempo de serviço de ônibus nas paradas, conforme sugerido por Anderson et al (1983, apud Seneveriante, 1990), com parâmetros estimados empiricamente.

As principais conclusões de Seneveriante quanto às aplicações de Bus-Monitor são:

- a possibilidade do modelo de considerar a oferta e a demanda no nível microscópico (paradas e arcos entre paradas individualmente) melhora a precisão dos resultados previstos e diminui os problemas de transferibilidade e validação no tempo;
- a adição de pontos de controle de horário ao longo da rota dos ônibus aumenta a confiabilidade do sistema, mesmo que os ônibus tenham que ser detidos por um certo tempo para manter a aderência ao horário. Este procedimento é particularmente útil quando o valor do tempo dos passageiros é alto, porque diminui a espera média nas paradas.

### **2.3.6. TSM**

TSM (Transitway Simulation Model) é um modelo canadense de um corredor exclusivo de ônibus, com seis paradas (duas terminais e quatro intermediárias), onde circulam ônibus articulados de 60 pés. Os passageiros embarcam nas 6 paradas a taxas compatíveis com a possibilidade dos ônibus. O modelo permite a representação

de até 30 linhas diferentes, e os ônibus que servem cada linha podem ser gerados com funções próprias a cada linha. O modelo é capaz de representar duas alternativas de operação distintas: a) operação em comboios de três a cinco ônibus e b) ônibus operando independentemente. Neste modelo, um comboio é definido como um grupo de ônibus servindo a mesma estação sob a condição de que nenhum pode deixar a estação antes dos outros. Além disso, o berço de um determinado tipo de ônibus é o mesmo em todas as estações (OC Transpo, 1988 apud Nelson e Hills, 1990). Quando os ônibus operam independentemente, eles podem ultrapassar uns aos outros nas estações, se um ônibus já tiver completado os embarques e o da frente ainda estiver embarcando. O modelo permite também a simulação da quebra de ônibus depois de um certo limite de tempo pré determinado. Tempos extras de embarque também são possíveis para representar “passageiros confusos”.

TSM foi o modelo escolhido por Nelson e Hills (1990) para investigar as possibilidades de melhorar as condições de operação do sistemas de ônibus em centros urbanos. Nelson e Hills aplicaram o modelo a Oxford Street, em Londres, onde existe comércio e tráfego intensos, tanto de ônibus como de outros veículos.

As principais conclusões do estudo de caso são:

- para os fluxos atuais de ônibus (cerca de 90 ônibus/hora), comboios pequenos de três ônibus, não ordenados, resultaram nos menores atrasos totais (que compreendem o tempo gasto na formação de comboios e o tempo de viagem);
- para fluxos de ônibus duas vezes maiores que os atuais, comboios maiores de 4 ou 5 ônibus, não ordenados, resultaram em um melhor desempenho;
- os embarques são mais eficientes se comboios completos e ordenados são usados, embora os atrasos adicionais devidos à ordenação sejam significativos.

#### **2.4. Estudos analíticos**

A maior parte dos estudos analíticos a respeito da operação de sistemas de ônibus foi desenvolvida em países em desenvolvimento, onde os sistemas de ônibus têm o papel de alimentar sistemas sobre trilhos (com capacidade suficiente para atender as demandas vigentes) e distribuir os passageiros na etapa final das viagens. Por isso,

raramente a capacidade é tratada explicitamente, já que as demandas dos sistemas de ônibus são relativamente baixas.

Vários estudos sobre estratégias de controle de headways e estratégias de despacho de ônibus estão disponíveis. Entre eles, destaca-se o trabalho de Osuma e Newell (1972), que desenvolvem um modelo no qual veículos circulam em um trajeto fechado e carregam passageiros em uma única parada. O problema investigado é o de determinar a estratégia ótima de despacho dos veículos na parada, de forma a minimizar o tempo médio de espera dos passageiros. O problema é descrito em detalhes para os casos em que existem um e dois veículos no circuito. É interessante notar que em suas conclusões, Osuma e Newell (1972) afirmam que mesmo para o problema aparentemente simples de dois veículos no circuito, foi preciso abandonar em parte a matemática formal em favor da intuição, e que para atacar problemas mais complexos, provavelmente mais intuição e talvez menos matemática seriam necessários.

Uma outra família de modelos é baseada no modelo de lote econômico. Daganzo (1991) descreve um modelo originalmente usado por Clarens e Hurdle (1975 apud Daganzo, 1991) para a criação de linhas de ônibus de modo a minimizar os custos de operação e espera de passageiros. O modelo usa uma técnica de aproximação contínua para simplificar sua formulação e é análogo a diversos modelos logísticos.

Powell e Sheffi (1983) sugerem um modelo probabilístico do desempenho um sistema genérico de ônibus. O modelo contém um conjunto de hipóteses e um conjunto de expressões recursivas baseadas nas hipóteses para descrever a posição dos veículos no sistema ao longo do tempo. Tais expressões são resolvidas numericamente. A vantagem do método é que detalhes da operação podem ser incorporadas ao modelo paulatinamente, através do maior refinamento das expressões recursivas. Por já resultar em distribuições de probabilidade das variáveis de interesse (headways e ocupação dos veículos), o método evita a etapa de análise estatística de resultados típica da simulação.

Finalmente, destacam-se os modelos apresentados em HCM (1985) para estimar a capacidade de um sistema de transporte público:

$$c_v = \frac{3600 \cdot R}{D + t_c};$$

$$c_p = \frac{3600 \cdot n \cdot S \cdot R}{D + t_c}$$

onde:

$c_v$  = veículos por hora por canal ou berço (máximo);

$c_p$  = passageiros por hora por canal ou berço (máximo);

$t_c$  = defasagem temporal entre veículos sucessivos, em segundos

$D$  = tempo de serviço na parada crítica, em segundos;

$S$  = passageiros por veículo;

$n$  = veículos por composição ( $n = 1$  para ônibus,  $n = 1$  até 11 para sistemas sobre trilhos)

$R$  = fator redutivo para compensar flutuações nos tempos de serviço e nas chegadas de veículos.

O fator  $R$  se aproxima de 1 para sistemas sobre trilhos com direito exclusivo de circulação e controle automático (menos suscetíveis a flutuações aleatórias). Para sistemas de ônibus,  $R$  é sempre menor que 1, sendo 0.833 o valor sugerido para capacidade máxima (o que representa um acréscimo de 20% no headway mínimo).

Essas equações podem ser ajustadas para representar reduções de capacidade devidas a semáforos:

$$c_p = \frac{(g / C) \cdot 3600 \cdot n \cdot S \cdot R}{(g / C) \cdot D + t_c}$$

onde  $g$  é o tempo de verde e  $C$  o tempo do ciclo semafórico.

Essas equações podem ser usadas para estimar a capacidade de um sistema de transporte público quando o número efetivo de berços é conhecido e o padrão de demanda permite que os veículos estejam cheios quando chegam na seção de carregamento máximo. Onde essas condições não se verificam, análises mais detalhadas são necessárias.

Segundo HCM (1985), soluções de gerenciamento de sistemas de transporte público não devem contemplar somente a capacidade de vazão do fluxo de veículos (como no caso de autoestradas para automóveis particulares), mas também a capacidade de

transporte de passageiros. De fato, transportar passageiros e não veículos é o princípio do transporte coletivo.

Ainda segundo HCM (1985), o conceito de capacidade do transporte público é mais complexo e menos preciso que do autoestradas. Ele depende de uma série de fatores tais como: características dos veículos; características do direito de circulação; características das paradas; características de operação; características da demanda; características do tráfego nas vias e métodos de controle de headways. Depende também das políticas da agência regulamentadora, que normalmente estabelece a frequência dos serviços e as taxas toleráveis de ocupação dos veículos.

Finalmente, HCM (1985) aponta que:

*“a capacidade de sistema de transporte público está intimamente relacionada ao desempenho do sistema e a qualidade do serviço, em termos de velocidade, conforto e confiabilidade. Um simples número para descrevê-la pode muitas vezes ser elusivo.”*

## **2.5. Comentários finais**

Embora a literatura sobre o desempenho de ônibus em corredores exclusivos seja abundante, ela é relativamente carente de uma estrutura teórica, mesmo simplificada, que aborde o problema de forma sistêmica e que permita compreender as principais relações entre os parâmetros envolvidos.

Grande parte do conhecimento atual sobre o assunto deriva de experimentos empíricos, que além de serem dificilmente generalizáveis (porque dependem de uma série de características locais de onde se realizou o experimento), são extremamente trabalhosos e caros.

A simulação, que vem ganhando cada vez mais popularidade entre os pesquisadores, é uma técnica que complementa bem o empirismo. Por um lado, os estudos empíricos realizados em sistemas de características diversas subsidiam os estudos de simulação, fornecendo dados para a calibração e validação dos simuladores, e alertando para problemas práticos que ocorrem nos sistemas reais. Por outro lado, a simulação oferece a liberdade de alterar as características do sistema estudado no intuito de melhorar seu desempenho, sem incorrer em custos elevados.

Observa-se, porém, que grande parte dos estudos de simulação são, a exemplo dos estudos empíricos, de escopo localizado, geralmente aplicados na análise de corredores específicos, com características próprias, e que normalmente já apresentam problemas de projeto ou operação.

Os simuladores, por isso, tendem a ser extremamente ricos em detalhes, muitas vezes com considerações somente relevantes ao sistema para qual foram aplicados. Isso leva a modelos que reproduzem fielmente a situação observada, mas o “ruído” introduzido mascara as relações fundamentais (e universais), como os trade-offs entre capacidade e velocidade operacional.

Percebe-se a falta uma análise mais simplificada (mesmo com resultados menos realistas) que forneça um referencial teórico e que permita identificar os parâmetros fundamentais do sistema. A partir dessa análise simplificada, poder-se-iam desenvolver modelos mais robustos, fáceis de usar, e que levassem a um maior entendimento do sistema.

Os capítulos que seguem procuram contribuir nesse sentido.

### **3. Modelagem conceitual de uma parada**

As paradas são elementos essenciais dos corredores de ônibus porque proporcionam o acesso dos passageiros ao sistema e normalmente representam seu gargalo. Vale salientar que a capacidade de transporte de passageiros em fluxo livre é muito maior do que a de qualquer corredor existente. Nos casos em que o gargalo não for uma parada, ele será um semáforo ou interseção, que forçam a parada dos ônibus e podem portanto ser analisados com modelos análogos ao apresentado a seguir.

O funcionamento de uma parada de ônibus pode ser muito complexo, especialmente se considerarmos as diversas formas de operação possíveis em um corredor de ônibus e os fatores estocásticos envolvidos na ocupação das paradas pelos ônibus, passageiros, e as trocas de passageiros entre ônibus e parada. Normalmente, esta complexidade é tão grande que inviabiliza a modelagem analítica detalhada do processo, o que leva à consideração quase imediata da modelagem por simulação.

Por outro lado, a modelagem analítica do processo simplificado pode apresentar grandes vantagens. Uma delas é que se identificam mais facilmente os parâmetros do processo que são mais importantes, e de que forma eles se relacionam. Outra vantagem é que, mesmo simplificada, tais modelos dão uma idéia da magnitude dos resultados esperados, o que pode ser útil em pré-análises ou na tomada de decisões estratégicas, quando dados detalhados não estão disponíveis. Finalmente, um modelo analítico simplificado serve para verificar e validar um modelo de simulação mais complexo (e vice-versa), bastando para isso simular o caso particular que levou ao modelo analítico.

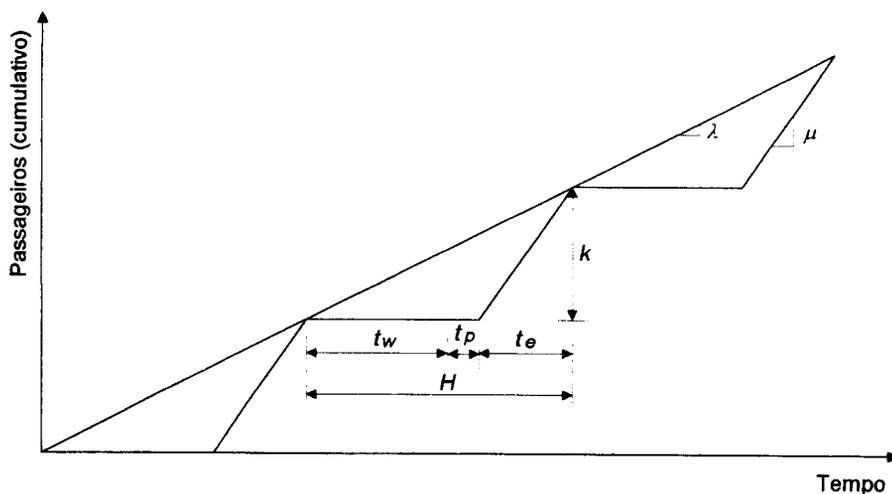
#### **3.1. Parada com um berço**

Nesta seção, considera-se uma parada curta, capaz de acomodar apenas um ônibus de cada vez. Além disso, existe apenas uma linha de ônibus e um tipo de passageiro, isto é, qualquer passageiro pode embarcar em qualquer ônibus (os passageiros sempre procuram embarcar no primeiro ônibus que estiver disponível). Considera-se ainda que o processo de chegada de ônibus e passageiros na parada é determinístico.

A análise inicial consiste em fixar a quantidade de passageiros que embarca em cada ônibus ( $k$ ) e determinar as características de desempenho operacional do sistema (trecho do corredor com uma parada). O parâmetro  $k$  é uma forma de atrelar a oferta à demanda, e deve ser encarado como um parâmetro de projeto do sistema. Dados a demanda e o número de passageiros que embarca em cada ônibus, tem-se a oferta.

Para o caso determinístico, a capacidade da parada é dada pela demanda máxima de passageiros que pode ser atendida naquela parada, para uma determinada relação demanda/oferta ( $k$ ), sem causar o surgimento de filas crescentes de ônibus na sua entrada. O nível de serviço pode ser medido por grandezas que expressam a qualidade do serviço do ponto de vista do passageiros, ou seja, a velocidade operacional dos ônibus no trecho da parada, a ocupação dos ônibus, e espera média na parada e a fila média na parada.

Observando-se o que ocorre na parada, pode-se fazer um diagrama de acumulação, como os comumente usados em problemas de filas (Newell, 1982; Hall, 1987). A Figura 3.1 mostra esse diagrama.



**Figura 3.1 - Diagrama de acumulação de passageiros**

Na Figura 3.1, a reta cumulativa de chegadas de passageiros (de inclinação  $\lambda$ ) representa o total de passageiros que chegaram na parada entre um tempo “zero” arbitrário e o tempo  $t$ . A reta cumulativa de embarques (de inclinação  $\mu$  ou zero) representa o total de passageiros que embarcaram no mesmo período. O afastamento vertical entre as retas corresponde ao número de passageiros na parada no tempo  $t$ .

Após a chegada de um ônibus na parada, decorre um certo tempo  $t_p$  (tempo perdido), necessário para a abertura da porta do ônibus e a chegada dos passageiros até ela. Os passageiros então começam a embarcar a uma taxa constante  $\mu$ , até esvaziar a parada. Finalmente, o ônibus fecha a porta e arranca. O tempo gasto pelo ônibus na parada é dado pela soma do tempo perdido e o tempo de embarque, ou seja,  $t_p + t_e = t_p + k/\mu$ .

O tempo máximo de espera de um passageiro por um ônibus é  $t_w + t_p$  e o intervalo entre a chegada de dois ônibus na parada (headway) pode ser expresso por

$$H = t_w + t_p + t_e.$$

Basta inspecionar a Figura 3.1 para verificar que o tempo médio de espera de um passageiro (incluindo o tempo na parada e o tempo dentro do ônibus parado) é:

$$E[w] = H/2 \quad \text{Eq. 3.1}$$

e o número médio de passageiros na parada é:

$$E[q] = \lambda H/2 \quad \text{Eq. 3.2}$$

À medida que  $\lambda$  aumenta,  $H$  tem de diminuir para que mantenha o mesmo  $k$ . Como  $t_e$  também é constante ( $t_e = k/\mu$ ),  $t_w$  tem de diminuir. Na prática,  $t_w$  pode diminuir até um certo limite  $t_{w \min}$ , necessário para que um ônibus deixe a parada e o ônibus seguinte chegue e inicie os embarques (tempo para renovação de ônibus na parada). Portanto, a capacidade da parada é dada por:

$$\lambda_{cap} = \frac{k}{t_{w \min} + t_p + k / \mu}. \quad \text{Eq. 3.3}$$

A Equação 3.3 é análoga à fornecida pelo HCM (1985). Ela mostra que a capacidade depende do tempo mínimo para a renovação de ônibus na parada ( $t_{w \min}$ ), do número de passageiros que embarcam por ônibus ( $k$ ) e da taxa de embarque ( $\mu$ ).

Definindo  $\varphi$  como o fluxo de ônibus através da parada, então  $\varphi = \lambda/k$  e

$$\varphi_{cap} = \frac{\lambda_{cap}}{k} = \frac{1}{t_{w \min} + t_p + k / \mu}. \quad \text{Eq. 3.4}$$

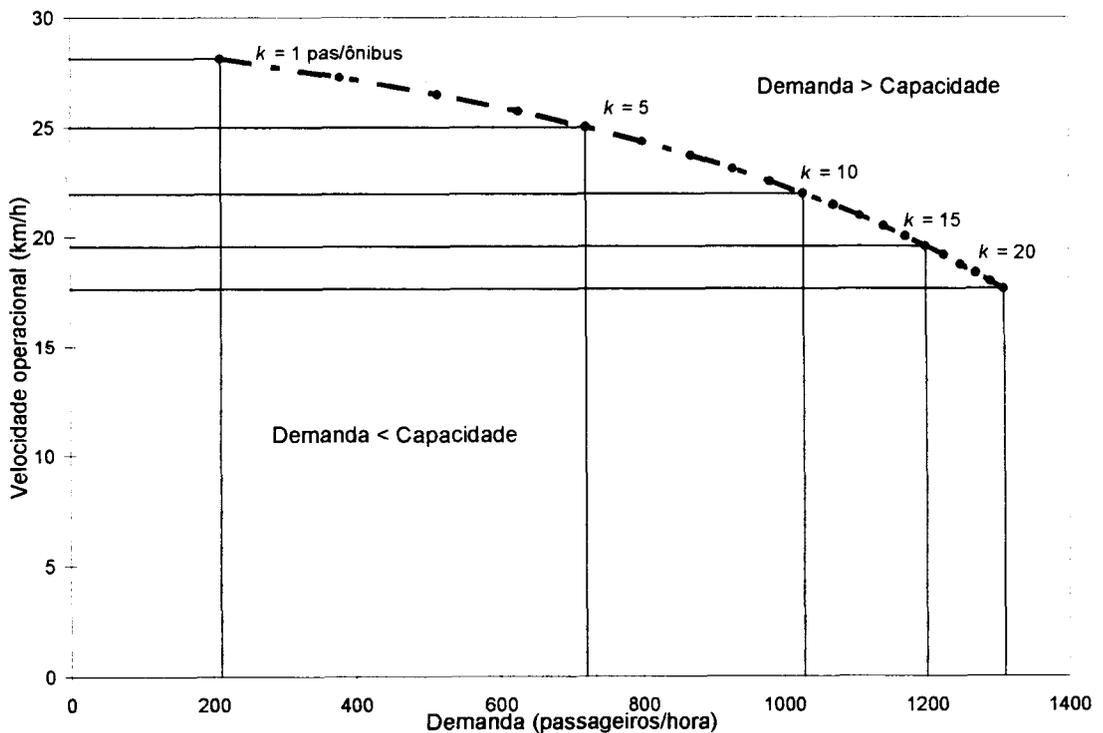
Fica claro que existe um trade-off entre o fluxo máximo de passageiros que embarcam na parada e fluxo máximo de ônibus que atravessam a parada.

Se considerarmos que esta parada está localizada no meio de um trecho de comprimento  $L$ , então podemos determinar também a velocidade operacional dos ônibus no trecho:

$$V_{op} = \frac{L}{L/V_c + t_p + k/\mu + T_{da}}, \text{ para } \lambda < \lambda_{cap}, \quad \text{Eq. 3.5}$$

onde  $V_c$  é a velocidade de cruzeiro do ônibus e  $T_{da}$  é o tempo gasto na desaceleração e reaceleração do ônibus nas proximidades da parada. Usando as duas equações acima, pode-se determinar a velocidade operacional dos ônibus no trecho e capacidade da parada para diferentes valores  $k$ .

A Figura 3.2 abaixo mostra o resultado da aplicação das equações 3.3 e 3.5, com  $L = 500$  m,  $V_c = 50$  km/h,  $\mu = 0.5$  pass/s,  $t_p = 5$  s,  $T_{da} = 21$  s e  $t_{w, min} = 10$  s.



**Figura 3.2 - Demanda versus velocidade operacional (1 berço)**

Na Figura 3.2, cada ponto representa um valor de  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, 20$ ). A sucessão desses pontos divide o gráfico em duas regiões: uma região à esquerda, onde é possível atender a demanda com um dado nível de serviço estável, e uma à direita, além da capacidade de transferência da parada.

A abscissa de cada ponto, calculada com a Equação 3.3, é a demanda máxima de passageiros que pode ser transportada para o respectivo valor de  $k$ . A ordenada, calculada com a Equação 3.5, é a velocidade operacional dos ônibus no trecho.

A linhas horizontais significam que para qualquer demanda abaixo da demanda máxima, e para seu respectivo  $k$ , a velocidade se mantém a mesma. O fluxo de ônibus, porém, aumenta ao longo de cada uma dessas linhas, conforme a Equação 3.4. Por consequência, diminui o headway e com ele o tempo médio de espera e a fila média de passageiros na parada.

Embora o caso analisado nesta seção seja bastante simples, a Figura 3.2 revela algumas relações interessantes, que permanecem válidas para as situações mais complexas.

Em primeiro lugar, fica evidenciado um trade-off entre a capacidade da parada e o nível de serviço no trecho que a contém. À medida em que a demanda cresce, pode-se aumentar também a oferta de ônibus de modo a manter constante a lotação e a velocidade operacional dos ônibus. Mas isto só é possível até um certo limite, em que a demanda atinge a capacidade da parada. A partir deste momento, não é mais possível absorver demandas maiores com o mesmo  $k$ . Para absorver demandas maiores, é preciso aumentar o valor de  $k$ , que significa aumentar a lotação dos ônibus e o tempo de embarque, diminuindo conseqüentemente a velocidade operacional. Em outras palavras, o aumento de capacidade se dá às custas da queda no nível de serviço.

Além disso, note-se que como o denominador da Equação 3.3 apresenta duas parcelas que independem de  $k$ , o aumento marginal de capacidade devido ao acréscimo de  $k$  é decrescente. Isso fica claro também pela Figura 3.2.

### **3.2. Parada com múltiplos berços**

Considera-se agora que a parada é longa o suficiente para comportar não apenas um ônibus de cada vez, mas vários ( $n$ ). Se esses ônibus param na parada ao mesmo tempo, recebem todos a mesma quantidade de passageiros e arrancam juntos, de tal forma que o comboio de  $n$  ônibus pode ser considerado como um único ônibus  $n$

vezes mais longo e com taxa de embarque  $n$  vezes maior, então o processo é análogo ao discutido na seção anterior, e a Equação 3.3 precisa dos seguintes ajustes:

$$k' = n \cdot k$$

$$\mu' = n \cdot \mu$$

Além desses, o parâmetro  $t_{w, min}$  também depende do tamanho da parada (ou do número de ônibus que ocupam a parada de cada vez). A maneira mais simples de expressar  $t_{w, min}$  como função de  $n$  é através de uma relação linear:

$$t_{w, min} = a + b \cdot n \quad \text{Eq. 3.6}$$

onde a constante  $a$  está relacionada ao tempo necessário ao comboio de ônibus acelerar e desacelerar (que em princípio não depende do tamanho do comboio), e  $b$  está relacionado ao tempo necessário ao comboio percorrer a parada para estacionar nos berços (que depende do tamanho do comboio).

A Equação 3.3 pode então ser reescrita como:

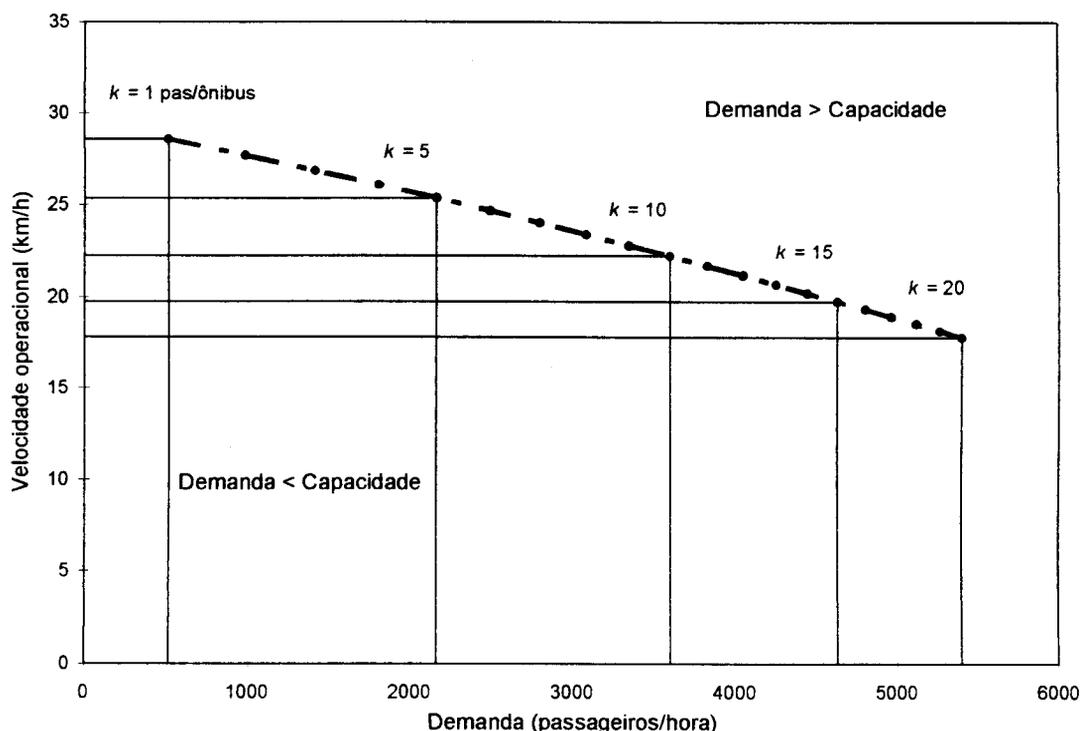
$$\lambda_{cap} = \frac{n \cdot k}{(a + b \cdot n) + t_p + k / \mu}, \quad \text{Eq. 3.7}$$

e a Equação 3.4 como:

$$\phi_{cap} = \frac{\lambda_{cap}}{k} = \frac{n}{(a + b \cdot n) + t_p + k / \mu}. \quad \text{Eq. 3.8}$$

É interessante notar que quanto maior for a taxa de aceleração e desaceleração dos ônibus, menor será o valor de  $a$ , e quanto mais coeso estiver o comboio, menor será o valor de  $b$ , porque os ônibus começam a embarcar seus passageiros aproximadamente no mesmo instante, e partem da parada também aproximadamente no mesmo instante (dado que o número de passageiros que embarcam em cada ônibus é o mesmo).

A Figura 3.3 mostra o gráfico da demanda versus velocidade operacional, usando as equações 3.5 e 3.7, com  $n = 6$ ,  $a = 5$  s,  $b = 5$  s,  $t_p = 5$  s e  $\mu = 0.5$  pas/s (paradas de 6 berços são bastante comuns nos corredores de grande demanda no Brasil).

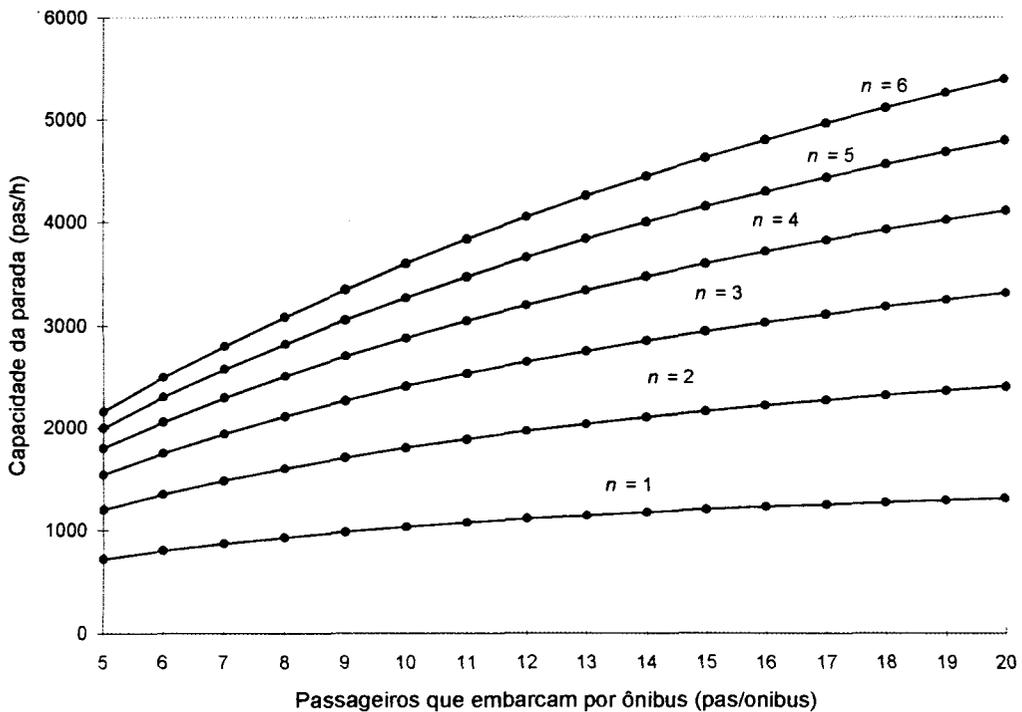


**Figura 3.3 - Demanda versus velocidade operacional (6 berços)**

A Figura 3.3 é semelhante à 3.2, exceto que as demandas atendidas são mais elevadas, devido à adição de novos berços à parada, e que a velocidade operacional cai quase linearmente com a demanda.

A Figura 3.4 mostra os resultados da aplicação da Equação 3.7 para comboios de diferentes tamanhos, com taxa de embarque  $\mu = 0.5$  pas/s,  $a = 5$  s,  $b = 5$  s e  $t_p = 5$  s.

Observa-se que, mesmo em uma situação idealizada (sem quaisquer efeitos estocásticos), o ganho marginal de capacidade devido a inclusão de um berço extra na parada é decrescente, o que foi constatado também por Gibson e Fernández (1994) usando o modelo de simulação IRENE.



**Figura 3.4 - Capacidade de paradas com múltiplos berços**

### 3.3. Paradas em série

Um corredor pode ser visto como um sistema de servidores (paradas) em série. Cada cliente (ônibus) têm de passar por todos os servidores. Um resultado bastante conhecido da teoria de filas assegura que se a capacidade de acumulação do sistema entre paradas for infinita, então o fluxo máximo de clientes (ônibus) corresponde à capacidade da parada crítica (ver, por exemplo, Cox 1961.)

Na prática, a capacidade de acumulação não é infinita, mas basta que o espaçamento entre paradas seja grande o suficiente para assegurar que a fila de ônibus aguardando a montante de uma parada não bloqueie a parada anterior. Essa condição normalmente se verifica, a não ser que o sistema já esteja operando além da capacidade, e constitui um argumento a favor de paradas suficientemente espaçadas entre si e de semáforos ao longo de corredores de alto fluxo. Por conseqüência, essa consideração estabelece um limite para a divisão sucessiva das paradas, mencionada anteriormente.

O fluxo global de passageiros no sistema, considerando que os passageiros só embarcam ao longo do corredor, é soma dos embarques em cada parada:  $\Lambda = \sum \lambda_i$ . A fluxo máximo de passageiros no sistema é limitado pela parada de menor capacidade:

$$\Lambda_{cap} = \sum_i \lambda_i \quad \text{com } \lambda_i = \lambda_{i, cap}, \text{ para algum } i. \quad \text{Eq. 3.9}$$

O fluxo máximo de ônibus no sistema é o menor fluxo máximo de ônibus das paradas:

$$\Phi_{cap} = \min\{\phi_i\}, \text{ para } \Lambda < \Lambda_{cap} \quad \text{Eq. 3.10}$$

A ocupação final dos ônibus no final do corredor é a soma do número de passageiros que embarca em cada ônibus, e em cada parada. Ou, equivalentemente, a razão dos fluxos de passageiros e de ônibus:

$$K = \sum_i k_i = \Lambda / \Phi, \text{ para } \Lambda < \Lambda_{cap} \quad \text{Eq. 3.11}$$

A espera média global dos passageiros nas paradas continua sendo a metade do headway:

$$E[W] = H / 2, \text{ para } \Lambda < \Lambda_{cap} \quad \text{Eq. 3.12}$$

A fila média global é a soma das filas em cada parada:

$$E[Q] = \sum_i E[q_i], \text{ para } \Lambda < \Lambda_{cap} \quad \text{Eq. 3.13}$$

A velocidade operacional dos ônibus em um trecho com várias paradas e nenhum semáforo é determinada simplesmente por:

$$V_{op} = \frac{\sum_i L_i}{\sum_i (L_i / V_c + t_p + k_i / \mu + T_{da})}, \text{ para } \Lambda < \Lambda_{cap} \quad \text{Eq. 3.14}$$

onde  $L_i$  é o comprimento do trecho  $i$ ,  $V_c$  é a velocidade de cruzeiro,  $t_p$  o tempo perdido em cada parada,  $k_i$  o número de passageiros que embarcam em cada ônibus na parada  $i$ ,  $\mu$  a taxa de embarque e  $T_{da}$  o tempo gasto com a desaceleração e reaceleração dos ônibus para servir cada parada.

### 3.4. Conclusão

Um corredor de ônibus deve ser visto como um sistema de paradas em série. A capacidade do sistema, portanto, é limitada pela parada crítica, ou gargalo. A parada crítica é aquela que apresenta a maior relação entre demanda e capacidade.

Uma forma de aumentar a capacidade global do sistema é, naturalmente, aumentar a capacidade da parada crítica do sistema.

A análise apresentada de uma parada individual mostra os principais parâmetros que afetam a capacidade da parada e o nível de serviço no segmento da via que a contém. Desses parâmetros, a taxa de embarque de passageiros tem um papel fundamental, especialmente quando muitos passageiros embarcam por ônibus. Aumentar a taxa de embarque é, portanto, uma forma eficiente de aumentar a capacidade da parada, e é o objetivo por trás de medidas como plataformas de embarque elevadas, ônibus com portas largas e comboios de ônibus ordenados.

Uma outra forma de aumentar a capacidade global do sistema (sem necessariamente aumentar a capacidade das paradas individuais) é localizá-las de forma a melhor distribuir a demanda de acordo com a capacidade de cada uma. Assim, procura-se utilizar ao máximo a capacidade de todas as paradas simultaneamente.

Podem-se ainda introduzir novas paradas no sistema, de maneira a descarregar as demais. Cada parada atrai uma fração da demanda atraída anteriormente, e a capacidade global do sistema aumenta. Entretanto, nesse caso, a velocidade operacional cai, em função da menor fluidez do serviço, como mostra a Eq. 3.12.

Assim podem-se estabelecer dois princípios básicos de projeto:

1. Localizar as paradas de forma a atrair demandas proporcionais a suas capacidades;
2. A inclusão de paradas extras no sistema tende a aumentar a capacidade global do sistema, porém reduz a velocidade operacional dos ônibus.

Esses princípios serão testados na Seção 6.2, que trata da simulação de um corredor hipotético.

Como a modelagem analítica do sistema estocástico é bastante complexa, optou-se por desenvolver de um modelo de simulação, descrito no capítulo seguinte.

## **4. Descrição do modelo de simulação**

O capítulo anterior apresentou um modelo conceitual simplificado do funcionamento de uma parada de ônibus. Esse modelo revela os trade-offs básicos da operação de um corredor, e estabelece uma forma de análise de capacidade e nível de serviço.

Contudo, ele não é suficientemente detalhado para levar em conta as aleatoriedades dos processos reais, o que sugere o uso de técnicas mais sofisticadas de modelagem.

Embora a literatura contenha alguns exemplos de modelos analíticos, ou mistos de analítico e simulação (como o de Powell e Sheffi, 1983), esses modelos não são tão flexíveis para permitir maiores alterações no corredor estudado, e normalmente requerem a solução de expressões matemáticas bastante complexas. Daí a razão pela qual a simulação tem sido tão amplamente empregada neste tipo de análise.

Este capítulo descreve o desenvolvimento de um modelo de simulação da operação de um corredor de ônibus. O modelo foi escrito com a preocupação de se ater aos aspectos principais do sistema, e de ser flexível o suficiente para permitir as alterações que no futuro se julguem necessárias. A Seção 4.1 apresenta os objetivos do modelo. A Seção 4.2. descreve o modelo e sua implementação. A Seção 4.3 descreve os elementos do modelo. Finalmente, a Seção 4.4 apresenta suas principais simplificações.

### **4.1. Objetivos do modelo de simulação**

O objetivo principal do modelo de simulação desenvolvido é analisar o efeito de parâmetros estocásticos sobre o desempenho de um corredor de ônibus. Com isso, espera-se compreender melhor os mecanismos desse sistema, e estabelecer prioridades no controle das flutuações que ocorrem naturalmente nos sistemas reais.

Secundariamente, o modelo tem o objetivo de constituir uma ferramenta prática de análise da operação de corredores exclusivos de ônibus (e sistemas semelhantes), que permita comparar o desempenho do sistema sob diferentes alternativas de projeto físico (quantidade e localização de paradas e semáforos), operacional (características

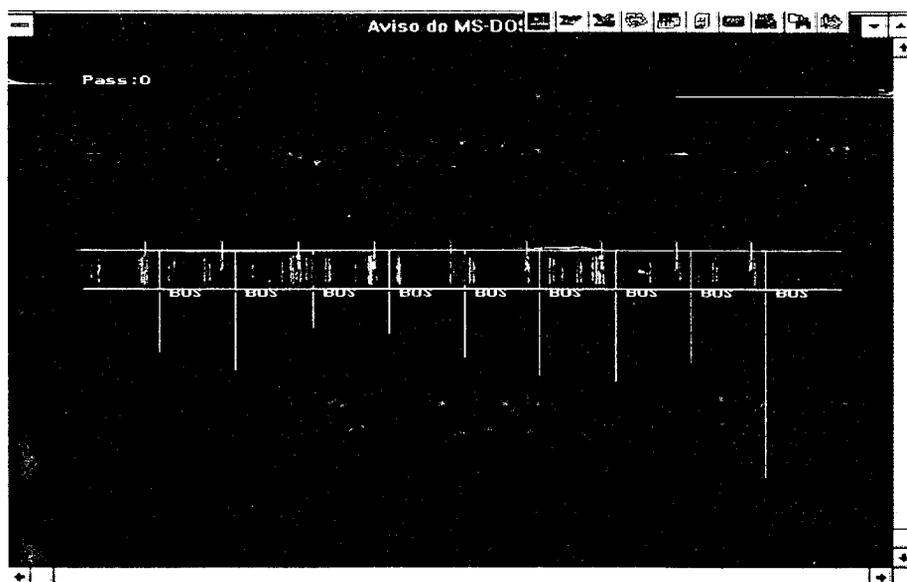
dos ônibus, dimensionamento da oferta, políticas de despacho e programação semafórica) e de demanda (intensidade e distribuição ao longo do corredor).

O modelo procura ser simples e computacionalmente bem organizado, para permitir refinamentos e eventuais mudanças que se julguem necessárias no futuro.

#### 4.2. Estrutura do modelo de simulação

O modelo simula o funcionamento de um corredor exclusivo de ônibus de faixa única, em sentido único, onde circulam ônibus que transportam passageiros entre paradas. Os passageiros são gerados a intervalos de tempos aleatórios, de acordo com uma matriz origem-destino dos fluxos de passageiros. Semáforos de tempo fixo também podem ser representados.

O modelo de simulação microscópica a eventos discretos foi implementado em um microcomputador do tipo IBM PC, na linguagem C, e usa a biblioteca MOSAIC de simulação. A biblioteca MOSAIC gerencia a execução dos eventos discretos, facilita a coleta de dados e cálculo das estatísticas, e a representação gráfica do sistema. O modelo dispõe de uma interface gráfica, útil para verificar o correto funcionamento do modelo, mas que pode ser desligada para acelerar a simulação. A Figura 4.1 apresenta a interface.



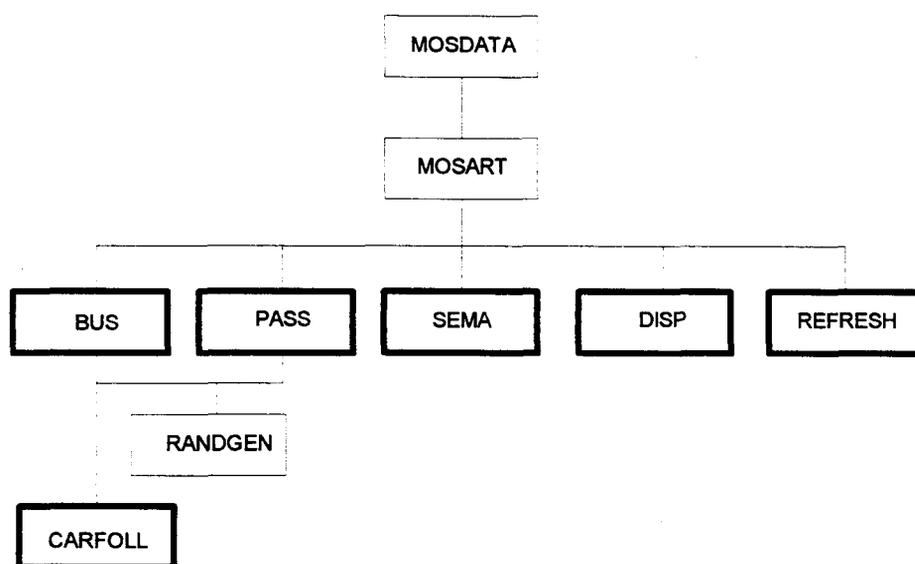
*Figura 4.1 - Interface gráfica do modelo de simulação*

A Figura 4.2 ilustra a estrutura do programa. Na estrutura representada, MOSART é o módulo principal. Este módulo gerencia os demais e imprime os resultados das estatísticas, que são facilmente coletadas e calculadas com a biblioteca MOSAIC.

MOSDATA tem como função ler o arquivo de dados, no formato texto, que define o sistema a ser simulado.

RANDGEN contém o algoritmo de geração de números aleatórios. O algoritmo implementado é o algoritmo proposto por Marse e Roberts (1983, apud Law e Kelton, 1991), e sugerido por Law e Kelton (1991), que apresentam detalhes e comparações entre este e outros algoritmos.

Os demais módulos, em destaque na Figura 4.2, são essenciais para compreensão do funcionamento do modelo e são descritos em detalhes na seção seguinte.



**Figura 4.2 - Estrutura do modelo de simulação**

A listagem completa do programa de simulação, que pode ser usada como referência, encontra-se em Anexo.

### **4.3. Entidades do modelo de simulação**

As entidades do modelo são ônibus, passageiros, semáforos, despachador de ônibus e reinicializador de estatísticas. Cada tipo de entidade tem um “script” próprio, que contém as instruções a serem seguidas pela entidade. Os scripts dos ônibus e dos

passageiros contêm também uma função de geração, que determina o instante da simulação em que uma nova entidade será inserida no sistema.

#### **4.3.1. Ônibus**

Os ônibus são controlados pelo módulo BUS da Figura 4.1. Os ônibus são gerados a intervalos de tempo aleatórios, segundo uma distribuição exponencial transladada, cujos parâmetros são definidos no arquivo de dados.

Uma série de estudos sugere que a distribuição exponencial transladada é conveniente para representar o intervalo de tempo entre a chegada de dois veículos em uma determinada seção de uma via (Gerlough e Huber, 1975; Danas, 1980). Gerlough e Huber (1975) sugerem, além da distribuição exponencial transladada, um série de outras distribuições mais complexas que dependem de vários parâmetros a serem calibrados, e que portanto são de mais difícil aplicação.

O controle sobre a variabilidade na chegada dos ônibus pode ser feita pela definição do parâmetro de translação da distribuição. Assim, podem-se simular desde situações em que a chegada dos ônibus é constante (fatores de translação igual a média) até situações em que o coeficiente de variabilidade é 100% (fator de translação zero).

O script dos ônibus consta das seguintes etapas:

- **Etapa 1 - Inicialização.** Nesta etapa, o modelo atribui a cada ônibus recém gerado as características que permanecerão constantes ao longo de sua vida na simulação. Estas características são o comprimento e a capacidade do ônibus, definidas deterministicamente no arquivo de dados, e a velocidade desejada, aceleração e desaceleração máximas, sorteadas de uma distribuição normal, com parâmetros definidos no arquivo de dados.
- **Etapa 2 - Inserção na área de ordenação.** Os ônibus já inicializados na etapa 1 são armazenados em uma área de ordenação, onde aguardam uma ordem de despacho enviada pela entidade despachadora (descrita adiante).
- **Etapa 3 - Progressão no corredor.** Essa etapa é responsável pela atualização da velocidade e posição dos ônibus, e se repete a cada intervalo de tempo. Consiste

da identificação dos obstáculos à frente do ônibus e da aplicação de um modelo de progressão, descrito a seguir. Quando o obstáculo à frente for uma parada de ônibus e o ônibus estiver pronto para iniciar os embarques e desembarques, então o ônibus permanece parado durante o tempo de serviço. O tempo de serviço é dado pela soma do tempo morto e dos tempos individuais de embarque de cada passageiro, que podem ser modelados como variáveis determinísticas ou estocásticas.

- **Etapa 4 - Remoção do ônibus do corredor.** Quando o ônibus chega ao final do corredor simulado, ou quando o tempo de simulação se esgota, o modelo remove do sistema o ônibus e todos os passageiros nele embarcados.

O modelo de progressão, responsável pela atualização da velocidade dos ônibus a cada incremento de tempo, se constitui de duas expressões independentes: uma para fluxo livre (quando não existem obstáculos que impedem os ônibus de acelerar livremente até a velocidade desejada), e outra para fluxo obstruído (quando outro veículo, semáforo ou parada de ônibus limitam a velocidade do ônibus). A velocidade que o ônibus assume ao final do cálculo é a menor das duas.

A expressão para velocidade de fluxo livre adotada na simulação se baseia em um modelo de aceleração linear. Segundo este modelo, a aceleração de um ônibus cai de seu valor máximo a zero linearmente no tempo. Este modelo tem a vantagem de depender apenas dos parâmetros aceleração máxima e velocidade desejada, o que o torna simples, rapidamente computável e mais fácil de calibrar. Este modelo foi usado também por Lindau no desenvolvimento dos modelos SIBULA e BUSWAY (Lindau, 1983; Michel et al, 1994). Sua formulação é:

$$v(t + \tau) = v(t) + A_{m\acute{a}x} \cdot (1 - v(t) / V_{des}) \cdot \tau \quad \text{Eq. 4.1}$$

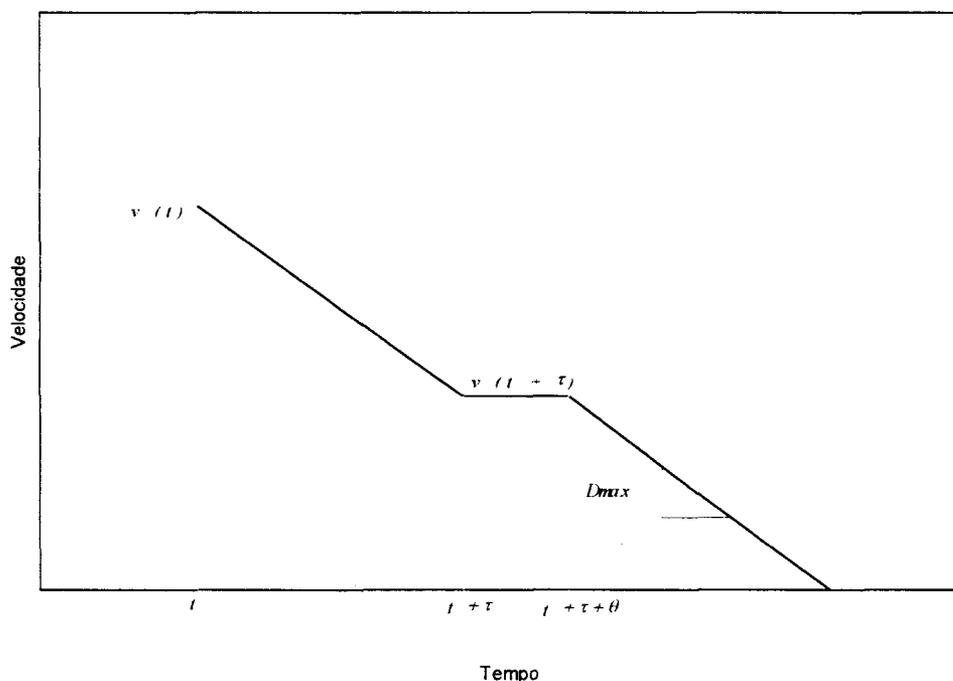
onde  $v(t)$  é a velocidade do veículo no instante  $t$ ,  $A_{m\acute{a}x}$  é a aceleração máxima,  $\tau$  é o incremento de tempo para cálculo e  $V_{des}$  é a velocidade desejada.

A expressão para velocidade de fluxo obstruído é a sugerida por Gipps (1981), e resulta de um diagrama tempo-velocidade como o mostrado na Figura 4.3. A velocidade máxima que um ônibus pode assumir em um instante  $t$  é tal que, caso o

ônibus que o precede inicie uma parada rápida, ele também possa parar sem que haja colisão. A expressão, que pode ser derivada do diagrama da Figura 4.3, é a seguinte:

$$v_i(t+\tau) = D_{max,i} \cdot \tau + \sqrt{D_{max,i}^2 \cdot \tau^2 - D_{max,i} \cdot \{2 \cdot S(t) - v_i(t) \cdot \tau - v_{i-1}^2(t) / \hat{D}_{max,i}\}} \quad \text{Eq. 4.2}$$

onde  $D_{max}$  é a desaceleração máxima do veículo,  $\hat{D}_{max}$  é uma estimativa da desaceleração máxima do veículo da frente,  $S(t)$  é o espaçamento entre veículos (distância entre veículos descontado o comprimento do veículo da frente). Os índices representam a posição dos veículos na corrente de tráfego.



**Figura 4.3 - Diagrama tempo-velocidade para fluxo obstruído**

A área do diagrama da Figura 4.3 corresponde a distância percorrida pelo veículo  $i$ . Essa distância tem de ser menor que a soma da distância percorrida pelo veículo  $i - 1$  e o espaçamento inicial entre os veículos  $i$  e  $i - 1$ . O parâmetro  $\theta$  conta por uma margem de segurança para o tempo de reação do motorista. Quanto maior for seu valor, mais “cautelosos” serão os motoristas. Gipps (1981) demonstra que  $\theta = \tau/2$ , é um valor razoável e resulta em um fluxo suave e estável.

Gerlough e Hubber (1975) apresentam outros modelos de progressão, como o de Greenberg, baseado em relações do tipo *resposta = sensibilidade x estímulo*. Estes

modelos porém, ao contrário do proposto por Gipps, dependem de uma série de parâmetros que não têm correspondência direta com características mecânicas dos veículos, e que devem ser calibradas para diferentes situações de fluxo.

#### **4.3.2. Passageiros**

A exemplo dos veículos, os passageiros são gerados conforme uma distribuição exponencial transladada. Embora não existam razões teóricas para um fator de translação, este foi incorporado para que se tenha controle sobre a variabilidade do processo. Teoricamente é razoável supor que a chegada de passageiros em uma parada de ônibus segue um processo de Poisson, e que portanto o intervalo entre chegadas se distribui segundo uma exponencial. Danas (1980) e Chapman et al (1976) verificaram experimentalmente e validaram essa suposição. Vijayakumar e Jacobs (1990), Anderson et al (1979) e Lindau (1983) também usaram essa distribuição em modelos de simulação para descrever o processo de chegada de passageiros nas paradas.

O script dos passageiros consta das seguintes etapas:

- ***Etapas 1 - Inicialização.*** O modelo atribui a cada passageiro recém gerado as características que permanecerão constantes ao longo de toda sua vida de simulação. Estas características são as paradas de origem e destino e as linhas de ônibus apropriadas ao tipo de passageiro gerado. Estas características são definidas deterministicamente no arquivo de dados, para cada tipo de passageiro modelado.
- ***Etapas 2 - Espera pelo ônibus apropriado.*** Após a inicialização do passageiro, o modelo o coloca na parada de origem e avisa a todos os ônibus apropriados àquele passageiro de sua presença. O passageiro aguarda então a chegada de um ônibus.
- ***Etapas 3 - Remoção do passageiro do corredor.*** O modelo remove um passageiro do sistema quando ele atinge sua parada de destino ou quando o ônibus que o transporta atinge o fim do corredor.

### 4.3.3. Semáforos

Os parâmetros que caracterizam os semáforos são posição, tempos de verde, amarelo e vermelho, e a defasagem em relação ao primeiro semáforo (*offset*). É importante observar que para o modelo de progressão dos ônibus, os sinais vermelho e amarelo são tratados indistintamente. Quando um ônibus se aproxima de um semáforo amarelo ou vermelho, ele calcula a desaceleração necessária para não passar pelo semáforo. Se essa desaceleração calculada for maior que a desaceleração especificada, então o ônibus ignora o semáforo. Caso contrário, ele inicia o procedimento de parada.

As etapas do script dos semáforos são bastante simples:

- **Etapa 1 - Inicialização.** O modelo atribui a cada semáforo as características definidas no arquivo de dados. Estas características são a posição do semáforo no corredor, os tempos de verde, amarelo e vermelho, e a defasagem temporal em relação ao primeiro semáforo (*offset*).
- **Etapa 2 - Troca de fases.** O modelo troca periodicamente o estado dos semáforos, de verde para amarelo para vermelho. O estado do semáforo será considerado um obstáculo para os ônibus se seu estado for amarelo ou vermelho. Se estiver no estado verde, o semáforo é ignorado pelos ônibus.

### 4.3.4. Entidade despachadora

A entidade despachadora é a entidade que decide quais os ônibus que entrarão no corredor a cada ciclo. O modelo permite a simulação de duas políticas de despacho: convencional e ordenada.

Na política de despacho convencional, uma quantidade máxima de ônibus é despachada a cada ciclo, obedecendo à disciplina FIFO (*first-in, first-out*).

Na política de despacho ordenado, os ônibus a serem despachados em cada ciclo são ordenados conforme seus tipos antes de ingressarem no corredor. Estatísticas quanto ao tempo de espera dos ônibus na estação ordenadora e à fila de ônibus na estação ordenadora estão disponíveis ao usuário.

O script da entidade despachadora consiste simplesmente das duas etapas seguintes:

- ***Etapas 1 - Inicialização.*** O modelo identifica a política de operação a simular. Se a política for de comboio ordenados de ônibus, então o modelo lê a as linhas e quantidades de ônibus que compõem o comboio.
- ***Etapas 2 - Despacho dos ônibus.*** Quando um ciclo de despacho se completa, a entidade despachadora envia um sinal aos ônibus que aguardam na estação ordenadora para que prossigam no corredor (Etapas 3 do script dos ônibus). Se a política de despacho for ordenada, esse sinal chega antes aos ônibus do tipo 1, depois aos ônibus do tipo 2 e assim por diante. Caso contrário, o sinal chega antes para os ônibus que foram gerados a mais tempo e depois para os ônibus que foram gerados mais recentemente.

#### ***4.3.5. Reinicializador de estatísticas***

Para que as estatísticas não sejam contaminadas pelos instantes iniciais da simulação, quando o sistema ainda se encontra relativamente ocioso, a entidade reinicializadora atua no modelo após um período de relaxação (“warm-up”). O período de relaxação deve ser suficiente para garantir que os primeiros ônibus gerados pelo sistema tenham atingido o fim do corredor. A interface gráfica pode ser usada para ajudar a estimar esse período.

#### **4.4. Principais simplificações do modelo de simulação**

Todo modelo envolve simplificações. Um bom modelo é aquele cujo grau das simplificações torna fácil analisar o problema sem comprometer seus aspectos fundamentais. Por isso é importante que se tenham claros os objetivos do modelo, para que se possa avaliar o impacto das simplificações incorporadas.

A maioria das simplificações do modelo desenvolvido para os fins desta pesquisa são comuns a vários outros modelos revisados na literatura. A seguir, listam-se as principais:

- ***A oferta e a demanda são constantes no tempo.*** Os parâmetros das distribuições que geram ônibus e passageiros são constantes ao longo de toda a simulação. No sistema real, tanto a oferta como a demanda são fenômenos que variam no tempo, sendo maiores nas horas de pico e menores nas horas entre-picos. Portanto, a aplicação do modelo é recomendável para situações em que a oferta e a demanda são aproximadamente constantes no tempo, como, por exemplo, na hora-pico.
- ***O desempenho dos ônibus independe da ocupação.*** Os parâmetros do modelo de progressão dos ônibus são constantes ao longo de toda a simulação. Na realidade, o desempenho dos ônibus varia ao longo do corredor, a medida em que os ônibus se tornam mais cheios ou mais vazios. Porém, essa variação é de difícil quantificação, e na ausência de dados mais precisos, considerou-se essa simplificação satisfatória.
- ***Os passageiros não têm poder de decisão.*** Essa talvez seja a principal simplificação do modelo. Quando existe uma fila de passageiros em uma parada e uma fila de ônibus aguardando para entrar na parada, os passageiros tentam sempre embarcar nos ônibus que já estão na parada, até que a capacidade do ônibus se esgote. Na realidade, é comum que um passageiro desista de embarcar em um ônibus que esteja na parada para embarcar em um próximo ônibus. Modelar essa decisão do passageiro seria importante para representar com mais precisão o processo real. Contudo, essa seria uma tarefa complexa, e acredita-se que a simplificação tenha impacto semelhante sobre os todos os cenários simulados, e por isso não invalida os resultados.
- ***O modelo de progressão não foi desenvolvido para ônibus.*** O modelo de progressão de Gipps, bem como os demais pesquisados na literatura, foram desenvolvidos para automóveis. Entretanto, esse modelo tem a vantagem de ser o mais simples dos modelos pesquisados, é mais facilmente computável que os demais e já foi usado com sucesso no modelo BUSWAY.

## **4.5. Parâmetros de calibração e validação**

Em estudos de simulação, são fundamentais as etapas de calibração e validação do modelo. A calibração é o processo de ajuste dos parâmetros do modelo de forma a representar um sistema em particular. A validação é o processo de aceitação do modelo como uma boa representação do sistema, através da comparação entre os resultados simulados e alguns outros resultados de referência. Em geral, os resultados de referência são obtidos empiricamente, mas podem também derivar de outros modelos mais consagrados.

### **4.5.1. Calibração**

Os parâmetros de calibração do modelo apresentado são os parâmetros de desempenho, comprimento e capacidade dos ônibus, tempo perdido e tempo de embarque por passageiro nas paradas e o incremento de tempo da simulação.

#### **Comprimento, capacidade e desempenho dos ônibus**

O comprimento e a capacidade dos ônibus são parâmetros correlacionados e que variam muito dependendo do fabricante e do modelo de ônibus. Nos países hispânicos da América Latina são comuns os micro-ônibus. No Brasil, utilizam-se ônibus maiores, e são comuns também os veículos articulados e bi-articulados.

Nas simulações dos capítulos seguintes, adotaram-se ônibus de 12 metros de comprimento efetivo (isto é, comprimento do veículo mais um espaçamento mínimo a ser respeitado pelo veículo de trás), e capacidade para até 120 passageiros por ônibus, em condições críticas.

Quanto aos parâmetros de desempenho dos ônibus, infelizmente a literatura pesquisada não apresenta valores específicos para uso no modelo de progressão adotado. A Tabela 4.1 é um resumo de valores disponíveis.

<b>Referência: Gipps (1981)</b>		<b>Tipo de veículo: automóvel</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Média</b>	<b>D.P.</b>
$V_{des}$ (m/s)	Normal	20	3.2
$A_{máx}$ (m/s <sup>2</sup> )	Normal	1.7	0.3
$D_{máx}$ (m/s <sup>2</sup> )	função de $A_{máx}$	-2 $A_{máx}$	0
<b>Referência: DUEWAG (1991)</b>		<b>Tipo de veículo: VLT</b>	
$V_{des}$ (m/s)	Determinístico	11.1	0
$A_{máx}$ (m/s <sup>2</sup> )	Determinístico	1.1	0
$D_{máx}$ (m/s <sup>2</sup> )	Determinístico	-2.8	0
<b>Referência: Lindau (1981)</b>		<b>Tipo de veículo: ônibus</b>	
$V_{des}$ (m/s)	Normal	10.8	1.9
$A_{máx}$ (m/s <sup>2</sup> )	Normal	1.25	0.1
$D_{máx}$ (m/s <sup>2</sup> )	Normal	-0.95	0.2

**Tabela 4.1 - Parâmetros de desempenho de veículos**

Embora os valores citados por Lindau (1981) sejam relativos a ônibus, eles foram calibrados de forma a obter uma boa concordância entre o modelo de progressão adotado em SIBULA (modelo modificado de Greenberg) e observações empíricas da progressão de ônibus na avenida Farrapos em Porto Alegre. Por isso, esses valores não são diretamente aplicáveis no modelo de Gipps, cuja formulação segue um princípio diferente.

Contudo, a falta de parâmetros precisos para calibrar o modelo de progressão não representa um empecilho importante para os fins deste trabalho, que procura demonstrar o mecanismo de funcionamento de um corredor de ônibus e a aplicabilidade de princípios de projeto. Parâmetros mais precisos seriam fundamentais na elaboração de um modelo preditivo, onde não somente o desempenho relativo do sistema sob diversos cenários é importante, mas também os resultados absolutos.

Nas simulações seguintes, adotaram-se para as médias os seguintes valores:

$$V_{des} = 50 \text{ km/h};$$

$$A_{máx} = 0.8 \text{ m/s}^2;$$

$$D_{máx} = -1.6 \text{ m/s}^2.$$

Os desvios padrão variam conforme a simulação, tendo como referência coeficientes de variação da ordem de 10%.

### **Tempo perdido e tempo de embarque por passageiro**

Como foi visto no Capítulo 2, tanto o tempo perdido como o tempo de embarque por passageiro dependem de uma série de fatores.

O tempo perdido depende fundamentalmente da coordenação entre ônibus e passageiros, tendendo a ser pequeno em paradas bem organizadas (com despacho ordenado, por exemplo) ou quando o fluxo de ônibus é relativamente pequeno.

O tempo de embarque por passageiro depende do número e largura das portas, dos degraus a serem vencidos pelos passageiros, da quantidade e distribuição dos passageiros já embarcados no interior do veículo, da forma com que é cobrada a tarifa e outros.

Baseado nos valores disponíveis em Gardner et al (1991), e considerando paradas relativamente bem organizadas, adotaram-se como referência os mesmos valores utilizados na análise do Capítulo 2, ou seja, tempo perdido ( $t_p$ ) = 5 segundos e tempo de embarque por passageiro ( $1/\mu$ ) = 2 segundos/passageiro.

### **Incremento de tempo da simulação**

Na modelagem de tráfego com simulação microscópica a incrementos fixos de tempo, é recomendável que esse incremento fixo seja da ordem do tempo de reação dos motoristas. Gipps (1981), por exemplo, sugere incrementos de tempo de 0.6 segundos para modelar o tráfego de automóveis.

Por uma questão de simplificação, e a exemplo de grande parte de modelos de simulação de corredores de ônibus (Lindau, 1983; Michel et al, 1994), o incremento de tempo usado nas simulações dos capítulos seguintes é de um segundo.

#### **4.5.2. Validação**

O modelo de simulação descrito neste capítulo não passou por um processo formal de validação. Esse processo exigiria uma calibração cuidadosa do modelo, além da coleta de uma massa relativamente grande de dados para comparação dos resultados práticos e simulados, que vai além do escopo e dos objetivos deste trabalho.

Ainda assim, nos capítulos seguintes a consistência dos resultados da simulação é verificada pela comparação com os resultados previstos pelo modelo conceitual e com os resultados publicados por Scheel e Foote (1968).

## 5. Simulação de uma parada

Até aqui, apresentaram-se um modelo conceitual simples do funcionamento de uma parada e de um sistema com paradas em série, e um modelo de simulação de um sistema com paradas e semáforos em série, que permite introduzir parâmetros estocásticos.

Neste capítulo, a Seção 5.1 compara os resultados obtidos com os modelos conceitual e de simulação, considerando um sistema determinístico. A Seção 5.2 apresenta uma análise de sensibilidade a efeitos estocásticos introduzidos no sistema. Finalmente, a Seção 5.3 apresenta as principais conclusões dos experimentos.

### 5.1. Comparação dos modelos conceitual e de simulação

Essa seção visa a verificar a consistência entre os modelos conceituais do Capítulo 3 e o modelo de simulação descrito no Capítulo 4. Os casos apresentados aqui servem como um teste do simulador.

Os testes desta seção foram feitos com os parâmetros apresentados na Tabela 5.1.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Número de berços da parada ( $n$ )	1, 3 e 6 berços
Comprimento do trecho	500 metros
Posição da parada	250 metros
Velocidade desejada ( $V_{des}$ )	50 km/h
Aceleração máxima ( $A_{máx}$ )	0.8 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração máxima ( $D_{máx}$ )	-1.6 m/s <sup>2</sup>
Comprimento dos ônibus	12 metros
Capacidade dos ônibus	120 passageiros
Passageiros embarcados por ônibus ( $k$ )	{5, 10, 15, 20}
Tempo perdido ( $t_p$ )	5 segundos
Tempo de embarque por passageiro ( $1/\mu$ )	2 segundos/passageiro
Headway entre ônibus em comboio	6 segundos
Headway entre comboios	variados ( $\lambda/k$ )
Tempo de simulação	2 horas
Estatísticas	referentes a última hora

***Tabela 5.1 - Parâmetros da simulação determinística***

### **5.1.1. Parada com um berço**

A Figura 5.1 mostra as curvas de velocidade versus demanda de passageiros na parada de acordo com o modelo conceitual da Seção 3.1, e os resultados simulados.

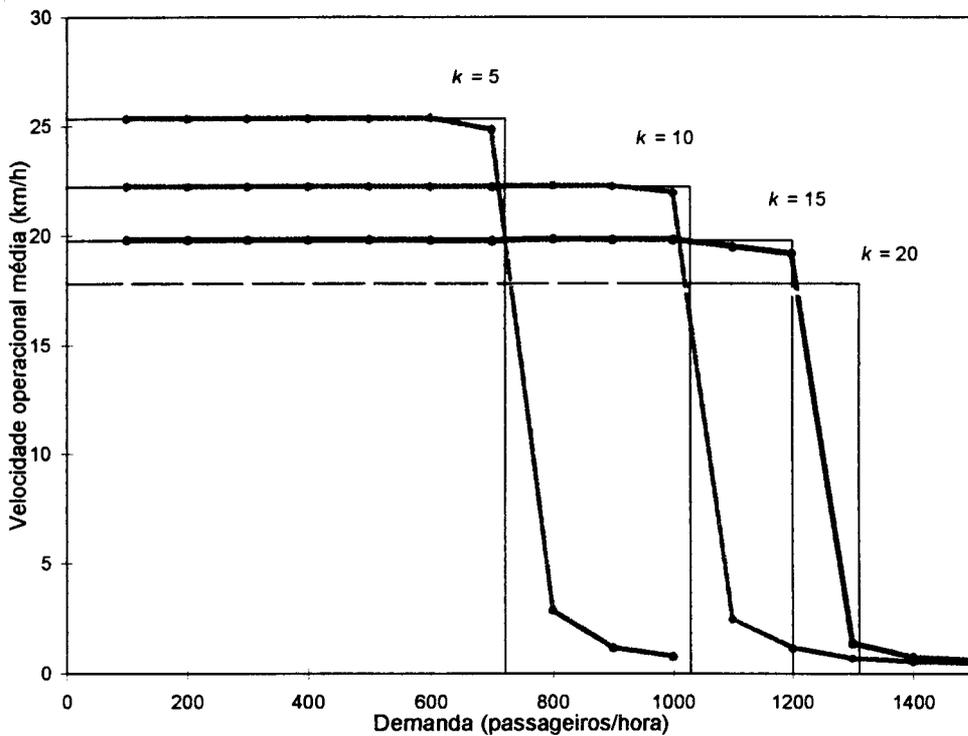
O sistema consiste de um trecho de 500 metros, com uma parada de um berço (a parada tem 12 metros de comprimento) no meio do trecho. Cada ponto da figura corresponde a uma simulação de 2 horas, sendo as estatísticas referentes apenas a última hora. A razão de reinicializar as estatísticas após a primeira hora de simulação é evitar que as estatísticas sejam contaminadas pelos instantes iniciais da simulação, quando o sistema funciona relativamente bem mesmo para demandas um pouco superiores a capacidade.

Como se pode observar, existe uma boa concordância entre os resultados. A queda abrupta da velocidade operacional dos ônibus ocorre a partir do momento em que uma demanda elevada obriga os ônibus a permanecer na parada um tempo maior que o intervalo até a chegada do próximo ônibus, formando-se assim uma fila de ônibus na entrada da parada.

Se considerássemos um sistema estocástico, é possível que essa situação durasse um certo período de tempo e depois revertesse, ou seja, que se alternassem períodos de crescimento e diminuição de fila (isso será verificado mais adiante).

No sistema determinístico, essa fronteira (a demanda crítica) é mais bem definida, e, quando atingida, as filas crescem sempre (ou seja, o sistema diverge).

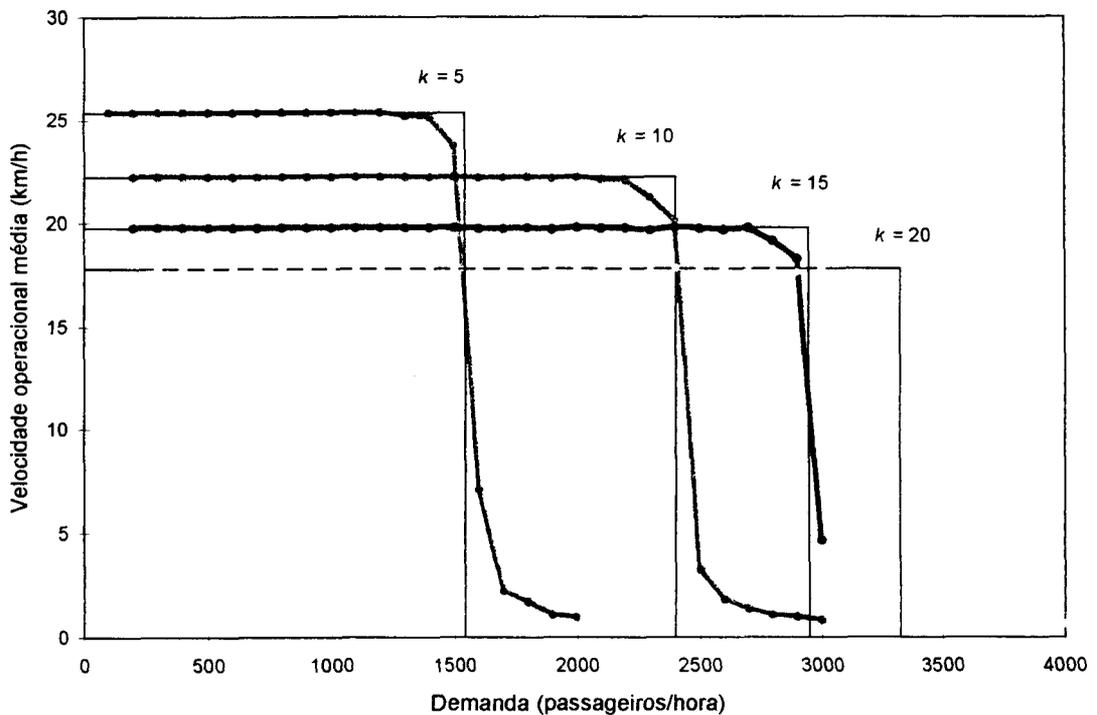
É interessante observar que apesar da situação simulada ser totalmente determinística, os pontos da Figura 5.1 não se distribuem tão suavemente como se poderia imaginar, especialmente para as taxas de ocupação elevadas. A razão disso são pequenas defasagens entre as chegadas de ônibus e passageiros nas paradas, originadas pelas condições iniciais do sistema, especificamente ao instante em que o primeiro passageiro é gerado e o instante que o primeiro ônibus chega na parada. Na simulação estocástica, as condições iniciais são menos importantes, já que o desempenho do sistema flutua naturalmente em torno da média.



**Figura 5.1 - Demanda versus velocidade operacional média  
(caso determinístico, 1 berço)**

### 5.1.2. Parada com múltiplos berços

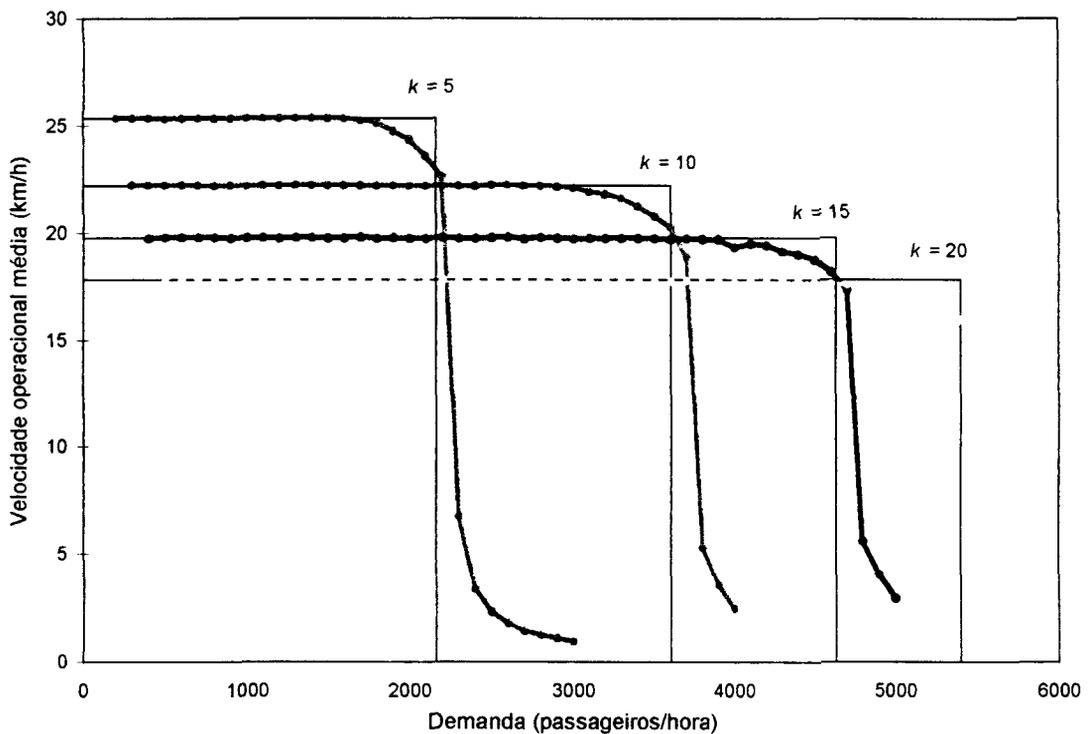
A Figura 5.2 mostra as curvas de velocidade versus demanda em uma parada com três berços de acordo com o modelo conceitual da Seção 3.3, e os resultados simulados. Novamente, observa-se que a simulação reproduz bem os resultados previstos pelo modelo conceitual, especialmente para valores baixos de  $k$ .



**Figura 5.2 - Demanda versus velocidade operacional média  
(caso determinístico, 3 berços)**

A queda de velocidade neste caso de uma parada de 3 berços é menos abrupta que no caso anterior, de uma parada com um berço. A razão disto é que um pouco antes do sistema atingir a capacidade, começam a ocorrer interferências entre os ônibus. Essa interferência significa que os motoristas já não aceleram e freiam livremente, mas se encontram restringidos pela presença de outros ônibus no sistema.

A Figura 5.3 mostra as curvas de velocidade versus demanda em uma parada com seis berços de acordo com o modelo conceitual da Seção 3.3, e os resultados simulados.



**Figura 5.3 - Demanda versus velocidade operacional média (caso determinístico, 6 berços)**

Novamente, observa-se que existe uma concordância entre os resultados. Esses resultados sugerem que o modelo de simulação funciona satisfatoriamente e que pode ser usado em análises mais complexas.

## 5.2. Análise de sensibilidade a efeitos estocásticos

Com o modelo de simulação, é fácil incluir estocasticidade no sistema. As seções seguintes mostram os resultados simulados levando em conta os fenômenos estocásticos geralmente presentes no sistema real. Esses fenômenos estocásticos são incluídos um por vez, para que o impacto de cada efeito possa ser analisado separadamente.

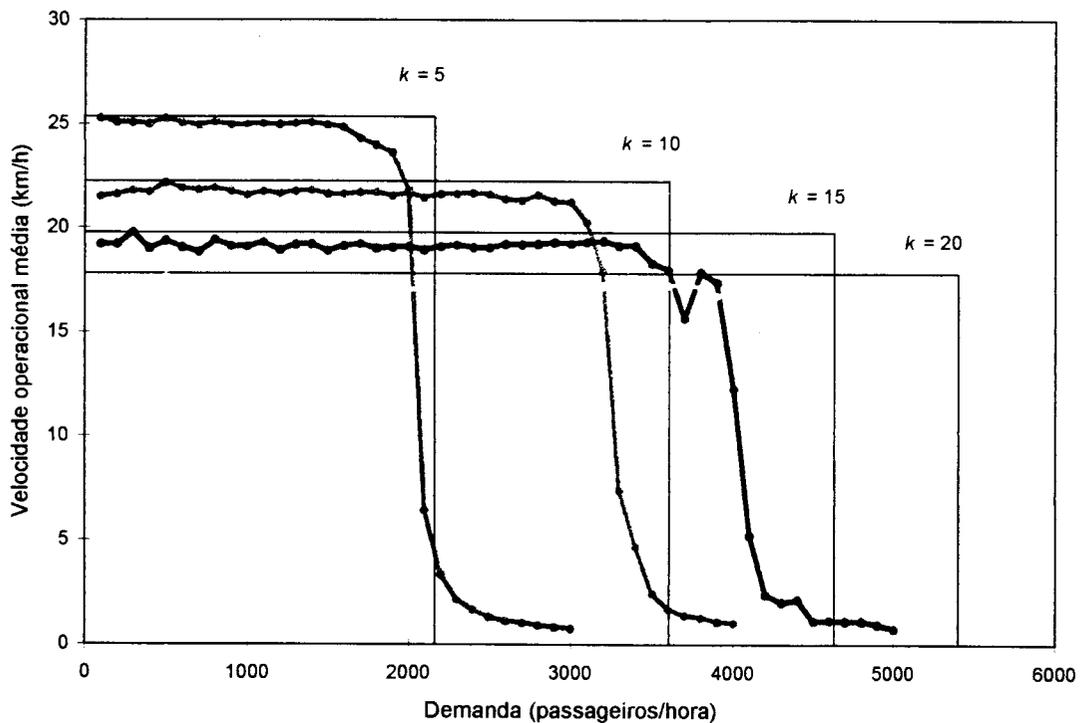
É importante observar que em um sistema estocástico, a capacidade não é tão bem definida como no sistema determinístico. Não existe uma demanda limite, abaixo da qual o sistema funciona bem, e acima da qual o sistema entra em um processo contínuo de deterioração. Em um sistema estocástico, esta transição se dá de forma gradual.

Portanto, não se buscará necessariamente um valor absoluto que corresponda a capacidade de uma parada ou corredor, mas principalmente uma faixa de demanda para qual o nível de serviço (velocidade operacional, tempos de espera de passageiros, filas de passageiros nas paradas e ocupação dos veículos) esteja dentro de limites razoáveis.

### 5.2.1. Efeito da demanda estocástica

A demanda é claramente um fenômeno estocástico, e sobre o qual se tem pouco controle. Para incluir esse efeito na simulação, como é comumente feito, foi assumido que os passageiros chegam na parada a intervalos aleatórios, segundo um processo de Poisson.

A Figura 5.4 mostra o desempenho da parada sujeita a estocasticidade apenas na demanda. Os demais parâmetros continuam determinísticos.



**Figura 5.4 - Efeito da demanda estocástica**

Como se pode observar, a discrepância entre os resultados determinísticos e estocásticos se torna mais significativo à medida em que o número médio de embarques por ônibus ( $k$ ) aumenta. Isso era esperado, já que para valores grandes de  $k$ , cresce também a variância do número de passageiros embarcados por ônibus.

Esse comportamento mostra que a estocasticidade da demanda faz com que a redução no acréscimo marginal de capacidade da parada devido ao maior carregamento de cada ônibus seja mais significativa que no caso determinístico.

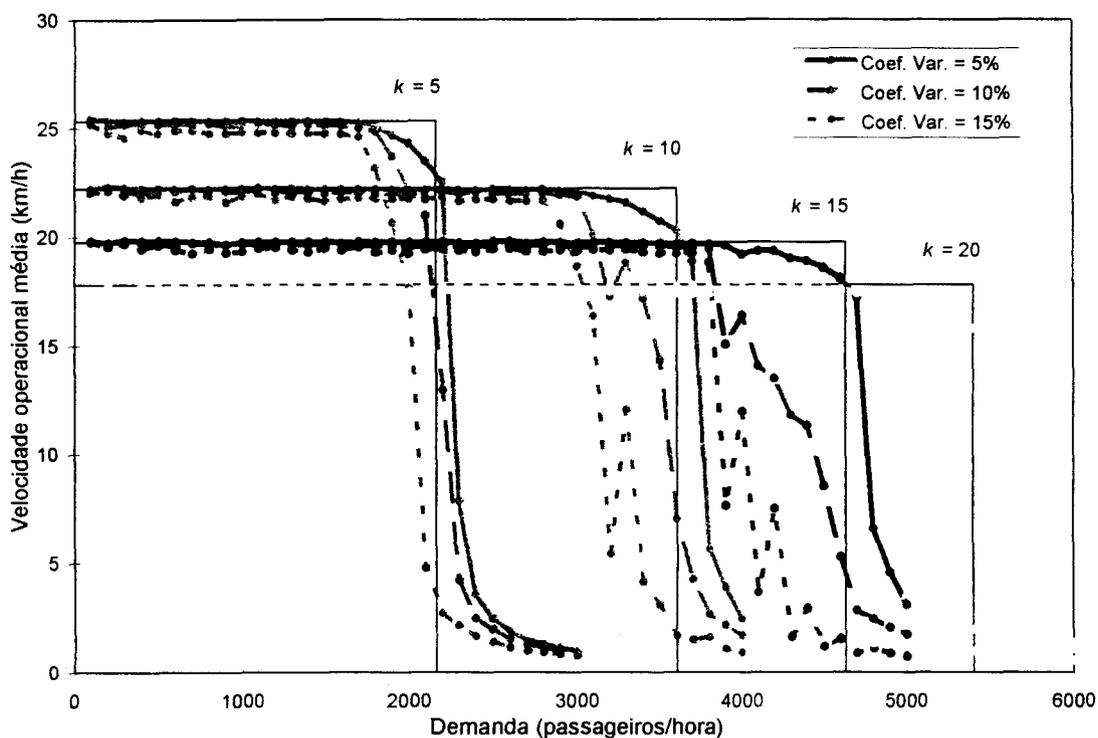
### ***5.2.2. Efeito do desempenho estocástico dos ônibus***

O desempenho dos ônibus também está sujeito a variações estocásticas. Estas variações se originam das diferentes formas de condução dos veículos pelos motoristas e das diferenças entre veículos (por exemplo, modelo e estado de conservação).

Infelizmente, dados relativos ao desempenho dos ônibus são escassos, e por isso é difícil determinar com precisão a que distribuição pertencem e quais os parâmetros desta distribuição.

O propósito desta análise é principalmente avaliar a sensibilidade do desempenho do sistema à variabilidade desses parâmetros. Por isso, assumimos que a aceleração e desaceleração máximas tenham uma distribuição Normal. A velocidade desejada permanece como um parâmetro determinístico, já que para uma seção curta do corredor seu efeito não é tão importante.

A Figura 5.5 mostra os resultados simulados para coeficientes de variação de 5, 10 e 15%, nos parâmetros aceleração máxima e desaceleração máxima, simultaneamente (assumiu-se que a desaceleração máxima é duas vezes aceleração máxima).



**Figura 5.5 - Efeito do desempenho estocástico dos ônibus**

A variabilidade na aceleração e desaceleração máxima dos ônibus tem efeitos tanto na velocidade operacional dos ônibus como na capacidade do sistema. O aspecto importante aqui é que, quando um ônibus com aceleração e desaceleração maiores que a média entra no sistema, o benefício potencial para o sistema como um todo é muito pequeno, já que este ônibus está restrito à progressão do ônibus da frente.

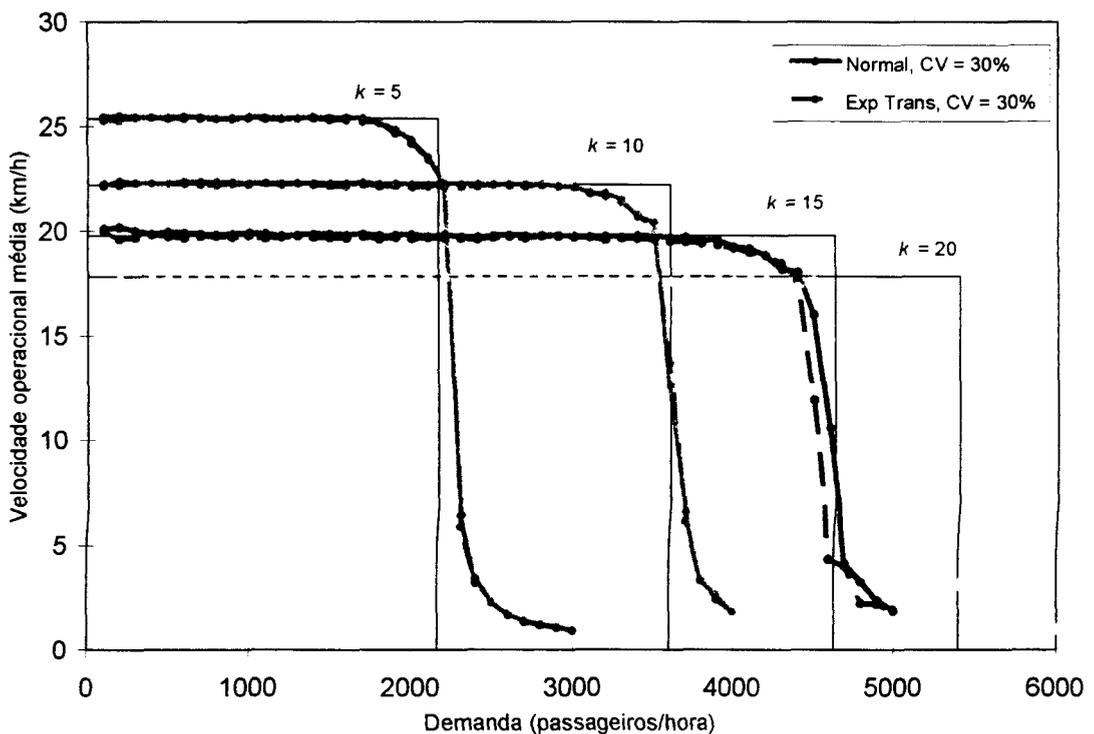
Por outro lado, quando um ônibus mais lento ingressa no sistema, ele bloqueia os ônibus que ingressam depois, incluindo os mais rápidos. Este é um fenômeno comum em sistemas em série. Fazendo uma analogia grosseira com uma corrente formada por elos, a resistência da corrente é dada pela resistência do elo mais fraco.

A Figura 5.5 mostra que o efeito isolado da variabilidade da aceleração e desaceleração máximas dos ônibus tem um efeito relativamente modesto no desempenho da parada para coeficientes de variação da ordem de 5 ou 10%. O sistema se torna bastante instável e reduções mais significativas de capacidade ocorrem para coeficientes de variação maiores, próximos a 15%. Logicamente, este efeito se torna mais importante se uma seção maior do corredor é considerada, porque aí os ônibus lentos “atrapalham” o sistema por mais tempo, podendo formar longas filas (“bus bunching”).

### 5.2.3. Efeito do tempo de embarque estocástico

O tempo de embarque dos passageiros ( $1/\mu$ ) é geralmente tratado como uma função linear do número de passageiros que embarcam. Sabe-se, porém, que isto não é verdade. São vários os fatores que tornam o tempo de embarque uma variável estocástica, como por exemplo a distribuição dos passageiros ao redor da parada, a idade dos passageiros, a disposição dos passageiros que já se encontram no interior dos ônibus e outros.

A Figura 5.6 mostra o efeito da estocasticidade do tempo de embarque por passageiro no desempenho da parada. Duas distribuições foram testadas: tempo de embarque por passageiro com distribuição Normal e coeficiente de variação de 30%, e tempo de embarque por passageiro distribuído conforme uma exponencial transladada, também com coeficiente de variação de 30%. Com isso procurou-se identificar diferenças significativas no desempenho da parada devidas a distribuições distintas dos tempos de embarque por passageiro.



**Figura 5.6 - Efeito do tempo de embarque estocástico**

Observa-se que o efeito da variabilidade no tempo de embarque por passageiro em ambas distribuições, para um coeficiente de variação de 30, é relativamente pouco

importante (vale salientar que esse coeficiente de variação de 30% é alto para uma distribuição Normal). A razão disso é que o tempo de embarque total é uma soma de variáveis. Nesse caso, ao contrário dos anteriores, um passageiro rápido cancela o atraso de um passageiro lento. Matematicamente, a média de uma soma de variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas é simplesmente a soma das médias, e a variabilidade da soma cresce com a raiz quadrada do número de parcelas.

#### 5.2.4. Efeito do tempo perdido estocástico

O tempo perdido na abertura e fechamento de portas mais aproximação dos passageiros também pode ser modelado como um parâmetro estocástico. Contudo, a literatura fornece apenas valores médios para esse parâmetro, e não caracteriza sua distribuição.

Para analisar a sensibilidade do sistema a flutuações nesse parâmetro, foram usadas duas distribuições distintas: uma Normal e uma exponencial transladada, ambas com média 5 segundos e coeficiente de variação 30%.

A Figura 5.7 mostra os resultados obtidos.

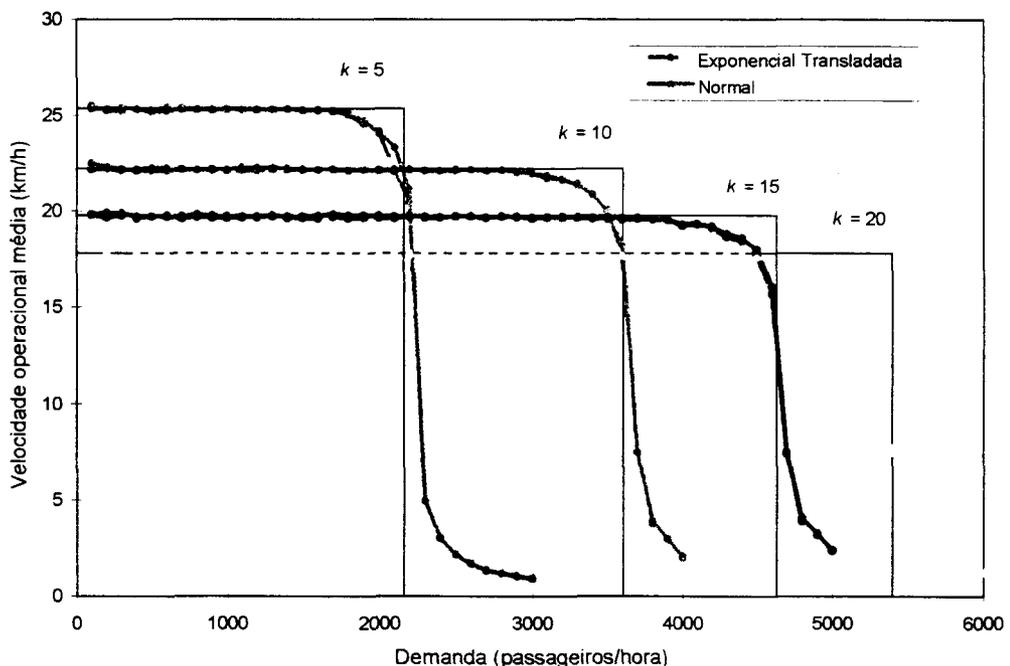


Figura 5.7 - Efeito do tempo perdido estocástico

A Figura 5.7 mostra que praticamente não há diferença entre os resultados, e que o efeito desse parâmetro é pequeno para os valores adotados.

### ***5.2.5. Efeito da oferta estocástica***

A regularidade da chegada de ônibus nas paradas normalmente é comprometida por diversas razões: atrasos em semáforos, irregularidade nos tempos gastos nas paradas anteriores (a demanda é um parâmetro intrinsecamente estocástico) e irregularidade na progressão dos ônibus nos trechos livres (devido a diferenças no desempenho dos ônibus ou na forma de condução dos motoristas). Como resultado, os headways entre ônibus e a ordem de chegada das diversas linhas de ônibus são também parâmetros estocásticos.

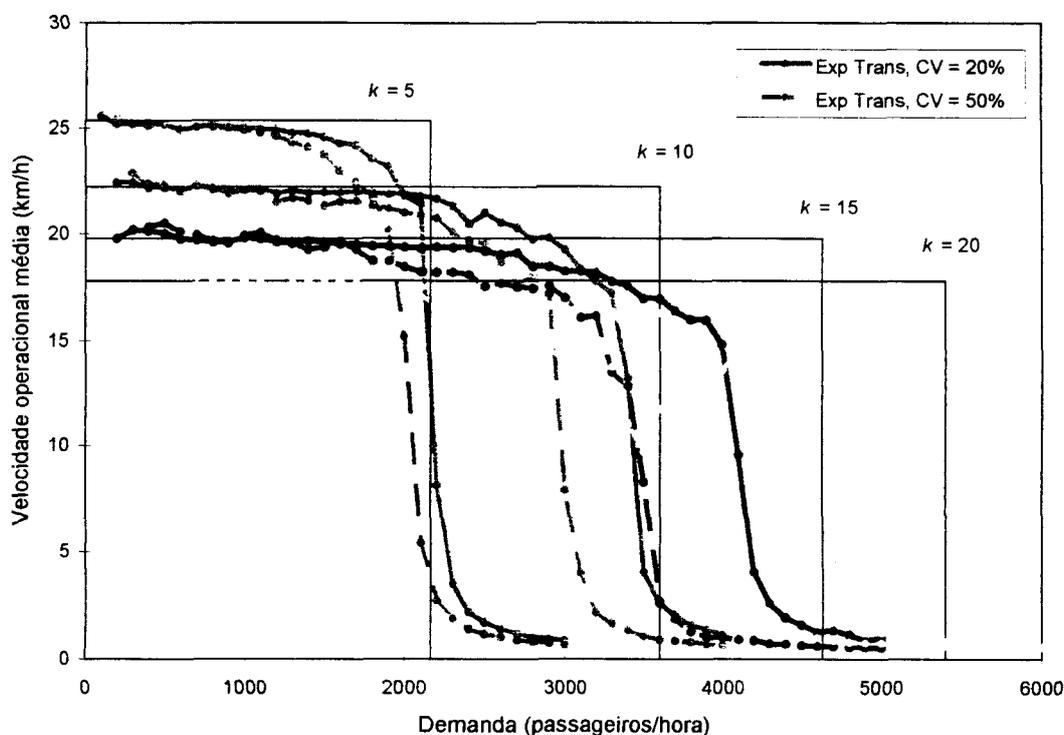
A estocasticidade na oferta pode se manifestar sob três formas:

- Headways irregulares;
- Comboios incompletos;
- Comboios desordenados.

#### **Headways irregulares**

Para analisar esse fenômeno, foram introduzidos na simulação ônibus com headways distribuídos segundo uma exponencial transladada com coeficientes de variação de 20 e 50%. Esses coeficientes de variação refletem uma condição de tráfego mais intenso, como é provável ocorrer em um corredor de ônibus. Processos de Poisson, com coeficiente de variação 100%, são apropriados para a modelagem de situações de tráfego leve.

A Figura 5.8 mostra os resultados obtidos.



**Figura 5.8 - Efeito do headway estocástico**

O gráfico mostra que esse é o parâmetro de maior impacto. Além de reduzir a capacidade do sistema, ele reduz a velocidade operacional mesmo para demandas consideravelmente menores do que a capacidade do sistema sob condições determinísticas.

### **Comboios incompletos**

Podem ser despachados comboios incompletos, em que algumas linhas não são representadas. Com isso, o número de passageiros da linha que falta em um comboio irá se acumular até a chegada do próximo, aumentando o número de passageiros embarcados ( $k$ ), o tempo de embarque para aquela linha, e, conseqüentemente, o tempo do comboio na parada.

Esse efeito é conceitualmente similar ao de flutuações na demanda, já descrito anteriormente. Na prática, se houver muitas linhas no corredor, esse efeito se torna menos importante, já que nesses casos, o headway entre ônibus de uma determinada linha é muito grande comparado ao headway entre comboios. Portanto, se um ônibus for inserido no comboio seguinte, seu atraso relativo e o conseqüente acúmulo extra de passageiros é pequeno.

Na prática, essa situação pode ser mitigada através da adoção de uma área de despacho na entrada do corredor, onde ônibus são acumulados até que um comboio completo possa ser despachado. Essa operação envolve um trade-off entre o tempo e espaço necessários para a formação de comboios e a perda de capacidade do corredor caso sejam despachados comboios incompletos.

### **Comboios desordenados**

Podem ser despachados comboios em que todas as linhas estão presentes, porém fora de ordem. O efeito disso é uma maior dificuldade no processo de embarque, já que os passageiros podem não saber onde seu ônibus irá parar.

Esse tipo de fenômeno é facilmente observável na prática, mas é difícil de quantificar. A literatura disponível apenas recomenda que os ônibus sejam despachados em ordem, ou que exista um sistema de informação on-line que permita aos passageiros se dirigirem ao berço apropriado.

Mesmo que os benefícios advindos da ordenação sejam pequenos, seu custo de implantação é pequeno em sistemas que têm uma área de despacho na entrada do corredor e onde ultrapassagens não são permitidas: se houver ônibus das linhas apropriadas na área de despacho, tanto faz despachá-los em ordem ou fora de ordem. Uma vez despachados em ordem, os ônibus permanecerão ordenados ao longo de todo o corredor, já que não podem ultrapassar.

Esse efeito não foi analisado por requerer a modelagem da distribuição e movimentação dos passageiros na parada, o que foge ao escopo deste trabalho.

### **5.3. Conclusões sobre os experimentos**

Quanto a sua estocasticidade, os parâmetros que apareceram como mais importantes foram a demanda, a aceleração e desaceleração máximas dos ônibus e os headways. Já os demais parâmetros, tempo de embarque por passageiro ( $1/\mu$ ) e tempo perdido, se mostraram pouco importantes, mesmo para coeficientes de variação elevados.

De fato, as perturbações que esses parâmetros causam no sistema já eram esperadas, pois são do tipo de perturbação que não pode ser mais recuperada pelo sistema.

Quando uma quantidade de passageiros muito acima da média chega na parada, o tempo de embarque aumenta, bloqueando os ônibus do comboio que vem atrás e, portanto, reduzindo a velocidade operacional desses ônibus. Como não existe a possibilidade de ultrapassagens nas paradas, basta apenas um ônibus com muitos passageiros para reduzir a capacidade e o nível de serviço do sistema.

Da mesma forma, os ônibus que demoram mais para entrar e sair da parada devido a baixas taxas de aceleração e desaceleração causam o bloqueio de toda a parada. E como os mais rápidos dependem dos ônibus à frente, o desempenho de toda o sistema sofre.

Com relação aos headways, a situação é semelhante. Os ônibus que se adiantam em relação ao horário previsto não trazem benefícios para o sistema, porque embarcam menos passageiros que o desejável. Já os que se atrasam, carregam passageiros demais, resultando no mesmo fenômeno da demanda estocástica.

Ao contrário dos headways, por exemplo, a variabilidade dos tempos de embarque por passageiro se somam, e nesse caso é possível que os passageiros mais rápidos compensem os mais lentos. Embora nesse caso exista variabilidade na soma dos tempos de embarque por passageiro, a média da soma permanece igual ao caso determinístico ( $k/\mu$ ).

O tempo perdido, apesar de também ser um parâmetro cuja perturbação não possa ser recuperada, não se mostrou importante, provavelmente por que sua média é bastante baixa se comparada ao tempo de embarque (especialmente para valores altos de  $k$ ).

Finalmente, cabe ressaltar que a forma da distribuição para o tempo de embarque por passageiro e para o tempo perdido também causou mudanças apreciáveis no desempenho do sistema. Este fato também era esperado já que, pelo Teorema do Limite Central, sabe-se que a soma de variáveis aleatórias tende a uma Normal, independente da distribuição das parcelas.

Em termos práticos, se por um lado a demanda é um fenômeno intrinsecamente estocástico, sobre o qual não se tem controle na prática, a oferta pode ser regularizada através de alguns procedimentos. Por exemplo, através da criação de um estoque de veículos no início do corredor, que são inseridos no sistema de forma regular e ordenada (conceito de operação com comboios ordenados de ônibus). Um outro

procedimento que uniformiza os headways é a criação de pontos de controle de horário dos ônibus ao longo de suas rotas. Esse procedimento pode ser usado ao longo da rota dos ônibus, antes dos mesmos ingressarem no corredor, diminuindo assim as irregularidades dos headways na entrada do corredor.

## **6. Simulação de um corredor**

Um corredor de ônibus pode ser visto como uma seqüência de paradas (e provavelmente semáforos) onde o desempenho de uma parada depende do desempenho das paradas (e semáforos) anteriores. Por exemplo, se os ônibus se atrasam em uma parada devido a uma grande quantidade de passageiros que embarcam, é provável que haverá um acúmulo maior de passageiros também nas paradas seguintes, e portanto mais atrasos. De forma semelhante, os semáforos causam atrasos adicionais que podem alterar o padrão de chegada de ônibus na parada seguinte, aumentando ou mesmo diminuindo a variabilidade dos headways de ônibus de diferentes linhas.

Embora o fluxo máximo de ônibus que pode atravessar o corredor dependa fortemente do fluxo máximo que pode atravessar a parada mais carregada (parada crítica), o fluxo máximo de passageiros depende também do número de paradas no corredor e da demanda de passageiros em cada parada.

O nível de serviço, semelhantemente, depende de todo o sistema, já que os atrasos se somam em cada parada e em cada semáforo (o que afeta a velocidade operacional do sistema), e da variabilidade dos headways em cada parada (o que afeta a espera média e a fila média de passageiros nas paradas).

Neste capítulo, o modelo de simulação descrito no Capítulo 4 é usado para comparar o desempenho de um corredor de ônibus hipotético sob diferentes configurações físicas e de operação. A Seção 6.1 compara os resultados dos modelos conceitual e de simulação com os resultados publicados por Scheel e Foote (1968) para um teste de operação de ônibus com parâmetros determinísticos. A Seção 6.2 define um corredor hipotético e testa algumas alternativas de configuração física para verificar as relações identificadas nos capítulos anteriores.

## 6.1. O experimento de Scheel e Foote

Segundo os testes realizados por Scheel e Foote (1968) nos laboratórios da GM, ônibus operando em comboios de 6 unidades poderiam atingir fluxos de até 400 ônibus/hora a velocidades operacionais de 25 km/h com tempo de permanência de 30 segundos em cada uma das paradas afastadas de 500 m e velocidade de cruzeiro de 50 km/h.

Observa-se que nenhum efeito estocástico foi considerado nos testes, o que inclusive levou vários autores a criticar a validade prática das conclusões de Scheel e Foote (1968) (ver Seção 2.2 para mais detalhes).

### 6.1.1. Modelagem analítica

Sendo o experimento de Scheel e Foote (1968) eminentemente determinístico (no laboratório devem ter ocorrido pequenas estocasticidades fora do controle dos analistas), é possível aplicar o modelo conceitual do Capítulo 3, que no caso determinístico assume a forma das equações apresentadas.

É importante notar que o experimento de Scheel e Foote (1968) não considera a demanda explicitamente, mas sim o tempo de permanência dos ônibus na parada, de 30 segundos.

Usando a Equação 3.8 para determinar o fluxo máximo de ônibus através de uma parada com  $t_p + k/\mu = 30$  s,  $a = 5$  s,  $b = 5$  s e  $n = 6$ , tem-se:

$$\phi_{cap} = n/(a + b \cdot n + t_p + k/\mu) = 332 \text{ ônibus/h.}$$

Usando a Equação 3.14 para velocidade operacional no trecho com  $L = 500$  m,  $V_c = 50$  km/h,  $t_p + k/\mu = 30$  s = 30 s e  $T_{da} = 20$  s:

$$V_{op} = \Sigma L / (L/V_c + t_p + k/\mu + T_{da}) \approx 21.2 \text{ km/h.}$$

Esses resultados diferem ligeiramente daqueles publicados por Scheel e Foote (1968), provavelmente porque os valores dos parâmetros de aceleração e desaceleração usados nas equações acima não correspondem exatamente aos parâmetros do teste, que não foram publicados. Observa-se que, apesar da simplicidade das equações apresentadas, os resultados são bastante semelhantes.

A capacidade da parada, em termos de embarques por hora, também pode ser estimada pela Equação 3.7, se  $t_p$  e  $\mu$  forem assumidos determinísticos. Assim, para

$$t_p = 5 \text{ s e } \mu = 0.5 \text{ pas/s:}$$

$$k = (30 - t_p) \cdot \mu \approx 12 \text{ pas.}$$

$$\lambda_{cap} = n \cdot k / (a + bn + t_p + k \mu) \approx 4050 \text{ pas/h/parada.}$$

Esses mesmos resultados também podem ser obtidos da Figura 3.3.

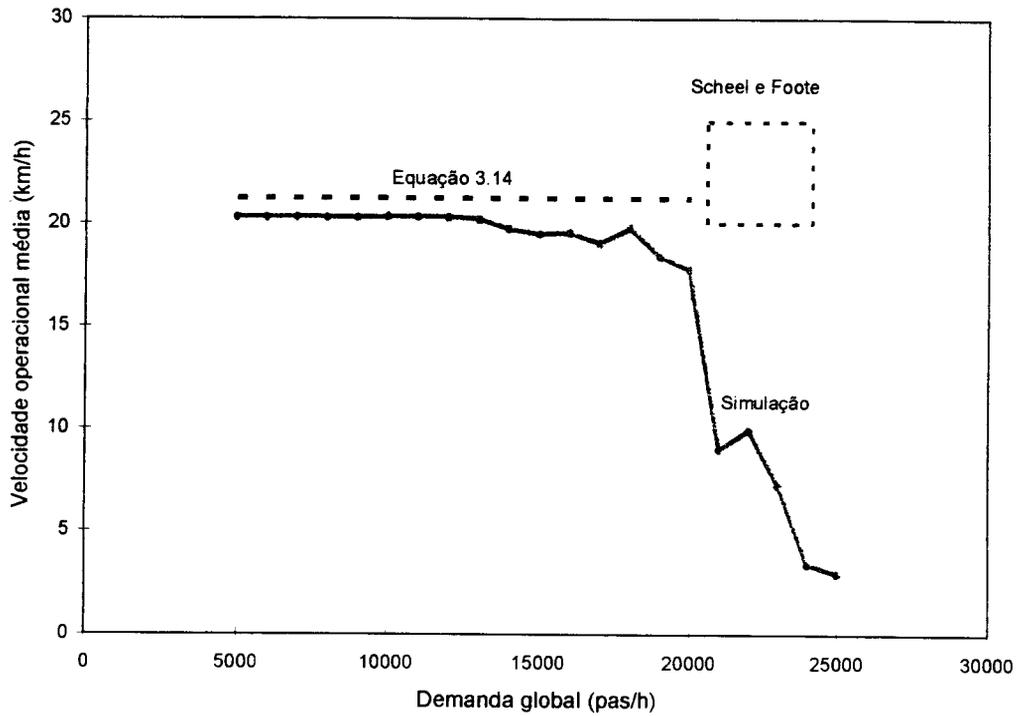
Extrapolando os resultados de uma parada para todo o corredor, o fluxo máximo de ônibus em cada parada, conforme a Equação 3.10, é o mesmo, dado que o tempo de permanência dos ônibus em cada parada também é o mesmo ( $t_p + k/\mu = 30 \text{ s}$ ).

Da mesma forma, desconsiderando o tempo inicial gasto pelos ônibus na aceleração no início do corredor (porque partem do repouso), a velocidade operacional dos ônibus é aproximadamente a prevista pela Equação 3.14, ou seja, 21.2 km/h. Este valor é na verdade superestimado já que na simulação de um corredor os ônibus ingressam com velocidade zero, e gastam um certo tempo para atingir a velocidade desejada ou de cruzeiro.

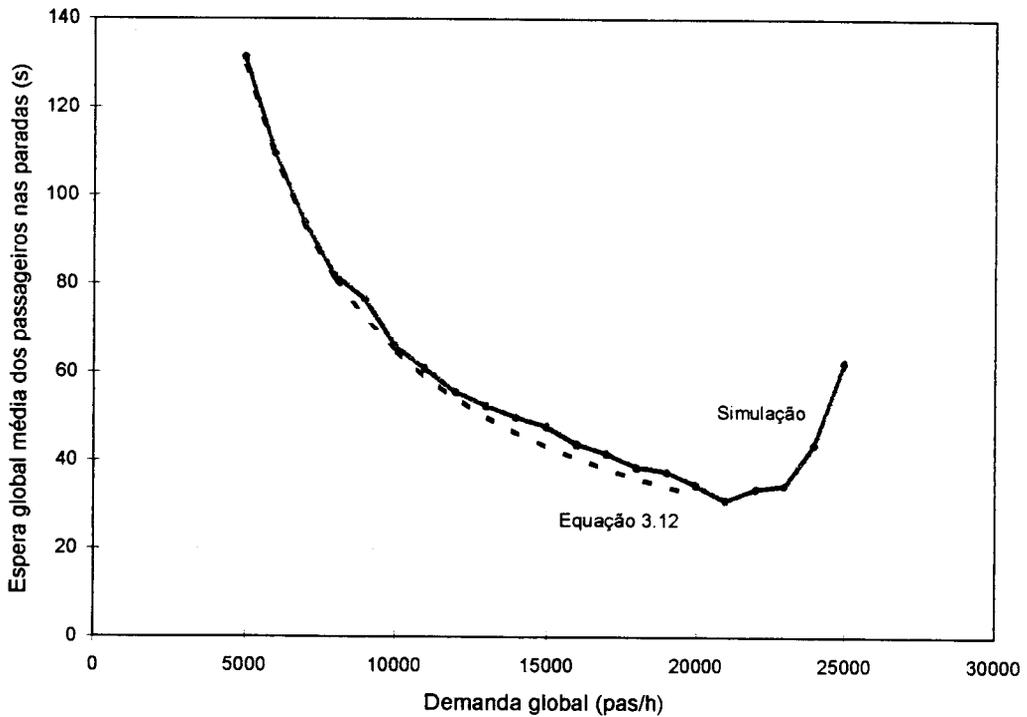
O fluxo máximo de passageiros no fim do corredor é a soma das capacidades de cada parada e portanto depende do número de paradas. Para um corredor de 5 paradas, o fluxo máximo de passageiros embarcados é portanto de  $5 \times 4050 = 20250 \text{ pas/h}$ .

### **6.1.2. Simulação determinística**

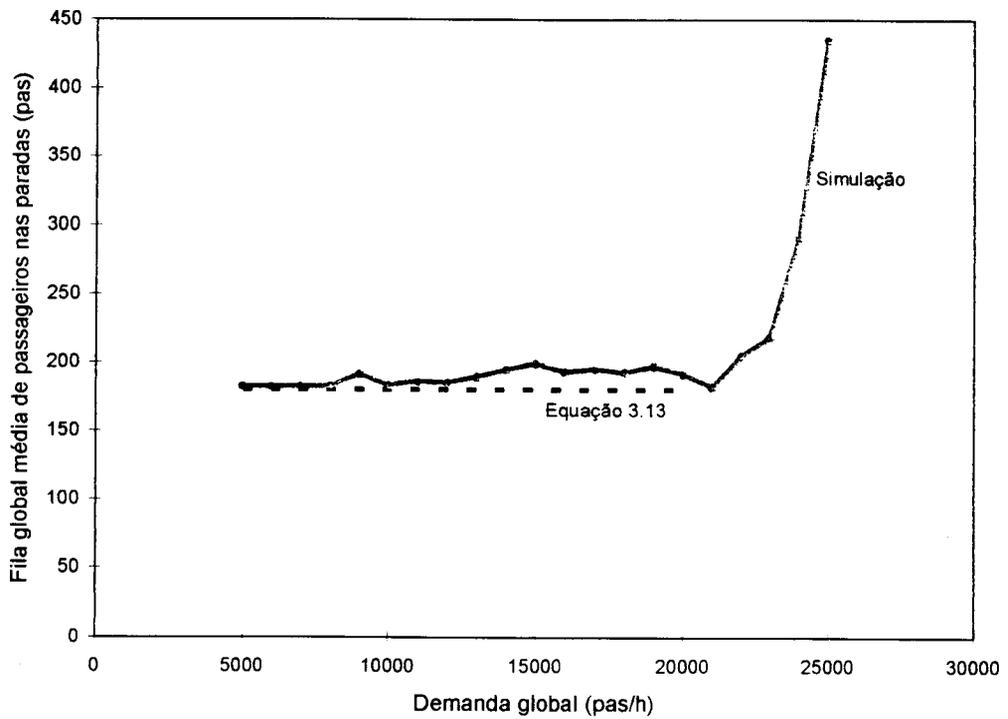
Usando o modelo de simulação para representar esta situação, obtém-se os resultados mostrados nas Figuras 6.1 a 6.4 abaixo, que mostram também os resultados obtidos com as equações do Capítulo 3, para demandas inferiores à capacidade (determinada com a Equação 3.9).



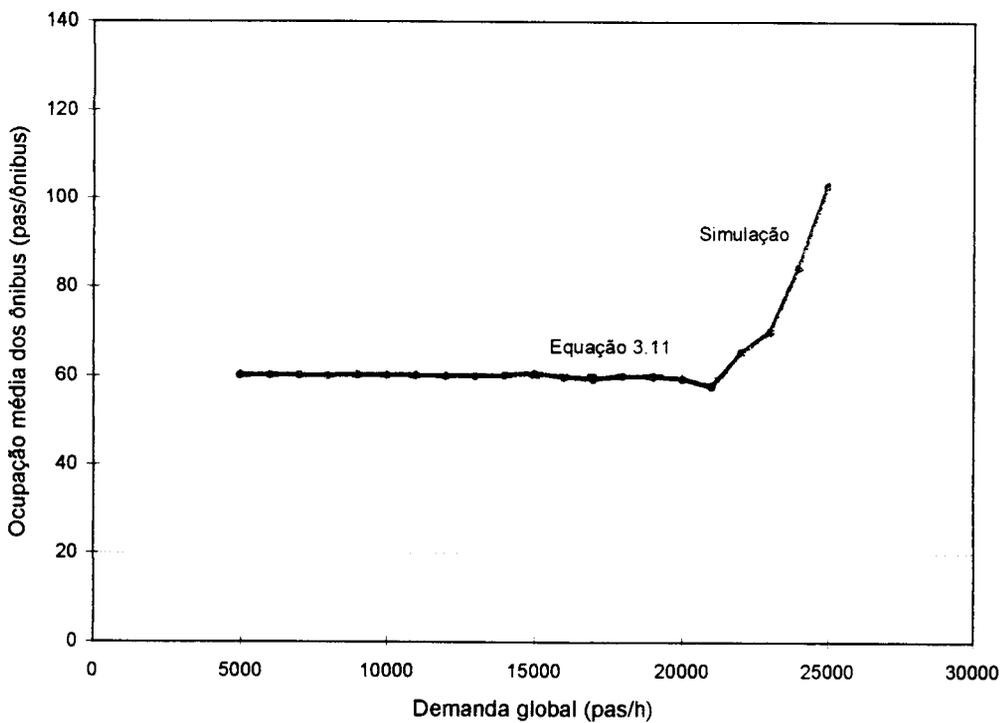
**Figura 6.1 - Resultados analíticos e da simulação determinística para o experimento de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[V_{op}]$**



**Figura 6.2 - Resultados analíticos e da simulação determinística para o experimento de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[W]$**



**Figura 6.3 - Resultados analíticos e da simulação determinística para o experimento de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[Q]$**



**Figura 6.4 - Resultados analíticos e da simulação determinística para o experimento de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[K]$**

Novamente, as figuras mostram uma boa concordância entre os resultados previstos pelas equações do Capítulo 3 e os resultados obtidos pelo modelo de simulação do Capítulo 4.

Tanto a velocidade operacional média (Figura 6.1), como a espera global média (6.2), a fila global média (6.3) e a ocupação média (6.4) dos veículos apresentam uma mudança de comportamento para demandas próximas à capacidade prevista

$A_{cap} = 20250$  pas/h: a velocidade operacional média cai abruptamente, a espera e a fila globais médias de passageiros atingem valores mínimos e a ocupação dos ônibus ultrapassa o valor projetado.

### 6.1.3. Simulação estocástica

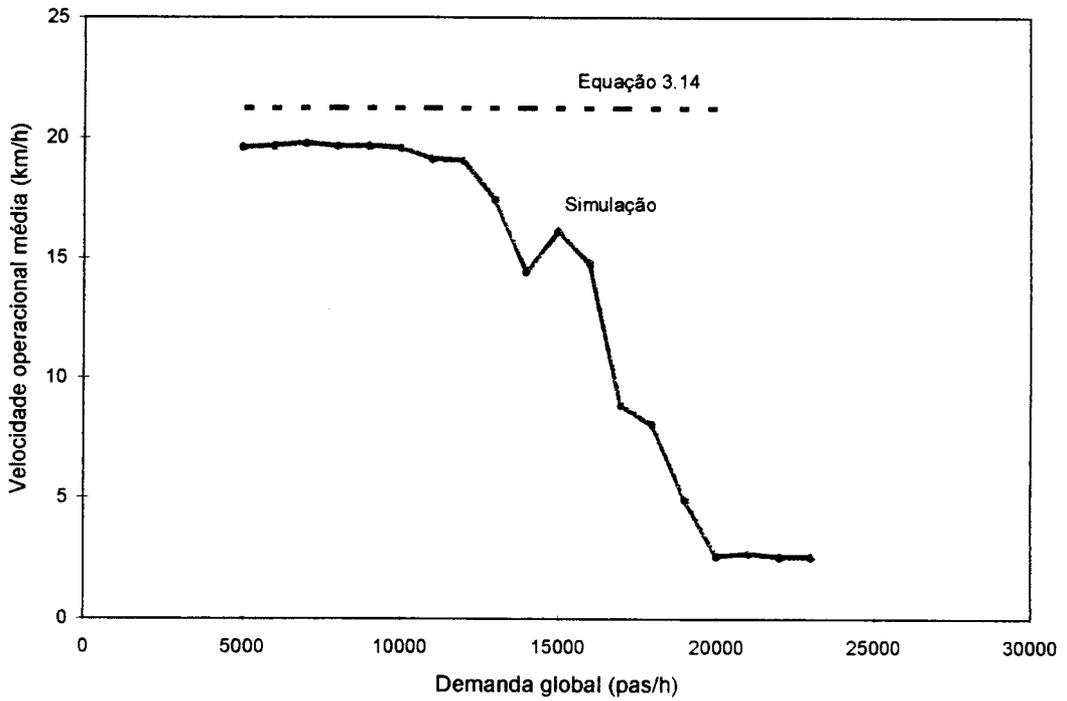
Uma das principais críticas sobre os experimentos de Scheel e Foote foi a não consideração da estocasticidade inerente a certos parâmetros do sistema, que estão presentes em sistemas reais e que potencialmente pioram o seu desempenho.

Para estabelecer uma comparação entre a situação em que os parâmetros são considerados determinísticos e a situação estocástica, introduziram-se as seguintes considerações no sistema simulado na seção anterior:

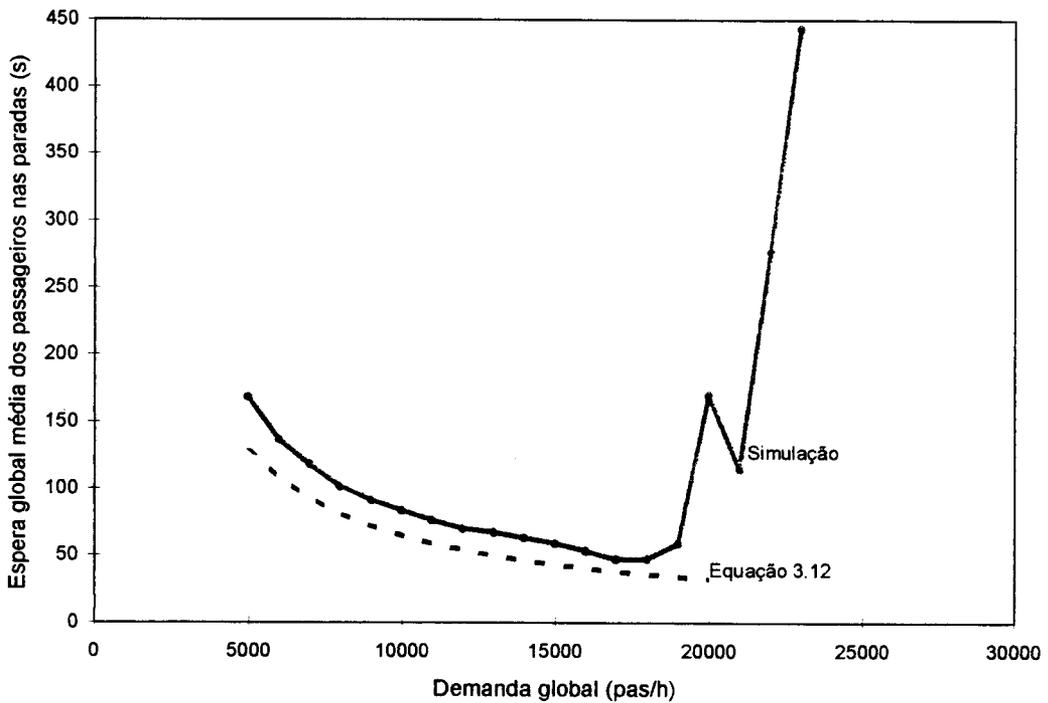
<b>Parâmetro</b>	<b>Distribuição</b>	<b>Média</b>	<b>CV</b>
Demanda	Poisson	variável	100%
Tempo perdido	Normal	5 s	30%
Tempo de embarque por passageiro	Normal	2 s	30%
Aceleração máxima dos ônibus	Normal	0.8 m/s <sup>2</sup>	10%

**Tabela 6.1 - Parâmetros da simulação estocástica**

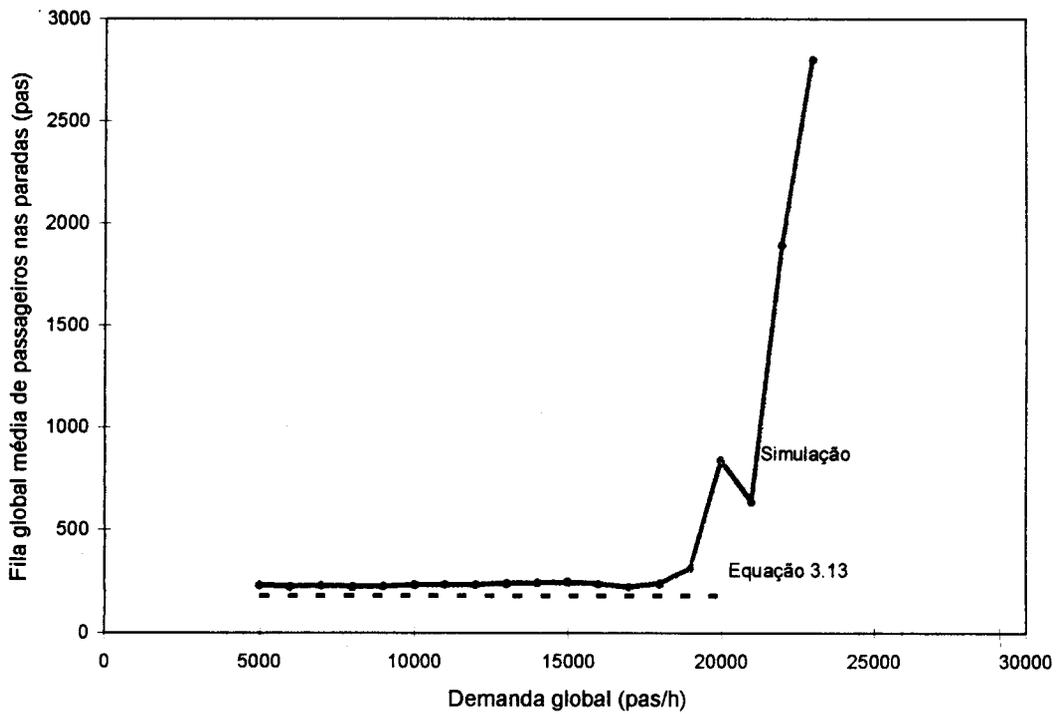
A desaceleração máxima dos ônibus é o dobro da aceleração máxima, e portanto também é um parâmetro estocástico. Os demais parâmetros foram mantidos determinísticos:  $V_{des} = 50$  km/h e  $\phi = 1/60$ . As Figuras 6.5, a 6.8 mostram os resultados obtidos.



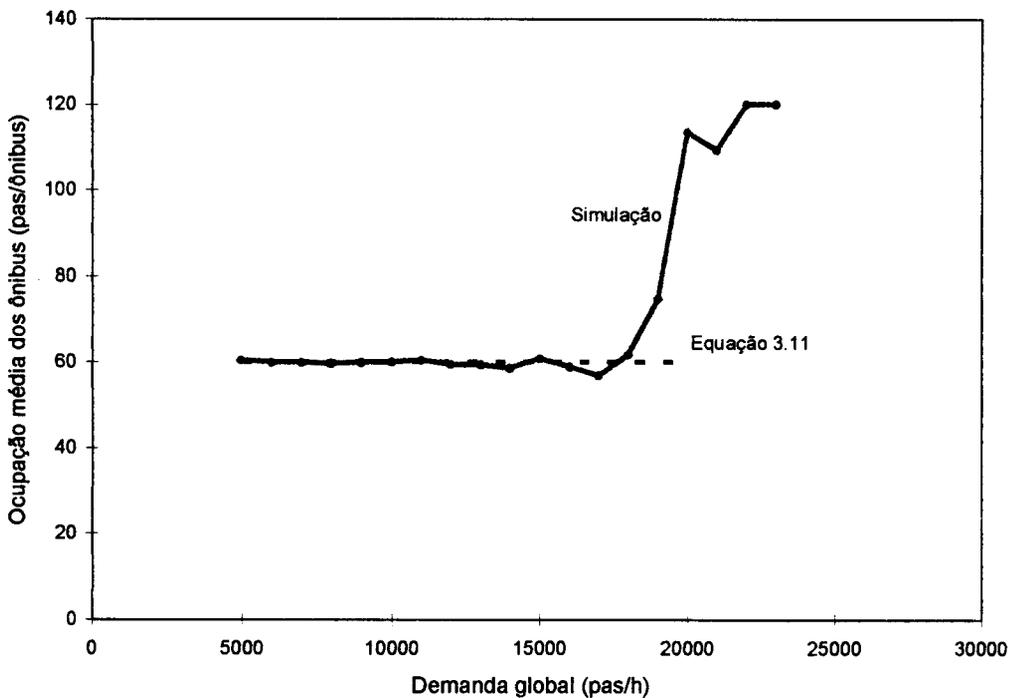
**Figura 6.5 - Resultados analíticos e da simulação estocástica para o teste de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[V_{op}]$**



**Figura 6.6 - Resultados analíticos e da simulação estocástica para o teste de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[W]$**



**Figura 6.7 - Resultados analíticos e da simulação estocástica para o teste de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[Q]$**



**Figura 6.8 - Resultados analíticos e da simulação estocástica para o teste de Scheel e Foote:  $A$  versus  $E[K]$**

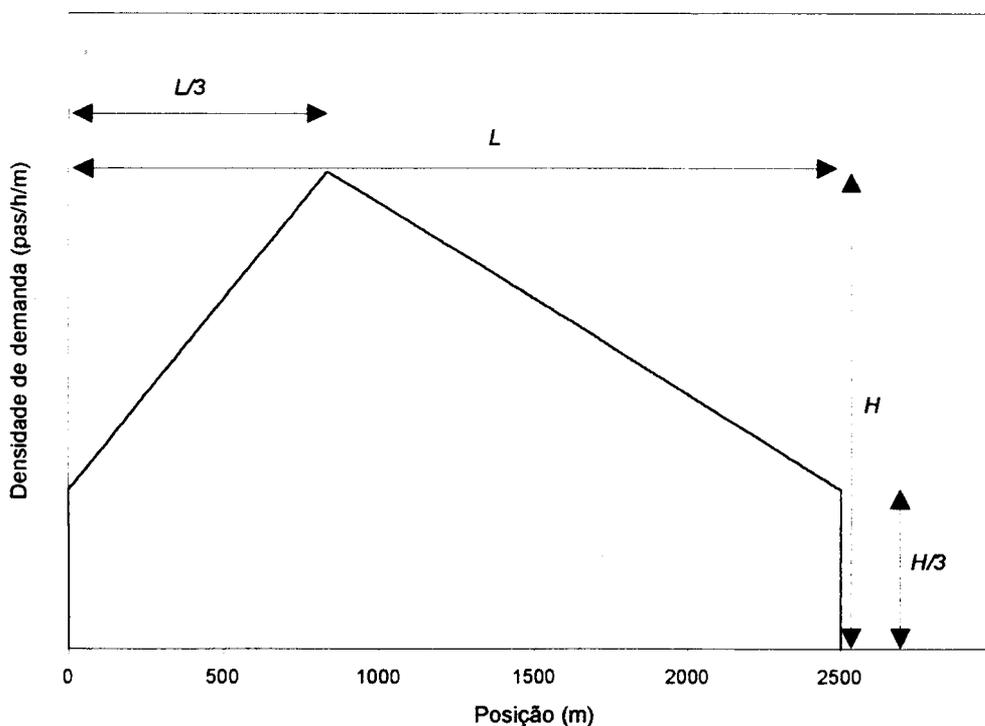
Como se pode observar, a estocasticidade dos parâmetros afeta apreciavelmente os resultados da simulação, sobretudo a velocidade operacional média e a ocupação dos ônibus. Este fato confirma a importância de modelar os parâmetros estocásticos do sistema.

Os resultados mostram que as críticas com relação ao determinismo dos experimentos de Scheel e Foote procedem.

## 6.2. Simulação de um corredor hipotético

Admite-se que no corredor estudado exista uma distribuição de densidade de demanda, que precisa ser atendida pelo sistema. Tipicamente, a densidade de demanda é maior próximo aos centros das cidades no pico da tarde e decresce no sentido da periferia, já que normalmente existe uma maior concentração de empregos próximo ao centro.

Para representar a densidade da demanda, adotou-se uma combinação de uma distribuição retangular e uma triangular, com parâmetros  $L$ ,  $l$ ,  $h$  e  $H$  conforme mostra a Figura 6.1 abaixo.



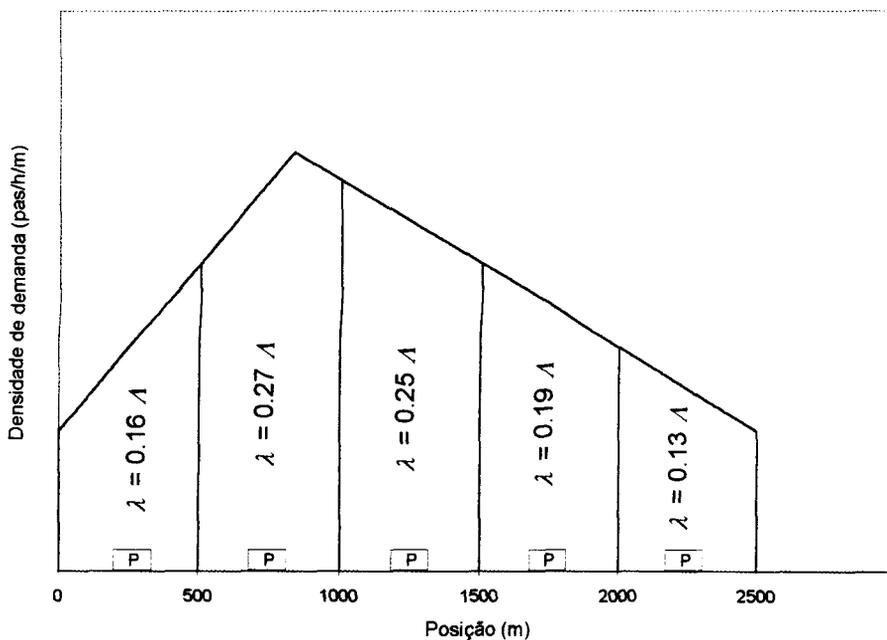
**Figura 6.9 - Distribuição de densidade de demanda**

Atribuiu-se, arbitrariamente,  $L = 2500$  m,  $l = L/3$  e  $h = H/3$ , que é precisamente a distribuição representada na Figura 6.9. A razão dessa escolha é que ela resulta em uma distribuição de densidade de demanda assimétrica, com maior concentração à direita, representando a distribuição pouco uniforme da demanda nos corredores reais com concentrações maiores próximo ao centro.

No presente estudo de caso, admitem-se como parâmetros de projeto o número e a posição das paradas a serem implantadas. Os parâmetros usados na simulação são os mesmos da simulação estocástica do experimento de Scheel e Foote (1968), descritos na seção anterior (Tabela 6.1). Admitiu-se também que a ocupação dos ônibus na seção mais carregada do corredor é de 80 passageiros por ônibus. Como na situação modelada só ocorrem embarques, o fluxo de ônibus que entra no corredor é  $\phi = \Lambda/80$ , sendo  $\Lambda$  a demanda global do sistema. Os ônibus entram no corredor em comboios de seis, e a intervalos regulares.

### 6.2.1. Cenário 1

No Cenário 1, o corredor apresenta paradas com afastamento constante de 500 metros. A demanda total de cada parada é calculada como a área da curva de densidade de demanda na região de influência da parada. A Figura 6.10 mostra a posição e a demanda de cada uma das cinco paradas neste cenário.

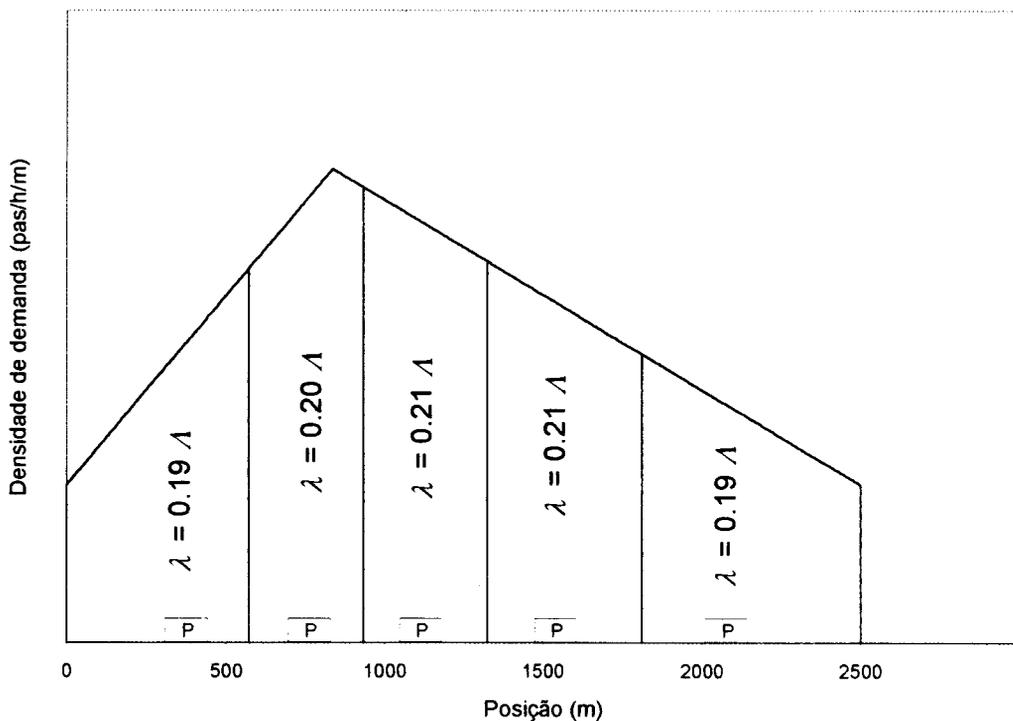


**Figura 6.10 - Posição e demanda nas paradas para o Cenário 1**

Como se pode observar, a parada 2 do corredor absorve 27% da demanda global, o que representa um gargalo importante no sistema.

### 6.2.2. Cenário 2

Como alternativa para mitigar o efeito desse gargalo, definimos um segundo cenário, com o mesmo número de paradas do Cenário 1, mas com afastamentos variáveis de forma a melhor distribuir a demanda sobre as paradas. A Figura 6.11 ilustra esta alternativa.



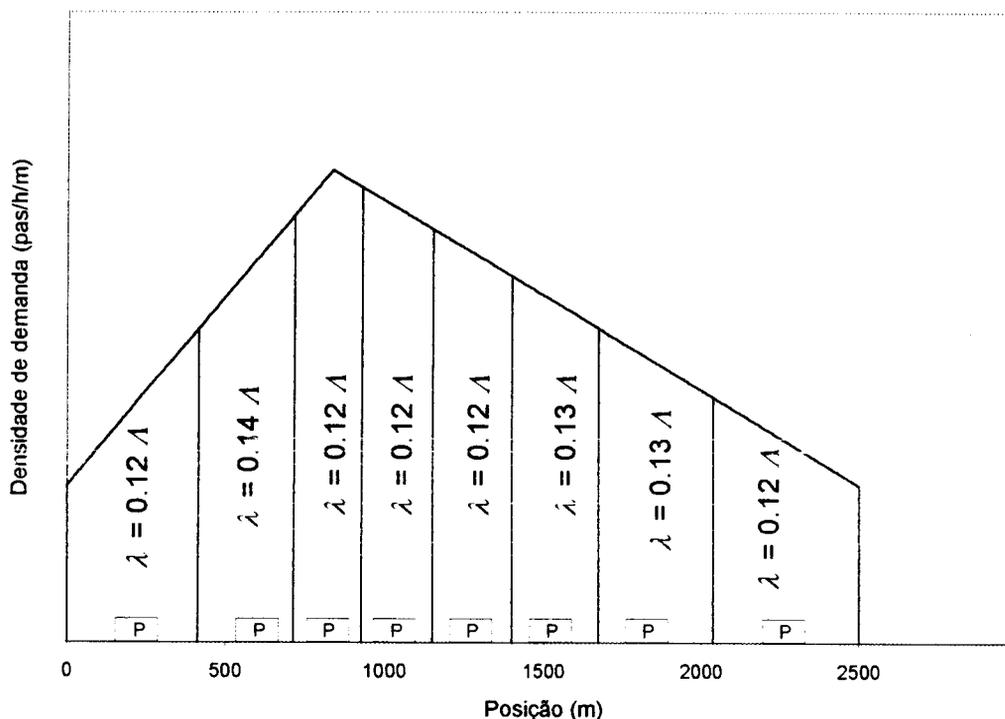
**Figura 6.11 - Posição e demanda nas paradas para o Cenário 2**

Este cenário deve levar a uma capacidade superior àquela do Cenário 1. Como o número de paradas é mesmo do Cenário 1, a velocidade operacional também deve ser aproximadamente a mesma.

### 6.2.3. Cenário 3

No Cenário 3, procura-se verificar o princípio da divisão das paradas críticas (e portanto aumento do número total de paradas) para aumentar a capacidade global do sistema.

O cenário foi definido com três paradas extras. A Figura 6.12 mostra a posição e a demanda de cada uma delas para o Cenário 3.



**Figura 6.12 - Posição e demanda nas paradas para o Cenário 3**

A desvantagem desse terceiro cenário é que o acréscimo de paradas e a proximidade entre elas afeta a fluidez do serviço, devendo reduzir a velocidade operacional do sistema.

A Tabela 6.2 mostra a posição exata de cada parada para os cenários definidos.

Parada	Posição (m)		
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
1	250	350	225
2	750	790	600
3	1250	1070	825
4	1750	1570	1025
5	2250	2050	1270
6	-	-	1520
7	-	-	1825
8	-	-	2250

**Tabela 6.2 - Posição das paradas nos cenários simulados**

A seção seguinte mostra e analisa os resultados simulados.

### 6.2.4. Resultados simulados

As figuras 6.13 a 6.16 abaixo mostram os resultados obtidos para os três cenários definidos.

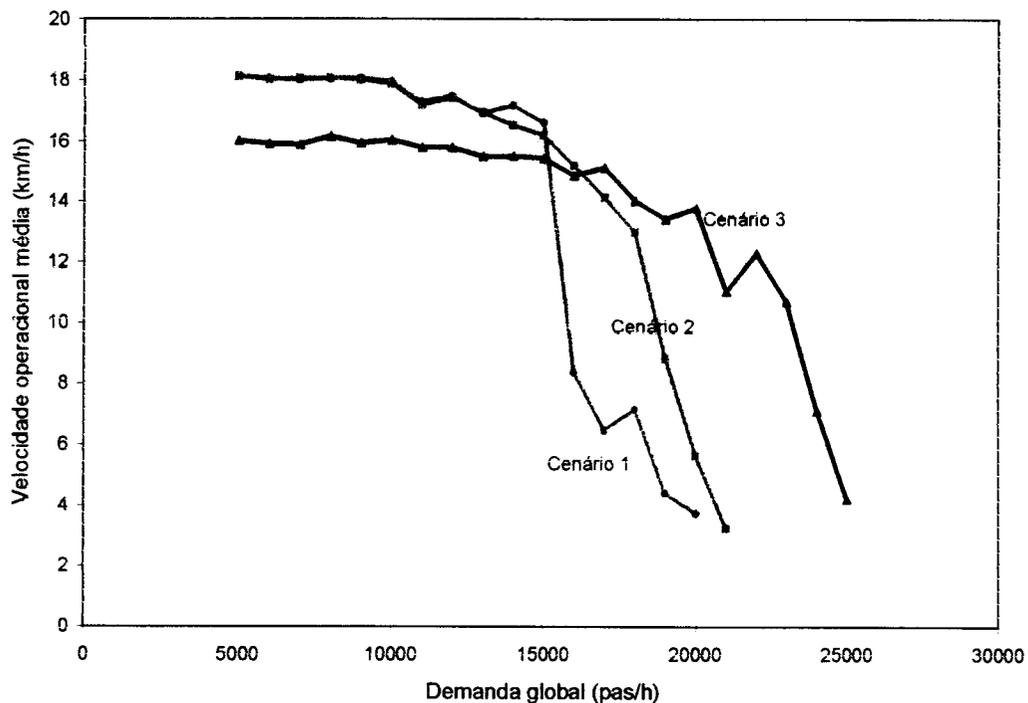


Figura 6.13 - Simulação do corredor hipotético:  $\Lambda$  versus  $E[V_{op}]$

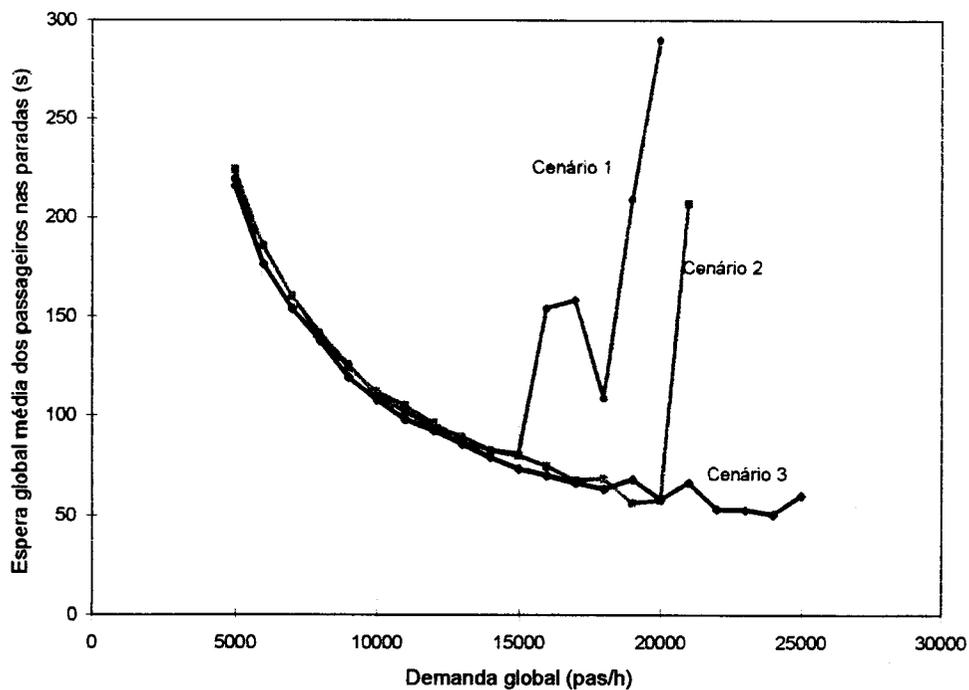
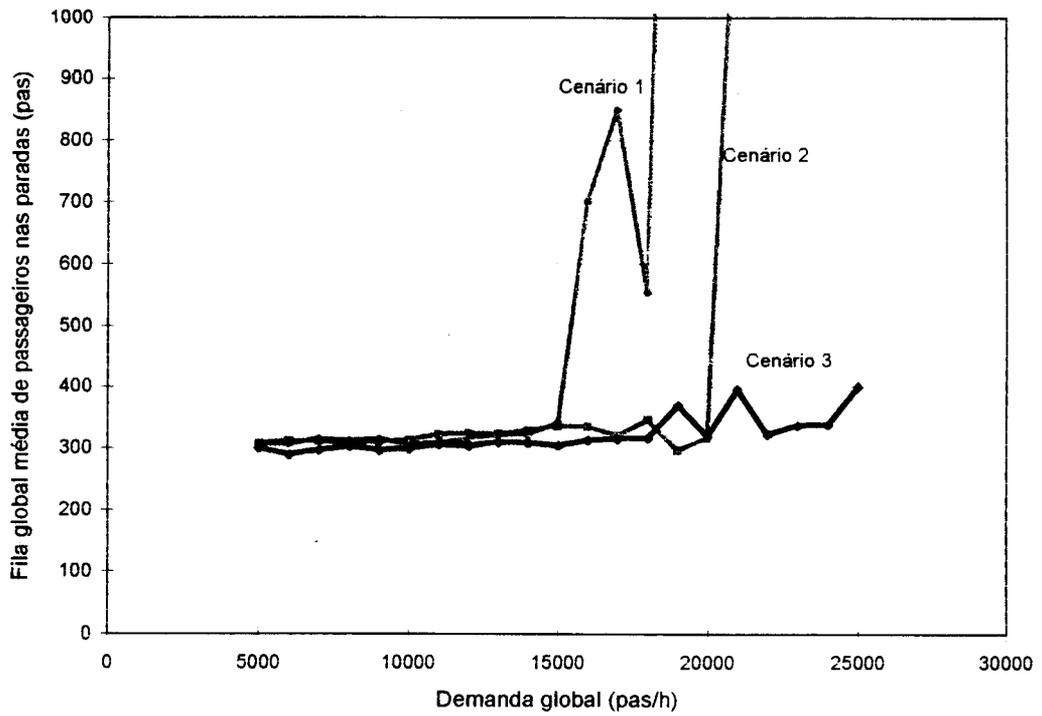
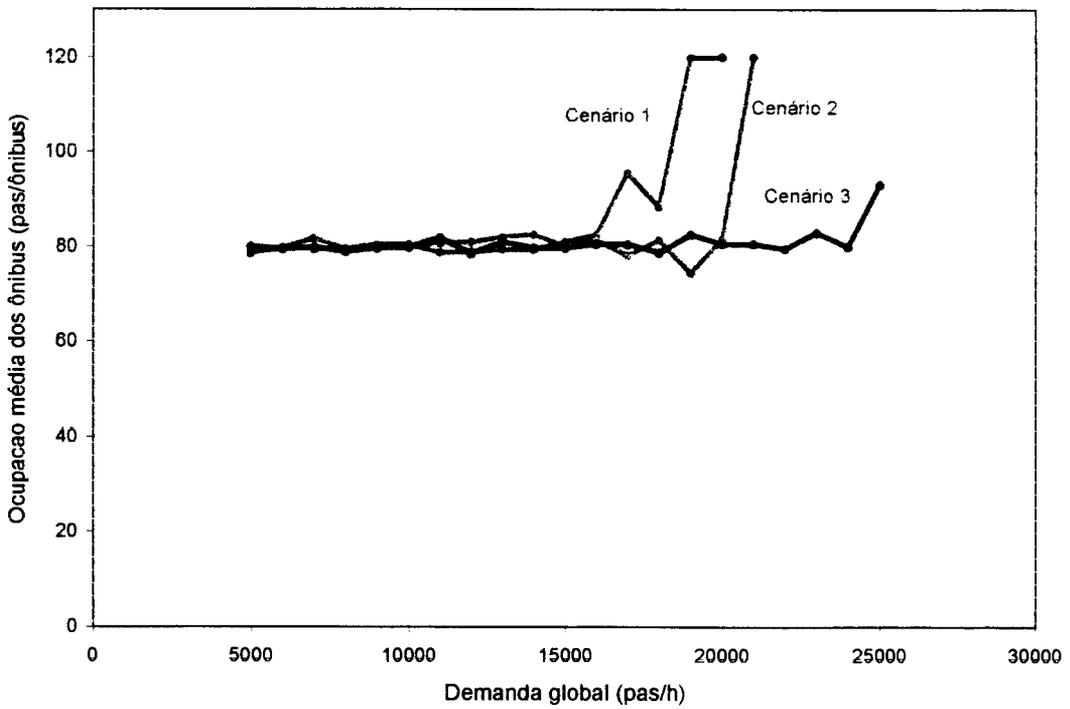


Figura 6.14 - Simulação do corredor hipotético:  $\Lambda$  versus  $E[W]$



**Figura 6.15 - Simulação do corredor hipotético:  $A$  versus  $E[Q]$**



**Figura 6.16 - Simulação do corredor hipotético:  $A$  versus  $E[K]$**

Como se pode observar, o Cenário 1 é o que resulta na menor capacidade. Todos os parâmetros de desempenho apresentam uma deterioração acentuada a partir de demandas próximas a 15000 pas/h. A velocidade operacional cai rapidamente de um patamar próximo de 18 km/h, enquanto a espera e a fila global médias dos passageiros nas paradas e ocupação dos ônibus sobem rapidamente. Estes comportamentos indicam que o sistema já não é mais capaz de absorver a demanda a que está submetido sem que o nível de serviço desejado piore continuamente ao longo do tempo.

O Cenário 2 apresenta um desempenho intermediário. O melhor posicionamento das paradas permite distribuir a demanda mais uniformemente entre as paradas, resultando em uma capacidade ligeiramente superior, por volta de 17000 pas/h, sem afetar significativamente a velocidade operacional dos ônibus (já que o número de paradas é o mesmo tanto no Cenário 1 como no Cenário 2). A velocidade operacional média cai suavemente de 18 km/h até cerca de 13 km/h para uma demanda de 17000 pas/h, e então experimenta uma queda mais abrupta, indicando a saturação do sistema.

Finalmente, como era esperado, o Cenário 3 foi capaz de absorver as maiores demandas, com capacidade global estimada em cerca de 20000 pas/h. Observa-se, entretanto, que para demandas baixas, próximas a 10000 pas/h, é também o que apresenta a menor velocidade operacional média, em decorrência do maior número de paradas a serem atendidas por cada ônibus.

### **6.3. Conclusões sobre os experimentos**

Os experimentos mostraram que o sistema teve melhor desempenho quando as paradas foram localizadas de forma a equalizar as demandas, mitigando o efeito da parada crítica.

A inclusão de novas paradas se mostrou uma medida eficiente para aumentar a capacidade global do sistema, embora a velocidade operacional seja inferior ao caso com menos paradas. Esse fato comprova um trade-off entre a capacidade e a velocidade operacional do sistema. Portanto, em corredores já saturados, onde

congestionamentos de ônibus são freqüentes em paradas com grande demanda, a divisão dessas paradas pode render bons resultados.

Finalmente, é importante ressaltar que os experimentos realizados serviram para revelar tendências de desempenho do sistema sob demandas crescentes. Para resultados mais representativos em relação a uma demanda em particular, uma série de rodadas devem ser efetuadas, e os resultados analisados estatisticamente.

## **7. Conclusão**

O objetivo deste trabalho foi demonstrar as principais relações entre as características físicas, operacionais e de demanda de um corredor exclusivo de ônibus e suas características de desempenho.

Para tanto, desenvolveu-se um modelo conceitual determinístico do funcionamento de uma parada isolada do corredor, que captura a essência dessas relações. Esse modelo foi então estendido para um sistema de paradas em série.

A seguir, desenvolveu-se um modelo de simulação, para permitir uma análise mais detalhada do sistema, levando em conta as estocasticidades inerentes aos sistemas reais.

O modelo de simulação foi inicialmente validado contra o modelo conceitual, usando parâmetros determinísticos, e então usado na análise de capacidade e nível de serviço de uma parada e de um corredor hipotético, com parâmetros determinísticos e estocásticos.

Neste capítulo final, a Seção 7.1 resume as principais conclusões da pesquisa. A Seção 7.2 avalia as técnicas usadas. Finalmente, a Seção 7.3 sugere tópicos para pesquisas futuras.

### **7.1. Resumo das principais conclusões**

Um corredor de ônibus pode ser visto como um sistema de paradas em série. A capacidade global do sistema, definida como o fluxo máximo de passageiros que o sistema pode transportar com um dado nível de serviço arbitrário, é limitada pela parada crítica, aquela onde a demanda mais se aproxima de sua capacidade.

Uma forma de aumentar a capacidade global do sistema é, portanto, aumentar a capacidade da parada crítica, ou reduzir a demanda nesta parada. O modelo conceitual de uma parada individual, descrito no Capítulo 3, mostra os principais parâmetros que afetam a capacidade da parada, e o nível de serviço no segmento de via que a contém.

Desses parâmetros, a taxa de embarque de passageiros é de grande importância, especialmente quando muitos passageiros embarcam por veículo (que, na prática, é um fenômeno característico das paradas críticas).

A análise de sensibilidade aos efeitos estocásticos, realizada com auxílio do modelo de simulação no Capítulo 5, permitiu identificar os parâmetros cujas estocasticidades são mais importantes. Esses parâmetros são o headway dos ônibus, o desempenho dos ônibus, e a chegada de passageiros nas paradas. Essas conclusões mostram que são úteis as medidas que visam a aumentar a taxa de embarque de passageiros e a reduzir a variabilidade dos headways. De fato, diversas medidas desse tipo são freqüentemente usadas na prática.

No Capítulo 3, propõem-se dois princípios de projeto que visam a aumentar a capacidade global do sistema sem necessariamente aumentar a capacidade das paradas individuais:

1. Localizar as paradas de forma a atrair demandas proporcionais às suas capacidades;
2. Aumentar o número de paradas do sistema, desde que com espaçamentos mínimos razoáveis. Essa medida reduz a demanda na parada crítica e aumenta a capacidade global do sistema. Por outro lado, ela reduz a velocidade operacional dos ônibus, já que estes têm de parar mais vezes ao longo do corredor.

As simulações do Capítulo 6 mostraram a validade desses princípios para o corredor testado.

Vale a pena observar que na literatura revisada, os métodos disponíveis para calcular o espaçamento entre paradas otimizam o tempo de viagem dos passageiros, ou o custo associado ao tempo de viagem, mas não a capacidade do sistema.

Finalmente, o trabalho mostrou que em sistemas estocásticos, o conceito de capacidade é muito complexo, e que depende de critérios arbitrários, como por exemplo, um valor mínimo aceitável para a velocidade operacional média.

## **7.2. Avaliação das técnicas usadas**

Durante a elaboração deste trabalho, ficou clara a importância da análise conceitual do sistema que se estuda. Um modelo de simulação por si só não substitui o bom senso e a necessidade da compreensão do sistema pelo analista.

Neste trabalho em particular, muitos dos resultados de simulação só foram bem compreendidos com auxílio da análise conceitual. Ela permitiu identificar os parâmetros mais importantes no funcionamento do sistema. A simulação permitiu estudar os efeitos estocásticos desses parâmetros e aumentar o nível de detalhe da análise.

A análise conceitual também foi fundamental para fornecer estimativas de desempenho do sistema, que serviram para detectar eventuais problemas no modelo de simulação, corrigi-lo e validá-lo. Em geral, a validação de modelos de simulação de sistemas tão complexos e variados com dados empíricos é extremamente difícil.

Finalmente, a análise conceitual do problema permitiu estabelecer princípios de projeto para aumentar a capacidade do sistema, e a simulação permitiu validá-los em um estudo de caso hipotético. A conjugação dessas duas técnicas, portanto, se mostrou muito útil.

## **7.3. Sugestões para pesquisas futuras**

Ao longo da elaboração deste trabalho, identificaram-se alguns tópicos que merecem investigação futura. Esses tópicos dividem-se em tópicos para estudos empíricos, tópicos para estudos de simulação e tópicos para estudos analíticos.

### **Tópicos para estudos empíricos**

- Quantificação das taxas médias de embarque e dos tempos perdidos sob diversas configurações físicas e operacionais praticadas (portas duplas, plataformas de embarque elevadas, ônibus ordenados, sistemas de informação on-line para os passageiros, cobrança adiantada de tarifas, etc.). Essa quantificação poderia levar a regressões para uso em simulações, e possibilitaria optar entre configurações alternativas.

### **Tópicos para estudos de simulação**

- Incorporação do efeito de semáforos na análise do desempenho do corredor, e investigação da possibilidade de regularizar os headways através de uma política semafórica eficiente;
- Coleta de dados referentes ao desempenho de diferentes tipos de ônibus para a calibração e validação de modelos de progressão de ônibus. Essa coleta seria facilitada com o uso de dispositivos eletrônicos de bordo que monitoram a progressão dos veículos;
- Investigação de outros indicadores de desempenho do sistema, como por exemplo, evolução de filas de ônibus na entrada das paradas.

### **Tópicos para estudos analíticos**

- Desenvolvimento de modelos analíticos da capacidade de paradas e de sistemas de paradas em série, levando em conta as estocasticidades. Estes modelos seriam análogos ao desenvolvido neste trabalho, mas deveriam incorporar fatores de correção devidos às estocasticidades. Esses fatores, por sua vez, dependeriam de valores mínimos aceitáveis para a velocidade operacional média;
- Modelagem de estratégias de ordenação de ônibus antes da entrada no corredor, caso os ganhos nas taxas médias de embarque se mostrarem significativos.

## Referências Bibliográficas

- ANDERSON, P. A., HERMANSSON, A. e TENGVOLD, E. Analysis and simulation of an urban bus route. **Transportation Research**, Vol. 13 A, 1979.
- ARMSTRONG-WRIGHT, A. Public transport in third world cities. **State of the Art Review No 10**, Transport Research Laboratory, Londres, 1993.
- ARMSTRONG-WRIGHT, A. Urban transit systems - Guidelines for examining options. **World Bank Technical Paper No 52**, Washington, D. C., U. S. A., 1986.
- CHAPMAN, R. A. Bus boarding times - a review of studies and suggestions for interpretation. **Research Report No 8**, Transport Operations Research Group, University of New Castle upon Tyne, U. K., 1975.
- CHAPMAN, R. A., GAULT, H. A. e JENKINS, I. A. Factors affecting the operation of urban bus routes. **Working Paper No 23**, Transport Operations Research Group, University of New Castle upon Tyne, U. K., 1976.
- COBURN, T. M. e COOPER, B. R. TRRL bus priority experiment on test track. **Department of the Environment**, Symposium on bus priority, TRRL, Crowthorne, U. K., 1973.
- COX, D. R. e SMITH, W. L. **Queues**. Spottiswoode, Ballantyne & Co, Londres, U. K., 1961.
- CROWELL, W. H. Preferential bus lanes on urban arterials: selected studies on their feasibility and performance. **U. S. Department of Transportation**, UMTA 78-D-1, Washington, D. C., U. S. A., 1978.
- DAGANZO, C. F. **Logistics Systems Analysis**. Lecture notes in economics and mathematical systems. Springer-Verlag, 1991.
- DANAS, A. Arrival of passengers and buses at two London bus-stops. **Traffic Engineering and Control**, vol. 21, no 10, 1980.
- DUEWAG. **Métro Léger Type Tunis**. Automotrice articulée bidirectionnelle à 8 essieux, commande par hacheur à courant continu, avec marchepieds rétractables et bogies mono-moteurs. Duewag Aktiengesellschaft, Düsseldorf, Germany, 1991.
- GARDNER, G., CORNWELL, P. R. e CRACKNELL, J. A. The Performance of Busway Transit in Developing Cities. **TRRL Research Report 329**, Crowthorne, Berkshire, U. K., 1991.
- GERLOUGH, D. L. e HUBER, M. J. Traffic flow theory - a monograph. **Transportation Research Board**, National Research Council, Special Report 165, Washington, D. C., 1975.

- GIBSON, J. e BAEZA, I. Bus-stops, congestion and congested bus-stops. **Traffic Engineering and Control**, Junho 1989.
- GIBSON, J. e FERNÁNDEZ, R. Recomendaciones para el diseño de paraderos de buses de alta capacidad. **Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile**. Artigo ainda não publicado, 1994.
- GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research**, Vol. 15B, Pergamon Press Ltda, U.K., 1981.
- HALL, R. W. Passenger delay in a rapid transit station. **Transportation Science**, Vol 21, No 4, 1987.
- HCM. Highway Capacity Manual. **Transportation Research Board, Special Report 209**. Washington D. C., U. S. A., 1985.
- HERMAN, R.; LAM, T. e ROTHERY, R. Further Studies on Single-Lane Bus Flow: Transient Characteristics. **Transportation Science** 4(2), Maio, 1970.
- IHT. **Roads and traffic in urban areas**. Institution of Highways and Transportation with the Department of Transport, Londres, U. K., 1987.
- JOYCE, P. e YAGAR, S. Representing stochastic transit dwell times in traffic signal optimization. **Transportation Research**, Vol. 24A, No 2, 1990.
- KOSHI, M. Cycle time optimization in traffic signal coordination. **Transportation Research**, Vol. 23A, No 1, 1989.
- KUHN, F., MICHEL, F. D. (1993). Le metro léger et l'autobus en site propre: comparaison des performances d'exploitation de deux systèmes. **Centre de Recherche et d'Evaluation des Systèmes de Transport Automatisés (CRESTA - INRETS)**, França, 1993.
- LAW, A. M. e KELTON, W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. McGrawHill series in industrial engineering and management science, 2nd edition, 1991.
- LINDAU, L. A. **High Flow Bus Operation on Urban Arterial Roads**. Tese de doutorado pela Faculdade de Engenharia e Ciência Aplicada, Universidade de Southampton, U. K., 1983.
- LINDAU, L. A. Levantamento e análise de dados de tráfego em vias urbanas com faixas prioritárias para ônibus. **Caderno Técnico**, Fundação Universidade Empresa de Tecnologia e Ciência (FUNDATEC), Porto Alegre, Brasil, 1981.
- LINDAU, L. A. Bus priority systems in Brazil: from theory to practice. **Urban transport in developing countries - lessons in innovation (perspectives 1)**. PTRC Education and Services Ltda, London U. K., 1991.
- MICHEL, F. D., KUHN, F., RIBEIRO, J. L. D. e LINDAU, L. A. Busways ou tramways: uma análise comparativa inicial através da simulação computacional

- de desempenho operacional. **Anais do Congresso Panamericano de Transito y Transportes**, Cidade do México, D. F., Julho 1994.
- NATO/CCMS. Bus Priority Systems. North Atlantic Treaty Organisation and the Committee on the Challenges of Modern Society, **CCMS Report No 45**, London, U.K., 1976.
- NELSON, J. D. e HILLS, P. J. Innovative bus control for congested urban corridors: the application of convoying systems. **Traffic Engineering and Control**, 1990.
- NEWELL, G. F. **Applications of Queueing Theory**. Chapman and Hall, U.K., 1982.
- OSUMA, E. E., NEWELL, G. F. Control strategies for an idealized public transportation system. **Transportation Science**, Vol 6 No 1. The Operations Research Society of America (ORSA), February, 1972.
- POWELL, W. B. e SHEFFI, Y. A probabilistic model of bus route performance. **Transportation Science**, Vol. 17 No 4, 1983.
- RIBEIRO, P. C. Prioridades para ônibus nos planos de sincronismo: o caso do Rio de Janeiro. **Transportes**, Vol 4 Nos 1 e 2, 1996.
- SENEVERIANTE, P. N. Analysis of on time performance of bus service using simulation. **Journal of Transportation Engineering**, Vol 116 No 4, 1990.
- SCHEEL, J. W. e FOOTE, J. E. Bus operation in single lane platoons and their ventilation needs for operation in tunnels. **Transportation Research Publication GMR 808**, General Motors Corporation, Warren, U. S. A., 1968.
- SZÁSZ, P. A. COMONOR - Ordinated Bus Convoy. **Anais PTRC**, Summer Meeting, University of Warwick, U. K., 1979.
- TRL/ODA. **Design guidelines for busway transit**. Transport Research Laboratory and Overseas Development Administration, Overseas road note 12, Lonres, U. K., 1993.
- UNCHS. **Provision of travelway space for urban public transport in developing countries**. United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), Nairobi, 1993.
- VIJAYAKUMAR, S. e JACOBS, G. D. Analysis of the effect of bus size on route performance, using a simulation model. **Anais CODATU V**, São Paulo, Brasil, 1990.
- VUCHIC, V. R. **Urban public transportation**. Prentice-Hall, New Jersey, U. S. A., 1981.
- VUCHIC, V. R. e DAY, F. B. Discussion of the Paper: Bus Capacity Analysis. **Transportation Research Record 546**, Transportation Research Board, 1975.

WHITE, P. (1986). **Public transport: its planning, management and operation**. The Built Environment Series, 2nd Edition, Londres, U. K., 1986.

WILLUMSEN, L. G. e COEYMAMS, J. E. The value of fixed-time signal coordination in developing countries II. Improved bus modeling and results. **Traffic Engineering and Control**, 30 (3), 1989.

## Anexo: Listagem do programa de simulação

```
//-----  
// MOSART.C - Modelo de Simulacao de Arterias  
// modulo principal  
//-----  
#include <string.h>  
#include <math.h>  
#include <stdlib.h>  
#include <stdio.h>  
#include <conio.h>  
#include <ctype.h>  
#include <assert.h>  
#include <mosaic.h>  
#include "mosart.h"  
#include "carfoll.h"  
#include "randgen.h"  
  
//-----  
// global data  
//-----  
GLOBALDATA Data;  
FILE* fTimeSpace = NULL;  
  
//-----  
// main  
//-----  
void main (int argc, char* argv[]) {  
    char sDataFile[100],  
        sAnimFile[100];  
    char* sPtr;  
    FILE* f;  
    float x4, x5, x9, x10, x11, x12, x13;  
    float dem = 0;  
    float avgspeed, avgocc, varspeed, varocc;  
    int i;  
  
    // parse command line  
    if (argc < 2) {  
        printf ("\nUsage: MOSART <datafile>[.MOS] [S|a]"  
                "\nplease try again\n");  
        exit (0);  
    }  
    strcpy (sDataFile, argv[1]);  
   strupr (sDataFile);  
    if (!strchr (sDataFile, '.')) strcat (sDataFile, ".MOS");  
    Data.RunType = RT_SIMULATE;  
    if (argc > 2 && toupper (*argv[2]) == 'A')  
        Data.RunType = RT_ANIMATE;  
  
    // show banner  
    banner (sDataFile, "MOSART v1.00", "Modelo de Simulacao de Arterias");  
  
    // read data  
    f = fopen (sDataFile, "rt");  
    if (!f) err (CANTOPENFILE, sDataFile);  
    cprintf ("\n\rReading data... ");  
    DataRead (f);  
    fclose (f);  
  
    // initialize data structures  
    fTimeSpace = fopen ("timspace.txt", "wt");  
    DataInit ();  
  
    // simulate  
    cprintf ("\n\rSimulating...");  
    switch (Data.RunType) {  
        case RT_SIMULATE:  
            fTimeSpace = fopen ("ts.out", "wt");  
            fprintf (fTimeSpace, "%lu %d", (TIMETYPE) Data.TimeLimit,  
                    (int) Data.ArterialLength);  
            //trace (0, Data.TimeLimit);  
            simulate (0, Data.TimeLimit);  
            fclose (fTimeSpace);  
            break;  
        case RT_ANIMATE:  
            linkvar (&TimeNow, 0);  
            linkvar (&Data.TotalPass, 1);  
            strcpy (sAnimFile, sDataFile);  
            sPtr = strchr (sAnimFile, '.');  
            if (sPtr) *sPtr = 0;  
            strcat (sAnimFile, ".PRS");  
            AnimInit (sAnimFile);  
            animate (0, Data.TimeLimit, sAnimFile, 0, 0, NULL);  
    }  
}
```

```

}

// output
fclose (fTimeSpace);
for (i = 0; i < Data.nPTypes; i++) dem += 36000L/Data.PType[i].h;
x4 = Data.TotalPass;
x5 = Data.VehiclesDestroyed;
x9 = get_stats (Data.PassWaitingQ, QS_GDAVG)/10;
x10 = get_stats (Data.PassWaitingQ, QS_GPAVG);
x11 = get_stats (Data.StandByQ, QS_GDAVG)/10;
x12 = get_stats (Data.StandByQ, QS_GPAVG);
x13 = Data.VehiclesCreated;
avgspeed = 0;
avgocc = 0;
for (i = 1; i <= Data.VehiclesDestroyed; i++) {
    avgspeed += Data.Speeds[i];
    avgocc += Data.BusOccupations[i];
}
avgspeed /= Data.VehiclesDestroyed;
avgocc /= Data.VehiclesDestroyed;
varspeed = 0;
varocc = 0;
for (i = 1; i <= Data.VehiclesDestroyed; i++) {
    varspeed += (avgspeed - Data.Speeds[i]) * (avgspeed - Data.Speeds[i]);
    varocc += (avgocc - Data.BusOccupations[i]) * (avgocc - Data.BusOccupations[i]);
}
varspeed /= (Data.VehiclesDestroyed - 1);
varocc /= (Data.VehiclesDestroyed - 1);
printf ("\nd: %f ", dem);
printf ("v: %f ", avgspeed);
printf ("varv: %f ", varspeed);
printf ("oc: %f ", avgocc);
printf ("varoc: %f ", varocc);
printf ("wg: %f ", x9);
printf ("qg: %f ", x10);
printf ("p: %f ", x4);
printf ("b des: %f ", x5);
printf ("atraso ord: %f ", x11);
printf ("#bus ord: %f ", x12);
printf ("bus created: %f ", x13);
}

```

```

//-----
// BUS.C - Buses
// modulo de controle de onibus
//-----
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <assert.h>
#include <mosaic.h>
#include "mosart.h"
#include "carfoll.h"
#include "randgen.h"

//-----
// vehicle generation function
//-----
TIMETYPE VHeadway (int type) {
    float TotalFlow = 0;
    int h;
    int i;
    h = nexp (Data.VType[type].hmin, Data.VType[type].h, 90000L, Data.SeedBusGen);
    if (TimeNow >= Data.RelaxationTime) Data.VehiclesCreated ++;
    return (h);
}

//-----
// vehicle script
//-----
void ScriptVehicle (ENT* e) {
    VEHICLE* vMe = e->udat;
    VEHICLE* vBehind;
    ENT* eBehind;
    ENT* ePass;
    ENT* eTail;
    VEHICLE* vTail;
    PASSENGER* pPass;
    float v1, v2, v3, v, xs, xb, x;
    int s;
    float triptime;
    float speed;
    SCRIPT (e)
}

```

```

//-----
// INITIALIZE BUS
// set icon
e->icon = IC_VEHICLE + e->type;

// sample random characteristics of vehicle
vMe->vdes = NORMSAMPLE (Data.Vdes, Data.SeedBusGen);
vMe->acc = NORMSAMPLE (Data.Acc, Data.SeedBusGen);
vMe->dec = -2.0 * vMe->acc;

// create an internal queue for passengers
vMe->passq = new_queue (NULL, INFINITE_CAP, 0);

// keep track of next and last bus stops visited
vMe->next_stop = 0;
vMe->last_stop = -1;

// setbacks correspond to desired berths at bus stops
if (Data.Discipline == 1) {
    e->prty = -e->type;
    if (e->type < 6) vMe->setback = e->type * Data.BusLength - 2;
    if (vMe->setback < 0) vMe->setback = 0;
} else vMe->setback = 0;

//-----
// enter and leave stand by queue, enter arterial
enterq (e, Data.StandByQ);

// wait for dispatcher signal to proceed
if (Data.Discipline > 0) {
    wait (e, e->type);
} else wait (e, 1000);

// reset priority (it's no use anymore)
e->prty = 0;

// leave stand by and enter arterial queue
vMe->ahead = qtail (Data.ArtQ);
enterq (e, Data.ArtQ);
leaveq (e, Data.StandByQ);
vMe->TimeInSys = TimeNow;

//-----
// travel through arterial
while (vMe->xcur < Data.ArterialLength) {
    ENT* eAhead = vMe->ahead;
    VEHICLE* vAhead = (eAhead == NULL)
        ? NULL
        : eAhead->udat;

    // update vehicle speed and position
    vMe->xold = vMe->xcur;
    vMe->vold = vMe->vcur;

    // 1) calculate free flow speed
    v1 = vff (vMe->vold, vMe->vdes, vMe->acc, Data.TimeIncr);

    // 2) calculate congested flow speed
    if (eAhead) {
        // assert that there is no collision
        assert (vMe->xold == 0 ||
            vMe->xold <= vAhead->xold - Data.BusLength);
        v2 = vcf (vMe->xold, vMe->vold, vMe->dec, Data.BusLength,
            vAhead->xold, vAhead->vold, vAhead->dec, Data.TimeIncr);
    } else v2 = v1;

    // identify the next standing still obstacle
    // a) Semaphore
    if (Data.nSignals) {
        for (s = 0; s < Data.nSignals; s++) {
            if (Data.Signal[s].x < vMe->xold) continue;
            if (Data.Signal[s].state != SS_GREEN) break;
        }
        xs = (s < Data.nSignals)
            ? Data.Signal[s].x
            : 20000;
    } else xs = 20000;

    // b) Bus stop
    if (vMe->next_stop >= Data.nBusStops)
        xb = 20000;
    else
        xb = Data.BusStop[vMe->next_stop].x - vMe->setback;

    // consider the closest

```

```

x = min (xs, xb);

// assert obstacle is indeed ahead
assert (x >= vMe->xold);

// 3) calculate speed to approach next semaphore or bus stop
v3 = vcf (vMe->xold, vMe->vold, vMe->dec, 0, x, 0, -1, Data.TimeIncr);

// if it is not possible do decelerate that hard, ignore...
if ((v3 - vMe->vold)/Data.TimeIncr <= vMe->dec) v3 = v1;

// current speed is the minimum of the above
vMe->vcur = min (v1, min (v2, v3));

// update current position based on average speed
v = (vMe->vold + vMe->vcur) / 2;
vMe->xcur = vMe->xold + v * Data.TimeIncr;

// don't drink and drive!!! Avoid accidents!!!
if (eAhead && vMe->xcur > vAhead->xold - Data.BusLength) {

    // printf ("\n Ouch!!! That was a near crash...");
    vMe->xcur = vAhead->xold - Data.BusLength;
    vMe->vcur = 0;
}

// no negative positions, please
if (vMe->xcur < 0) {
    vMe->xcur = 0;
    vMe->vcur = 0;
}

// we're done with updating!
// display info
if (Data.RunType == RT_ANIMATE)
    ent_show (e, vMe->xcur, 0);

// serve passengers at bus stop
if (ReadyToServe(e)) {
    gosub (e, ServeBusStop);
}

// otherwise, let time pass one unit
} else {
    delayent (e, Data.TimeIncr);
}
}

//-----
// this vehicle has accomplished its mission on earth. So long...
Data.VehiclesDestroyed ++;
// make sure vehicle ahead has left arterial
if (vMe->ahead) {
    assert (posinq (vMe->ahead, Data.ArtQ) < 0);
}
if (TimeNow >= Data.RelaxationTime) {
    Data.BusOccupations[Data.VehiclesDestroyed] = qpop (vMe->passq);
}

// destroy all passengers on board
while (qpop (vMe->passq) > 0) {
    ePass = qhead(vMe->passq);
    pPass = ePass->uadat;
    Data.TotalPass++;
    Data.PassKm = Data.PassKm + (Data.ArterialLength -
        Data.BusStop[pPass->origin].x) / 1000.0;
    leaveq (ePass, vMe->passq);
    leaveq (ePass, Data.PassTravelingQ);
    free_ent (ePass);
}

// assert bus is empty
assert (qpop(vMe->passq) == 0);
free_queue (vMe->passq);

// leave arterial
leaveq (e, Data.ArtQ);

// predecessor is new head (we're no longer ahead of him)
eBehind = qhead (Data.ArtQ);
if (eBehind) {
    vBehind = eBehind->uadat;
    assert (vBehind->ahead == e);
    vBehind->ahead = NULL;
}

// die
triptime = (TimeNow - vMe->TimeInSys) / 10.0;

```

```

speed = Data.ArterialLength / triptime * 3.6;
Data.TotalTravelTime = Data.TotalTravelTime + speed;
if (TimeNow >= Data.RelaxationTime) {
    Data.Speeds[Data.VehiclesDestroyed] = speed;
}
if (Data.RunType == RT_ANIMATE) ent_hide (e);
dispose (e);
ENDSCRIPT
}

//-----
// this function checks if bus is ready to serve bus stop
//-----
int ReadyToServe (ENT* e) {
    VEHICLE* vMe      = e->udat;
    float BusEachType = Data.MaxBusesPerCycle / Data.nVTypes;

    // We must detect 2 different cases:
    // 1) Conventional operation: bus will stop if slow and within bustop area
    //    (even if it's very upstream, likely to block other buses)
    // 2) Ordered platoons: bus will stop if slow and close enough to its own
    //    dedicated berth. If it's upstream and likely to block others, it
    //    shall not stop.

    // we're not ready if there's no bus stop ahead
    if (vMe->next_stop >= Data.nBusStops) return 0;

    // we're not ready if we're too fast
    if (vMe->vcur      > Data.StopSpeed) return 0;

    // we're not ready if we're far away from bus stop
    if (vMe->xcur < Data.BusStop[vMe->next_stop].x -
        Data.BusStop[vMe->next_stop].length) return 0;

    // we're not ready if we're not in our own dedicated berth
    if (Data.Discipline == 1 &&
        Data.BusStop[vMe->next_stop].x - vMe->setback - vMe->xcur >
        (1) * Data.BusLength)
        return 0;

    // else, we're ready to get passengers
    return 1;
}

//-----
// this function serves bus stop (it's a piece of script)
//-----
void ServeBusStop (ENT* e) {
    VEHICLE * vMe = e->udat;
    VEHICLE * vOther;
    ENT * ePass;
    PASSENGER * pPass;
    ENT * eBus;
    int i;
    int TempoEmbarque;

SCRIPT (e)

    // bus enters a local queue at this bus stop and a global one
    enterq (e, Data.BusStop[vMe->next_stop].vque);
    enterq (e, Data.BusStopVQ);

    // set flag to say bus is loading
    vMe->loading = 1;

    // wait until doors are open and passengers approach
    TempoEmbarque = (int) (norm (Data.FixedTime, 0.0 * Data.FixedTime,
                                0, 1000, 13) + 0.5);
    delaynt (e, TempoEmbarque);

    // let passengers in
    BoardingPoint:
    for (vMe->i = 0;
        vMe->loading &&
        qpop (vMe->passq) < Data.BusCapacity;) {

        // if no more passengers, quit
        ePass = entinq (Data.BusStop[vMe->next_stop].pque, vMe->i);
        if (!ePass) break;

        // if passenger is wrong type, try next one
        if (!Data.Match [e->type * Data.nPTypes + ePass->type]) {
            vMe->i++;
            continue;
        }
    }
}

```

```

// passenger changes queues
enterq (ePass, vMe->passq);
leaveq (ePass, Data.BusStop[vMe->next_stop].pque);
TempoEmbarque = (int) (norm (Data.BoaardingTime, 0.0 * Data.BoardingTime,
                          0, 1000, 13) + 0.5);
if (vMe->TimeInSys < 10000) {
    delaynt (e, TempoEmbarque/2);
}
else delaynt (e, TempoEmbarque);

// start search all over
}

// if someone ahead of me is still loading, I can't go...
for (i = 0; i < qpop(Data.BusStop[vMe->next_stop].vque); i++) {
    eBus = entinq(Data.BusStop[vMe->next_stop].vque, i);
    if (eBus == e) break;
    vOther = eBus->udat;
    if (vOther->loading) {
        delaynt (e, 10);
        goto BoardingPoint;
    }
}
}
EndOfScript:

// load & unload is concluded. Leave this bus stop and aim the next
// passenger changes queues
for (i = 0; i < qpop (vMe->passq); i++) {
    ePass = entinq (vMe->passq, i);
    pPass = ePass->udat;
    if (!pPass->traveling) {
        enterq (ePass, Data.PassTravelingQ);
        leaveq (ePass, Data.PassWaitingQ);
        pPass->traveling = 1;
    }
}
leaveq (e, Data.BusStop[vMe->next_stop].vque);
leaveq (e, Data.BusStopVQ);
if (vMe->loading && qpop (vMe->passq) < Data.BusCapacity) {
    vMe->loading = 0;
    for (i = 0; i < qpop(Data.BusStop[vMe->next_stop].vque); i++) {
        eBus = entinq(Data.BusStop[vMe->next_stop].vque, i);
        if (eBus->type == e->type) {
            vOther = eBus->udat;
            vOther->loading = 0;
        }
    }
}

// done with this stop
vMe->last_stop = vMe->next_stop;
vMe->next_stop++;
ret sub (e);
ENDSCRIPT
}

```

```

//-----
// PASS.C - Passengers
// módulo de controle de passageiros
//-----
#include <string.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <assert.h>
#include <mosaic.h>
#include "mosart.h"
#include "carfoll.h"
#include "randgen.h"

//-----
// passenger headway function
//-----
TIMETYPE PHeadway (int type) {
    int h;
    if (TimeNow < 5000) {
        h = 5000 + 60 * type;
        return h;
    } else {
        h = nexpt (Data.PType[type].hmin, Data.PType[type].h,
                  90000L, Data.SeedPasGen);
        return (h);
    }
}
}

```

```

//-----
// passenger script
//-----
void ScriptPassenger (ENT* e) {
    ENT*      ePass;
    PASSENGER* pPass;
    SCRIPT (e)

    // if we have a bus stop
    if (Data.nBusStops > 0) {

        // create passive passenger entity
        ePass = new_entity (e->type, 0, sizeof (PASSENGER), NULL);
        ePass->icon = IC_PASSENGER;

        // and fill it with data
        pPass = ePass->udat;
        pPass->origin = Data.PType[e->type].origin;

        // leave passenger at bus stop
        enterq (ePass, Data.BusStop [pPass->origin].pque);
        enterq (ePass, Data.PassWaitingQ);
    }

    // we're done
    dispose (e);
ENDSCRIPT
}

```

```

//-----
// DISP.C - Dispatcher
// modulo de controle de despacho de onibus
//-----

```

```

#include <string.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <assert.h>
#include <mosaic.h>
#include "mosart.h"
#include "carfoll.h"
#include "randgen.h"

```

```

//-----
// dispatcher script
//-----
void ScriptDispatcher (ENT* e) {
    static int i = 0;
    int VehiclesOfEachType = Data.MaxBusesPerCycle / Data.nVTypes;
    static int line = 0;
    float TotalFlow = 0;
    SCRIPT (e)
    Data.DispatchCycle = (int) Data.VType[0].h / 1.2 - 360;
    if (Data.Discipline == 0) Data.DispatchCycle = 0;

    // allow a little offset
    delayent (e, 10);

    // we need to get rid of the first vehicles
    if (TimeNow <= 10) {
        if (Data.Discipline == 0) send_signal (1000, Data.nVTypes);
        if (Data.Discipline == 1) for (i = 0; i < Data.nVTypes; i++) send_signal (i, 5);
        delayent (e, 600);
    }

    // eternal loop
    for (;;) {

        // dispatch vehicles
        if (Data.Discipline == 0) {

            // dispatch the oldest vehicles
            for (i = 0; i < Data.nVTypes; i++) {
                send_signal (1000, 1);

                // wait time necessary for next bus in this cycle
                delayent (e, 60);
            }
        }

        if (Data.Discipline == 1) {

            // dispatch one of each type
            for (i = 0; i < Data.nVTypes; i++) {
                send_signal (line, 1);
            }
        }
    }
}

```

```

    line ++;
    if (line == Data.nVTypes) line = 0;

    // wait time necessary for next bus in this cycle
    delayent (e, 60);
  }
}

// close entry for every vehicle
delayent (e, Data.DispatchCycle);
}
ENDSCRIPT
}

```

```

//-----
// SEMA.C - Semaphore
// modulo de controle dos semaforos
//-----

```

```

#include <string.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <assert.h>
#include <mosaic.h>
#include "mosart.h"
#include "carfoll.h"
#include "randgen.h"

```

```

//-----
// semaphore script
//-----

```

```

void ScriptSemaphore (ENT* e) {
  SCRIPT (e)

  // start green, wait offset
  Data.Signal[e->type].state = SS_GREEN;
  delayent (e, Data.Signal[e->type].offset);

  // eternal loop
  for (;;) {

    // be green
    if (Data.RunType == RT_ANIMATE) {
      e->icon = IC_GREEN;
      ent_show (e, Data.Signal[e->type].x, 0);
    }
    Data.Signal[e->type].state = SS_GREEN;
    delayent (e, Data.Signal[e->type].green);

    // be amber
    if (Data.RunType == RT_ANIMATE) {
      e->icon = IC_AMBER;
      ent_show (e, Data.Signal[e->type].x, 0);
    }
    Data.Signal[e->type].state = SS_AMBER;
    delayent (e, Data.Signal[e->type].amber);

    // be red
    if (Data.RunType == RT_ANIMATE) {
      e->icon = IC_RED;
      ent_show (e, Data.Signal[e->type].x, 0);
    }
    Data.Signal[e->type].state = SS_RED;
    delayent (e, Data.Signal[e->type].red);
  }
}
ENDSCRIPT
}

```

```

//-----
// CARFOLL.C - Car-following model
//-----

```

```

#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <assert.h>
#include "carfoll.h"

```

```

//-----
// Free flow speed at time (t + tau)
// Parameters:
// v : speed at time t (m/s);
// vd : desired speed (m/s);
// a : maximum desired acceleration (m/s/s);
// tau: time increment (s).
//-----
float vff (float v, float vd, float a, float tau) {

```

```

// this little adjustment is necessary for very high accelerations
if (v > vd) v = vd;

// Gipp's model
//v = v + 2.5 * a * tau * (1 - v/vd) * sqrt (0.025 + v/vd);

// Linear acceleration model
v = v + a * (1 - v/vd) * tau;

// this never happens, but I want to be safe
if (v < 0) v = 0;

// ready
return v;
}

//-----
// Congested flow speed at time (t + tau)
// Parameters:
// x : position at time t;
// v : speed at time t;
// b : maximum desired deceleration;
// s0 : effective length of vehicle ahead;
// x0 : position of vehicle ahead at time t;
// v0 : speed of vehicle ahead at time t;
// d0 : deceleration of vehicle ahead
// tau: time increment.
//-----
float vcf (float x, float v, float b, float s0, float x0,
          float v0, float d0, float tau) {
    v = b * b * tau * tau - b * (2 * (x0 - s0 - x) -
    v * tau - v0 * v0 / d0);

    // make sure this is a non negative number
    if (v < 0) v = 0;

    // calculate speed
    v = b * tau + sqrt (v);

    // no back ups, please
    if (v < 0) v = 0;

    // ready
    return v;
}

//-----
// RANDMAN.C - Random number generator
//-----
#include <math.h>
#include <assert.h>
#include "randgen.h"

// Define the constants.
#define MODLUS 2147483647L
#define MULT1 24112
#define MULT2 26143

// Set the default seeds for all 100 streams.
static long zrng[] = {
1973272912L, 281629770L, 20006270L,1280689831L,2096730329L,1933576050L,
913566091L, 246780520L,1363774876L, 604901985L,1511192140L,1259851944L,
824064364L, 150493284L, 242708531L, 75253171L,1964472944L,1202299975L,
233217322L, 1911216000L, 726370533L, 403498145L, 993232223L,1103205531L,
762430696L, 1922803170L,1385516923L, 76271663L, 413682397L, 726466604L,
336157058L, 1432650381L,1120463904L, 595778810L, 877722890L,1046574445L,
68911991L, 2088367019L, 748545416L, 622401386L,2122378830L, 640690903L,
1774806513L, 2132545692L,2079249579L, 78130110L, 852776735L,1187867272L,
1351423507L, 1645973084L,1997049139L, 922510944L,2045512870L, 898585771L,
243649545L, 1004818771L, 773686062L, 403188473L, 372279877L,1901633463L,
498067494L, 2087759558L, 493157915L, 597104727L,1530940798L,1814496276L,
536444882L, 1663153658L, 855503735L, 67784357L,1432404475L, 619691088L,
119025595L, 880802310L, 176192644L,1116780070L, 277854671L,1366580350L,
1142483975L, 2026948561L,1053920743L, 786262391L,1792203830L,1494667770L,
1923011392L, 1433700034L,1244184613L,1147297105L, 539712780L,1545929719L,
190641742L, 1645390429L, 264907697L, 620389253L,1502074852L, 927711160L,
364849192L, 2049576050L, 638580085L, 547070247L
};

// Generate the next random number.
float randun(int stream) {
    long zi, lowprd, hi31;
    zi = zrng[stream%100];
    lowprd = (zi & 65535L) * MULT1;
    hi31 = (zi >> 16) * MULT1 + (lowprd >> 16);
    zi = ((lowprd & 65535L) - MODLUS) + ((hi31 & 32767L) << 16) + (hi31 >> 15);
}

```

```

    if (zi < 0) zi += MODLUS;
    lowprd = (zi & 65535L) * MULT2;
    hi31 = (zi >> 16) * MULT2 + (lowprd >> 16);
    zi = ((lowprd & 65535L) - MODLUS) + ((hi31 & 32767L) << 16) + (hi31 >> 15);
    if (zi < 0) zi += MODLUS;
    zrng[stream] = zi;
    return (((zi >> 7) | 1) + 1) / 16777216.0;
}

// Set the current zrng for stream "stream" to zset.
void randst (long zset, int stream) {
    zrng[stream] = zset;
}

// Return the current zrng for stream "stream".
long randgt (int stream) {
    return zrng[stream];
}

// The following functions generate random variates
// Return the next normally distributed variable
float norm (float mean, float s, float xmin, float xmax, int stream) {
    float u1, u2, v1, v2, w, y, x;
    if (s == 0) return mean;
    assert (xmin <= mean);
    assert (mean <= xmax);
    do {
        do {
            u1 = randun(stream);
            u2 = randun(stream);
            v1 = 2.0 * u1 - 1;
            v2 = 2.0 * u2 - 1;
            w = v1 * v1 + v2 * v2;
        } while (w > 1);
        y = sqrt (-2.0 * log (w) / w);
        x = v1 * y;
        x = mean + s * x;
    } while (x < xmin || x > xmax);
    return x;
}

// Return the next negative-exponentially distributed variable
float nexpt (float shift, float mean, float xmax, int stream) {
    float u, x;
    if (shift < 0) return mean;
    if (shift > mean)
        assert (shift <= mean);
    assert (mean <= xmax);
    do {
        u = randun (stream);
        x = shift - (mean - shift) * log (u);
    } while (x > xmax);
    return x;
}

```

```

//-----
// REFRESH.C - Statistics refresher
//-----

```

```

#include <string.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <conio.h>
#include <ctype.h>
#include <assert.h>
#include <mosaic.h>
#include "mosart.h"

```

```

//-----
// refresher script
//-----

```

```

void ScriptRefresher (ENT* e) {
    SCRIPT (e)
    delayent (e, Data.RelaxationTime);
    reset_stats();
    Data.TotalTravelTime = 0;
    Data.PassKm = 0;
    Data.VehiclesDestroyed = 0;
    Data.TotalPass = 0;
    delayent (e, 2 * Data.TimeLimit);
    ENDSRIPT
}

```

```

//-----

```

```

// MOSDATA.C - Read and write data and animation files
//-----
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <ctype.h>
#include <conio.h>
#include <assert.h>
#include <time.h>
#include <mosaic.h>
#include "mosart.h"
#include "randgen.h"

//-----
// read data
//-----
void DataRead (FILE* f) {
    int i, j;
    float TotalFlow = 0;

    // no missing fields allowed
    ScanExact = TRUE;

    // read global data
    cprintf ("global, ");
    searchtoken (f, "global");
    scandata (f, "Time: %f Incr: %f Discipline: %d GonzoBus: %f GonzoPass: %f",
              &Data.TimeLimit, &Data.TimeIncr, &Data.Discipline,
              &Data.GonzoBus, &Data.GonzoPass);
    scandata (f, "SeedBusGen: %d SeedPasGen: %d",
              &Data.SeedBusGen, &Data.SeedPasGen);
    Data.TimeLimit *= 10.0;
    Data.TimeIncr *= 10.0;
    randomize();
    Data.SeedBusGen = 1 + rand() % 99;
    Data.SeedPasGen = 1 + rand() % 99;
    Data.SeedBusGen = 1 + rand() % 99;

    // read geometry
    cprintf ("geometry, ");
    searchtoken (f, "geometry");
    scandata (f, "ArterialLength: %f", &Data.ArterialLength);
    scandata (f, "Semaphores: %d", &Data.nSignals);
    if (Data.nSignals) {
        Data.Signal = tmalloc (Data.nSignals * sizeof (SIGNAL), "Signals");
        for (i = 0; i < Data.nSignals; i++) {
            scandata (f, "x: %f r: %f a: %f g: %f o: %f",
                    &Data.Signal[i].x, &Data.Signal[i].red, &Data.Signal[i].amber,
                    &Data.Signal[i].green, &Data.Signal[i].offset);
            Data.Signal[i].red *= 10;
            Data.Signal[i].amber *= 10;
            Data.Signal[i].green *= 10;
            Data.Signal[i].offset *= 10;
        }
    }
    scandata (f, "BusStops: %d", &Data.nBusStops);
    if (Data.nBusStops) {
        Data.BusStop = tmalloc (Data.nBusStops * sizeof (BUSSTOP), "Bus Stops");
        for (i = 0; i < Data.nBusStops; i++)
            scandata (f, "x: %f l: %f",
                    &Data.BusStop[i].x, &Data.BusStop[i].length);
    }

    // read vehicles
    cprintf ("vehicles, ");
    searchtoken (f, "characteristics");
    scandata (f, "length: %f capacity: %d", &Data.BusLength, &Data.BusCapacity);
    scandata (f, "vel: %f cv: %f min: %f max: %f",
              &Data.Vdes.avg, &Data.Vdes.std, &Data.Vdes.min, &Data.Vdes.max);
    scandata (f, "acc: %f cv: %f min: %f max: %f",
              &Data.Acc.avg, &Data.Acc.std, &Data.Acc.min, &Data.Acc.max);
    Data.Vdes.avg *= 0.1;
    Data.Vdes.min *= 0.1;
    Data.Vdes.max *= 0.1;
    Data.Acc.avg *= 0.01;
    Data.Acc.min *= 0.01;
    Data.Acc.max *= 0.01;

    // VARIABILIDADE NO DESEMPENHO DOS ONIBUS
    Data.Vdes.std *= Data.Vdes.avg;
    Data.Acc.std *= Data.Acc.avg;
    scandata (f, "Types: %d", &Data.nVTypes);
    if (Data.nVTypes) {
        Data.VType = tmalloc (Data.nVTypes * sizeof (VTYPE), "VTypes");
        for (i = 0; i < Data.nVTypes; i++) {

            // name and headways
            scandata (f, "Name: %s vol: %f cv: %f hmax: %f",

```

```

        &Data.VType[i].name, &Data.VType[i].h,
        &Data.VType[i].hmin, &Data.VType[i].hmax);
    TotalFlow += Data.GonzoBus * Data.VType[i].h;

    // replace volume by headway
    Data.VType[i].h = (36000L / Data.VType[i].h / Data.GonzoBus);
    Data.VType[i].hmin = (1.0 - Data.VType[i].hmin) * Data.VType[i].h;
}
}

// read passengers
cprintf ("passengers, ");
searchtoken (f, "passengers");
scandata (f, "Types: %d", &Data.nPTypes);
if (Data.nPTypes) {
    Data.PType = tmalloc (Data.nPTypes * sizeof (PType), "PTypes");

    // create array to match vehicle type VT and pass type PT
    // if vehicle type VT matches pass type PT, then
    // Data.Match [VT * Data.nPTypes + PT] = 1
    Data.Match = tmalloc (Data.nVTypes * Data.nPTypes * sizeof (int), "Match");
    for (i = 0; i < Data.nPTypes; i++) {

        // origin, destination, headways
        scandata (f, "or: %d vol: %f cv: %f hmax: %f",
            &Data.PType[i].origin, &Data.PType[i].h,
            &Data.PType[i].hmin, &Data.PType[i].hmax);

        // replace volume by headway
        Data.PType[i].h = 36000L / Data.PType[i].h / Data.GonzoPass;
        Data.PType[i].hmin = (1.0 - Data.PType[i].hmin) * Data.PType[i].h;

        // see if vehicle type j is fine for pass type i
        for (j = 0; j < Data.nVTypes; j++)
            scandata (f, "vt: %d", &Data.Match [j * Data.nPTypes + i]);
    }
}

// read times regression for boarding/alighting time
searchtoken (f, "servicetime");
scandata (f, "FixedTime: %f cv: %f min: %f max: %f",
    &Data.FixedTime, &Data.FTstd, &Data.FTmin, &Data.FTmax);
scandata (f, "BoardingTime: %f cv: %f min: %f max: %f",
    &Data.BoardingTime, &Data.BTstd, &Data.BTmin, &Data.BTmax);
Data.FixedTime *= 10;
Data.FTstd *= Data.FixedTime;
Data.FTmin *= 10;
Data.FTmax *= 10;
Data.BoardingTime *= 10;
Data.BTstd *= Data.BoardingTime ;
Data.BTmin *= 10;
Data.BTmax *= 10;

// read dispatch
searchtoken (f, "dispatch");
scandata (f, "Cycle: %d", &Data.DispatchCycle);
scandata (f, "MaxBusesPerCycle: %d", &Data.MaxBusesPerCycle);

// PARA ORDENACAO, FLUXO = x% Capacidade do ordenador
Data.DispatchCycle *= 10;

// read other data
searchtoken (f, "others");
scandata (f, "RelaxationTime: %f", &Data.RelaxationTime);
scandata (f, "StopSpeed: %f", &Data.StopSpeed);
Data.RelaxationTime *= 10;
Data.StopSpeed *= 0.1;
Data.Speeds = tmalloc (500 * sizeof (float), "Speeds");
Data.BusOccupations = tmalloc (500 * sizeof (int), "BusOccupations");
}

//-----
// init data
//-----
void DataInit (void) {
    int i;

    // create arterial
    Data.ArtQ = new_queue ("Arterial", INFINITE_CAP, Q_STATS);

    // create assembling yard
    Data.StandByQ = new_queue ("StandBy", INFINITE_CAP, Q_STATS);

    // create congestion queue
    Data.CongestionQ = new_queue ("Congestion", INFINITE_CAP, Q_STATS);

    // creat queues for passengers

```

```

Data.PassWaitingQ = new_queue ("PassWaiting", INFINITE_CAP, Q_STATS);
Data.PassTravelingQ = new_queue ("PassTraveling", INFINITE_CAP, Q_STATS);

// create queues for each bus stop
for (i = 0; i < Data.nBusStops; i++) {
    sprintf (GlbBuf, "Bus Stop %d", i);
    Data.BusStop[i].pqque = new_queue (strdup (GlbBuf),
                                        INFINITE_CAP, Q_STATS | Q_ANIM);
}
for (i = 0; i < Data.nBusStops; i++) {
    sprintf (GlbBuf, "Bus Stop for vehicles %d", i);
    Data.BusStop[i].vqque = new_queue (strdup (GlbBuf), INFINITE_CAP, Q_STATS);
}
Data.BusStopVQ = new_queue ("Bus Stop for Buses", INFINITE_CAP, Q_STATS);

// create vehicle factories
for (i = 0; i < Data.nVTypes; i++) {
    create (INFINITE_ENTS, // max entities to create
           0, INFINITE_TIME, // time interval
           VHeadway, // interarrival function
           i, // entity type = vehicle type
           0, // priority
           sizeof (VEHICLE), // user-defined data structure size
           ScriptVehicle);
}

// create passenger factories
for (i = 0; i < Data.nPTypes; i++){
    create (INFINITE_ENTS, // max entities to create
           0, INFINITE_TIME, // time interval
           PHeadway, // interarrival function
           i, // entity type = passenger type
           0, // priority
           sizeof (PASSENGER), // user-defined data structure size
           ScriptPassenger);
}

// create semaphores
for (i = 0; i < Data.nSignals; i++) {
    create (1, // max entities to create
           0, INFINITE_TIME, // time interval
           NULL, // interarrival function
           i, // entity type = semaphore #
           0, // priority
           0, // user-defined data structure size
           ScriptSemaphore);
}

// create dispatcher
create (1, // max entities to create
       0, INFINITE_TIME, // time interval
       NULL, // interarrival function
       0, // entity type
       0, // priority
       0, // user-defined data structure size
       ScriptDispatcher);

// create refresher
create (1, // max entities to create
       0, INFINITE_TIME, // time interval
       NULL, // interarrival function
       0, // entity type
       0, // priority
       0, // user-defined data structure size
       ScriptRefresher);

// create reporter
create (1, // max entities to create
       0, INFINITE_TIME, // time interval
       NULL, // interarrival function
       0, // entity type
       0, // priority
       0, // user-defined data structure size
       ScriptReporter);
}

//-----
// initialize animation
//-----
void AnimInit (char* fname) {
    FILE* f;
    int i, x;
    int x1, y1, x2, y2;
    char sPercent [ 1 ] = "%";

    //-----
    // create file

```

```

f = fopen (fname, "wt");
if (!f) err (CANTOPENFILE, fname);

//-----
// write header
fprintf (f, "%s - MOSART Animation Layout File"
         "\n%s - MOSART Animation Layout File",
         fname);

//-----
// draw icons
x1 = (int) -Data.ArterialLength / 10;
x2 = (int) Data.ArterialLength + Data.ArterialLength / 10;
y1 = -300;
y2 = +300;
fprintf (f, "\n\n%% ICON SECTION"
         "\n%d %d %d %d setcoords default", x1, y1, x2, y2);

// macros
fprintf (f, "\n(0 0 setfill) (EMPTY) def (1 63 setfill) (FULL) def");

// passenger
fprintf (f, "\nclear"
         "\nFULL 0 0 6 6 disk"
         "\n0 0 mt 3 0 6 6 0 saveicon");

// green light
fprintf (f, "\nclear"
         "\n1 58 setfill 0 0 10 10 disk EMPTY 0 10 10 20 disk 0 20 10 30 disk"
         "\n0 0 mt 5 0 10 30 1 saveicon");

// amber light
fprintf (f, "\nclear"
         "\n0 0 10 10 disk 1 62 setfill 0 10 10 20 disk EMPTY 0 20 10 30 disk"
         "\n0 0 mt 5 0 10 30 2 saveicon");

// red light
fprintf (f, "\nclear"
         "\n0 0 10 10 disk 0 10 10 20 disk 1 60 setfill 0 20 10 30 disk EMPTY"
         "\n0 0 mt 5 0 10 30 3 saveicon");

// vehicles
for (i = 0; i < Data.nVTypes; i++) {
  x = (int) Data.BusLength;
  fprintf (f, "\nclear %d color 0 -15 %d 15 box 0 -15 mt %d 0 %d 15 %d saveicon",
          i + 58, x, x, x, IC_VEHICLE + i);
}

//-----
// draw layout
fprintf (f, "\n\n%% LAYOUT SECTION"
         "\n%d %d %d %d setcoords default EMPTY", x1, y1, x2, y2);

// draw arterial
fprintf (f, "\n%d %d mt %d %d lt %d %d mt %d %d lt",
         0, +20, (int) Data.ArterialLength, +20,
         0, -20, (int) Data.ArterialLength, -20);

// draw bus stops
for (i = 0; i < Data.nBusStops; i++) {
  fprintf (f, "\n%d 20 mt 0 -40 lr ( BUS) show",
          (int) Data.BusStop[i].x);
  fprintf (f, "\n%d -30 mt %d -300 (Bus Stop %d) savequeue",
          (int) Data.BusStop[i].x, (int) Data.BusStop[i].x, i);
}

//-----
// draw letterhead
fprintf (f, "\n\n%% LETTERHEAD SECTION"
         "\n%d %d %d %d setcoords default EMPTY", x1, y1, x2, y2);
fprintf (f, "\n%d %d mt (MOSART 1.00 - %s) show",
         x1, y2, fname);

//-----
// link variables
fprintf (f, "\n%d 250 mt (Time:) show", x1);
fprintf (f, "\n("); fprintf (f, sPercent); fprintf (f, "lu) 0 savevar");
fprintf (f, "\n0 200 mt (Pass:) show");
fprintf (f, "\n("); fprintf (f, sPercent); fprintf (f, "d) 1 savevar");

//-----
// close animation file
fprintf (f, "\n\n%% END OF ANIMATION LAYOUT FILE\n");
fclose (f);
}

```