

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS

SIMTRAF-OPERBUS

**UM SIMULADOR DE TRÁFEGO URBANO
COM A OPERAÇÃO DE ÔNIBUS DE TRANSPORTE COLETIVO**

MARCELO NISHI *(assinatura)*

Orientador:

Prof. Dr. Jurandir Fernando Ribeiro, Fernandes *(assinatura)*

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

- Outubro 1.993 -

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por MARCELO NISHI
aprovada pela Comissão
Julgadora em 22 de 03 de 1993
J.F.R.F.
Orientador

1.307/1.3

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram na realização deste trabalho, e especialmente:

- ao Jura, pela orientação durante o desenvolvimento da tese, pela sua ajuda, estímulo e grande amizade (um grande abraço!!!)
- aos professores do DENSIS, pela acolhida e amizade (meu muito obrigado!)
- ao Joni, pelo exemplo e camaradagem (um abraço!)
- ao Clovis, pelo tempo gasto comigo nas eternas dúvidas (obrigado pela paciência!)
- ao Raul, pelo auxílio burocrático
- ao Walcir, pelo apoio computacional
- à Dominique, pelo auxílio e amizade
- à Marcia, pelos “quebra galhos”
- aos professores do DMA/IMECC, pela atenção e interesse
- à minha família pelo constante interesse, apoio e amor
- e é claro, para os amigos do DENSIS, do IMECC e da FEE pelas horas de diversão e alegria (e olha que é uma lista grande: a todos um grande abraço!!!)

Esta tese contou com o apoio financeiro do CNPq e do FAEP.

*God grant me the serenity
To accept the things I cannot change;
The courage to change the things I can;
And the wisdom to know the difference.*

Reinhold Niebuhr

RESUMO - ABSTRACT

Este trabalho apresenta dois instrumentos de análise de desempenho do tráfego, que tem como objetivo avaliar diferentes políticas de regulação em uma dada rede. O SIMTRAF-OPERBUS é um simulador de tráfego urbano baseado em uma estrutura microscópica na qual o relógio da simulação é atualizado por técnicas de intervalos de tempos constantes ou variáveis. Este estudo ainda inclui um método de examinar as operações dos ônibus na rede e suas interações com os demais tipos de veículos.

This work presents two traffic performance analysis tools to evaluate different control strategies in a given network. SIMTRAF-OPERBUS is a traffic simulation program based on a microscopic structure which permits that the simulation time be increased by constant or variable time-slicing techniques. This study also includes a method for examining bus operations in the network, and their interaction with other types of vehicles.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO	3
1.1 DEFINIÇÕES INICIAIS	4
1.1.1 Definição do Sistema	4
1.1.2 A Construção do Modelo	5
1.2 PRINCÍPIOS DE UMA SIMULAÇÃO	6
1.2.1 A Simulação Passo-a-Passo e a Orientada a Eventos	7
1.2.2 A Simulação Determinística e a Estocástica	8
1.2.3 A Simulação Microscópica e a Macroscópica	8
1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
1.4 A ESCOLHA DO TIPO DE MODELO	13
CAPÍTULO 2: A REPRESENTAÇÃO DAS ENTIDADES DO MODELO	14
2.1 OS USUÁRIOS DO TRANSPORTE COLETIVO	14
2.2 OS VEÍCULOS	15
2.3 OS CRUZAMENTOS	16
2.3.1 A Representação Semafórica de um Cruzamento	17
2.4 AS VIAS	23
2.4.1 As Entradas da Rede	23
2.4.2 As Saídas da Rede	24
2.4.3 As Vias que Ligam Dois Cruzamentos	24
2.5 AS FAIXAS	28
2.6 OS PONTOS DE ÔNIBUS	31
2.7 AS LINHAS DE ÔNIBUS	31
CAPÍTULO 3: OS EVENTOS E AS OPERAÇÕES DO MODELO	33
3.1 A INJEÇÃO DE VEÍCULOS	33
3.1.1 A Injeção de Veículos Leves e Pesados	33
3.1.2 A Injeção de Ônibus	34

3.2	A ESCOLHA DA CONVERSÃO AO FINAL DAS VIAS	35
3.2.1	A Escolha se Refere a um Veículo Leve ou Pesado	35
3.2.2	A Escolha se Refere a um Ônibus de Transporte Coletivo	37
3.3	A ESCOLHA DA FAIXA DE UMA VIA	39
3.4	O DESLOCAMENTO DE VEÍCULOS NAS VIAS	43
3.4.1	O Tempo de Deslocamento dos Veículos	44
3.4.2	O Tempo de Permanência dos Ônibus nos Pontos de Parada	45
3.5	A SAÍDA DE VEÍCULOS DAS FAIXAS	47
3.5.1	O Intervalo de Aceitação	50
3.5.2	Conflitos	51
3.5.3	Impasses	55
3.6	A CHEGADA DE USUÁRIOS AOS PONTOS	58
3.7	O VOLUME DE PASSAGEIROS	58
3.7.1	As Demandas nos Pontos de Parada	59
3.8	AS FILAS	59
3.8.1	As Filas nos Pontos de Ônibus	59
3.8.2	As Filas nas Faixas	60
CAPÍTULO 4: A SIMULAÇÃO PASSO-A-PASSO		62
4.1	CONCEITOS BÁSICOS	62
4.2	AS ROTINAS DO MODELO PASSO-A-PASSO	64
4.2.1	O Corpo Principal do Modelo	64
4.2.2	A Mudança de Fase nos Cruzamentos	64
4.2.3	A Injeção de Veículos na Rede	64
4.2.4	A Chegada Efetiva de Veículos às Entradas	65
4.2.5	A Chegada Efetiva de Veículos nas Faixas	66
4.2.6	A Saída de Veículos das Faixas	66
4.2.7	A Transferência de Veículos	66
4.2.8	O Embarque de Passageiros nos Ônibus	67
4.2.9	A Chegada de Usuários nos Pontos de Ônibus	67
CAPÍTULO 5: A SIMULAÇÃO ORIENTADA A EVENTOS		68
5.1	CONCEITOS BÁSICOS	68
5.2	A LISTA DE EVENTOS FUTUROS	70
5.2.1	Filas de Prioridade	70
5.2.2	A Lista de Eventos Futuros do SIMTRAF-OPERBUS	73
5.3	AS ROTINAS DO MODELO ORIENTADO A EVENTOS	75
5.3.1	O Corpo Principal do Modelo	76
5.3.2	A Mudança de Fase nos Cruzamentos	76
5.3.3	A Injeção de Veículos na Rede	76
5.3.4	A Chegada Efetiva de Veículos às Entradas	77
5.3.5	A Chegada Efetiva de Veículos nas Faixas	77
5.3.6	A Saída de Veículos das Faixas	77
5.3.7	A Transferência de Veículos	78

5.3.8	O Embarque de Passageiros nos Ônibus	78
5.3.9	A Chegada de Usuários nos Pontos de Ônibus	79
CAPÍTULO 6: RESULTADOS COMPUTACIONAIS		80
6.1	DESCRIÇÃO DO EXEMPLO	80
6.1.1	Os Cruzamentos	81
6.1.2	As Entradas	81
6.1.3	As Vias	82
6.1.4	As Faixas	83
6.1.5	As Linhas de Ônibus	83
6.1.6	Os Ônibus	83
6.2	TESTES REALIZADOS	83
6.2.1	Resultados da Rede Básica	84
6.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	86
6.3.1	Resultados Obtidos	88
CONCLUSÃO		102
APÊNDICE I: OS PSEUDO-CÓDIGOS		105
I.1	A SIMULAÇÃO PASSO-A-PASSO	105
I.2	A SIMULAÇÃO ORIENTADA A EVENTOS	115
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		125
BIBLIOGRAFIA		127

INTRODUÇÃO

Desde os anos 60, os computadores têm se tornado menores, mais baratos, mais poderosos e mais fáceis de usar por não-especialistas. O desenvolvimento de máquinas portáteis de baixo custo e de alto desempenho possibilitou a abertura de grandes áreas de trabalho para as pessoas ligadas ao gerenciamento de sistemas. Computadores modernos permitem que o analista explore rapidamente a grande diversidade de opções em um problema de decisão, e esta rapidez de processamento de grandes quantidades de dados é extremamente importante para o gerenciador de sistemas.

Uma das maneiras pela qual o gerenciador utiliza um computador é através da simulação de um sistema. Isto é geralmente realizado quando é impossível, ou inconveniente, achar outro meio de se tratar o problema. A simulação de um sistema complexo consiste em decompô-lo em um grande número de elementos, em descrever o comportamento de cada elemento e as interações entre eles da forma mais realista possível, e em reproduzir, por meio de um computador, estes comportamentos e estas interações um grande número de vezes, de maneira a determinar o estado do sistema durante um período de tempo pré-especificado.

Neste sentido, a simulação de sistemas demonstra estar muito bem adaptada à regulação e à descrição do tráfego em uma rede. O desenvolvimento destes modelos tem sido um dos principais objetos de estudo de equipes especializadas na área de Engenharia de Tráfego durante os últimos 30 anos. Entretanto, a simulação não realiza a procura por um ótimo, contrariamente a certos métodos de Pesquisa Operacional utilizados em outros problemas de tráfego. Ela permite simplesmente experimentar e avaliar, em termos de fluidez dos veículos e dos tempos de atraso nas vias, por exemplo, diferentes estratégias de regulação do tráfego.

O desenvolvimento de um bom simulador deve seguir as seguintes características:

- ser um método fácil, rápido e barato de simulação de tráfego;
- ser aplicável ao estudo de malhas de estrutura geométrica qualquer;
- a entrada de dados deve ser facilmente compreendida e fácil de ser executada por pessoas não ambientadas com computadores;
- a saída de dados deve conter resultados de fácil leitura, próprios para o planejamento ou a modificação do sistema em estudo;

- deve ser escrito em forma modular, tal que a alteração de algum módulo possa ser efetuada sem alterar o resto do programa;
- deve ser operacional no que tange a introdução de novos dados e módulos.

Este trabalho enfoca um modelo de simulação de tráfego baseado no deslocamento de veículos individualizados considerando os elementos clássicos de uma malha viária urbana (cruzamentos semaforizados ou não, diferentes faixas de circulação, etc). A sua principal característica é a introdução da operação de ônibus de transporte coletivo na rede simulada. A construção deste modelo de simulação obedece às características listadas acima.

Os principais enfoques sobre a construção dos modelos de simulação de tráfego são apresentados no Capítulo 1. No Capítulo 2 são apresentados os elementos constituintes do sistema. Já o Capítulo 3 tem como objetivo explicar os aspectos do comportamento do tráfego simulado. Duas técnicas de tratamento do escoamento do tempo são tratadas neste trabalho: o modelo passo-a-passo e o modelo orientado a eventos, mostrados nos Capítulos 4 e 5, respectivamente. No Capítulo 6 é apresentada uma bateria de testes realizada numa seleção de problemas, na qual é analisado o comportamento dos modelos propostos. Por fim, são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e são sugeridas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 1

INTRODUÇÃO À SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO

Métodos de simulação computacional têm sido desenvolvidos desde o início da década de 60, e podem ser considerados, hoje, como a ferramenta mais comumente utilizada pelas ciências de gerenciamento. Os seus princípios básicos são muito simples [PIDD, 1988]. O analista constrói um modelo do sistema de interesse, elabora um programa computacional que englobe tal modelo e utiliza um computador para avaliar o comportamento do sistema quando este é submetido a várias políticas operacionais. Assim, a política de melhor performance pode ser selecionada.

Em 1991, Paul [PAUL, 1991] ressalta a crescente popularização das técnicas de simulação. O seu trabalho aponta que um dos principais motivos deste interesse se deve à maior facilidade de acesso aos computadores. Atualmente, os computadores apresentam menores preços, maior capacidade de armazenamento de dados e de realização de cálculos e maior flexibilidade na interação com o usuário que aqueles de tempos atrás.

Esta mesma popularização vem sendo sentida no campo da Engenharia de Tráfego. A apreciação de certos parâmetros do tráfego, como o escoamento de veículos na rede e os tempos de atraso nas vias, é frequentemente realizada através da utilização de recursos computacionais e de modelos de simulação de tráfego.

A simulação permite uma melhor compreensão dos fenômenos do tráfego e pode constituir um poderoso instrumento de apoio ao processo de decisão quando diferentes estratégias de regulação do tráfego são analisadas.

A experimentação de tais estratégias *in situ* fornece resultados exatos, mas se o propósito é o de testar um grande número de variantes, os custos e as dificuldades gerados pelas trocas de estratégias se tornam insuportáveis. Neste sentido, a utilização de um modelo de simulação permite, com menor custo, testar um grande número de políticas de regulação do tráfego.

Existem outros motivos adicionais que justificam o uso de técnicas de simulação no estudo de sistemas de tráfego urbano:

- a simulação permite a análise do comportamento do tráfego [BARCELÓ, 1989] (a ação de perturbações, o comportamento dos veículos nos cruzamentos), e de

suas variantes (planos de circulação, planos de coordenação de semáforos), onde técnicas formais analíticas não são aplicáveis;

- ela facilita a detecção das variáveis mais importantes e das suas interações no funcionamento do sistema [ESTEVES, 1982];
- a simulação testa a eficácia e a estabilidade de novos algoritmos [SOARES FILHO, 1974], [BAPTISTELLA, 1976], comparando métodos de otimização que utilizam diferentes critérios de performance;
- ela não incorpora riscos desnecessários quando analisamos diferentes políticas de regulação do tráfego. Os efeitos da sinalização e dos limites de velocidade, por exemplo, podem ser conjuntamente estudados sem confundir ou alarmar os motoristas [DREW, 1968]. A simulação oferece a possibilidade de determinar de antemão o efeito do fluxo crescente na configuração da rede atual. Pontos de congestionamento e locais de prováveis acidentes podem ser antecipados, e mudanças no desenho físico da rede podem ser efetuadas sem que esta necessidade se manifeste através de acidentes e congestionamentos reais.

1.1 DEFINIÇÕES INICIAIS

1.1.1 Definição do Sistema

Neste trabalho, o termo **sistema** é definido como um conjunto estruturado de componentes que interagem de modo regular entre si e com o meio ambiente, satisfazendo a certas restrições ambientais, para atingir determinados objetivos [PERIN FILHO, 1990]. Neste sentido, o meio ambiente é o meio dentro do qual o sistema se encontra e, neste trabalho, trata-se de uma rede viária urbana.

Os **componentes** são subsistemas que interagem entre si por meio de entidades que fluem de um componente para outro. Cada componente desenvolve a sua atividade absorvendo certas entidades, processando-as, transformando-as e liberando-as posteriormente. O nível em que cada uma destas atividades é desenvolvido define uma variável do sistema, e, em geral, está relacionado com as taxas de fluxo das entidades de entrada e saída do componente.

As **entidades** são os elementos do sistema que são simulados, e podem ser identificados e processados individualmente. Exemplos de entidades incluem os veículos, os passageiros dos ônibus, os cruzamentos e as vias: enfim, todos os elementos que mudam de estado durante a execução da simulação. As entidades que permanecem no sistema durante todo o período de simulação são denominadas *entidades permanentes*, e as que somente passam pelo sistema são denominadas *temporárias*, pois deixam de ser analisadas no instante em que saem do sistema. Assim, são exemplos de entidades permanentes os cruzamentos, os semáforos, as vias, as faixas, os pontos e as linhas de ônibus. As entidades temporárias incluem os veículos e os usuários do transporte coletivo.

Quando diversas entidades possuem as mesmas características, elas formam uma classe de entidades (exemplos: *classe de veículos*, *classe de vias*). As entidades de uma mesma classe apresentam

características próprias que as diferenciam de outras classes, que denominamos **atributos**. Um atributo pode ser importante para subdividir uma determinada classe, como no caso da distinção de um veículo leve de um pesado ou de um ônibus (atributo: *tipo de veículo*), ou então ele pode controlar o comportamento de uma entidade (atributo: *característica do veículo*).

Embora agrupadas em classes, durante a simulação as entidades mudam de estado e estes estados podem ser representados por conjuntos. Em alguns casos, alguns conjuntos podem ser imaginados como se fossem filas onde as entidades esperam algo acontecer. Estas filas têm uma disciplina específica, sendo a FIFO (*first in, first out*) a mais comum. Como exemplo, podemos citar a chegada de um usuário a um ponto de ônibus onde ele tem que esperar em uma fila até o instante de seu embarque.

O **estado do sistema**, em cada instante do tempo, é formado pelos valores tomados pelas variáveis de estado do sistema. Uma **variável de estado** pode ser o nível de funcionamento da atividade de um componente ou o atributo de uma entidade. As variáveis de estado devem ser criteriosamente escolhidas, pois é com base nos valores tomados por estas variáveis que se faz a observação do desempenho do modelo.

Mudanças no estado do sistema podem ser suaves (e contínuas) ou bruscas (e instantâneas). Uma alteração brusca no estado do sistema indica a ocorrência de um **evento**, como por exemplo, a chegada de um veículo, pois ela causa um salto unitário na variável de estado *número de veículos no sistema*. Mudanças suaves ocorrem devido ao desenvolvimento das atividades associadas aos componentes do sistema. Neste sentido, um evento é o instante de tempo no qual ocorre uma mudança significativa no estado do sistema, ou porque uma entidade entra e sai de um conjunto, ou porque alguma operação se inicia. Observamos que fica por conta do analista definir se um evento é ou não significativo no contexto dos objetivos da simulação.

As entidades se deslocam de um componente para outro por causa das operações em que estão envolvidas. Portanto, as operações e os procedimentos que são iniciados em cada evento são conhecidos como **atividades**. São as atividades que transformam o estado das entidades. Assim, a atividade “*transferência de veículo*” leva um veículo do estado “*esperando para atravessar um cruzamento*” para o estado “*escolhendo a próxima direção a ser tomada*”.

Algumas vezes é interessante agrupar uma seqüência de eventos em ordem cronológica em que aparecerão. Tal seqüência é denominada **processo** e é frequentemente utilizada para representar toda ou parte da vida das entidades temporárias. Por exemplo, um veículo entra na rede, escolhe a direção desejada, se desloca para uma faixa de circulação, etc.

1.1.2 A Construção do Modelo

O **modelo** é uma representação simplificada de um sistema. Durante a etapa de modelagem são feitas diversas hipóteses simplificadoras devido à impossibilidade de considerar todos os detalhes do sistema no modelo. A inclusão de um detalhe supérfluo pode causar um gasto computacional maior para

resolver o modelo, enquanto que a exclusão de um detalhe importante pode conduzir a uma solução não implementável. Somente o bom senso e a experiência junto com o processo de tentativa e erro podem orientar na decisão de fazer ou não uma determinada hipótese simplificadora no modelo.

A observação do modelo é feita ao longo do tempo com base em uma variável denominada **relógio** que indica o instante de tempo da simulação. Esta variável toma valores que formam uma seqüência finita não-decrescente. Há duas técnicas clássicas de incrementar o relógio: com incrementos constantes ou com incrementos variáveis.

Na simulação de modelos discretos periódicos, o relógio sofre incrementos constantes, e para cada um destes incrementos, são executadas todas as alterações que devem se realizar durante o intervalo delimitado pelo incremento.

Na simulação de modelos discretos aperiódicos, o relógio é incrementado para o instante de ocorrência do próximo evento, e a rotina correspondente é executada. Para auxiliar a determinação do próximo evento a ocorrer, é mantida uma lista de eventos programados, denominada **lista de eventos futuros**, que é ordenada pelo instante programado de ocorrência do evento. O controlador da simulação retira o primeiro evento da lista, atualiza o relógio para o instante de ocorrência do evento e executa a rotina do evento. Caso novos eventos sejam gerados durante a execução desta rotina, estes eventos são incluídos na lista de eventos futuros de acordo com o instante programado de ocorrência. Uma vez que a rotina tenha sido executada, o controlador repete este procedimento com o próximo evento da lista.

1.2 PRINCÍPIOS DE UMA SIMULAÇÃO

A simulação de um sistema complexo consiste em decompô-lo em um grande número de elementos e em descrever o comportamento de cada elemento, bem como suas interações, ao longo de todo o intervalo de tempo a ser estudado. Estes comportamentos e estas interações são reproduzidos um grande número de vezes com a finalidade de determinar o estado do sistema durante o intervalo de tempo especificado.

Para o bom emprego da simulação, o nível da exatidão e do detalhamento do modelo deve ser apropriado aos seus propósitos. Não há muitas vantagens no emprego de uma simulação extremamente detalhada se apenas estimativas básicas são requisitadas. Neste sentido, alguns aspectos devem ser considerados quando da escolha do tipo de modelo a ser adotado e estão relacionados com os seguintes tópicos:

- o escoamento do tempo (passo-a-passo ou por eventos);
- eventos com duração determinística ou estocástica;
- escala microscópica ou macroscópica.

O que segue abaixo não pretende ser uma descrição detalhada dos principais aspectos de uma simulação. Para maiores detalhes, ver [DEBAILLE, ARON, 1978], [ESTEVES, 1982], [PERIN FILHO, 1990], [PIDD, 1988], [WOHL, MARTIN, 1967].

1.2.1 A Simulação Passo-a-Passo e a Orientada a Eventos

O tempo é a variável que mede e controla o progresso de uma simulação e as mudanças de estado ocorridas no sistema simulado. Neste sentido, o fluxo do tempo pode ser focado segundo duas técnicas.

- a simulação passo-a-passo
- a simulação orientada a eventos

Na **simulação passo-a-passo** é encontrado o modo mais simples do tratamento do escoamento do tempo, onde a atualização e o exame do estado do sistema são realizados a intervalos regulares. Este enfoque é comumente denominado como “particionamento do tempo”.

Na **simulação orientada a eventos** a atualização ocorre somente quando há uma mudança do estado do sistema. No processo de construção do modelo são definidos os eventos de interesse, ou seja, aqueles que têm influência marcante no desempenho do sistema. Estes eventos, de número finito, dizem respeito a qualquer tipo de ocorrência que altere o valor de uma (ou mais) variável do modelo, correspondendo a uma mudança de estado do sistema. É interessante observar que neste tipo de atualização, realizada a cada execução de um evento, o incremento no tempo é variável.

A simulação passo-a-passo permite uma boa reprodução da evolução do sistema. Ela é indicada para os casos em que haja uma certa regularidade no acontecimento dos eventos. Embora a sua elaboração seja muito mais fácil que a da simulação orientada a eventos, a sua exploração por meio de um computador é muito mais cara, dado o grande número de cálculos e testes realizados desnecessariamente de um período para outro.

Desta forma, a simulação orientada a eventos apresenta duas vantagens sobre a simulação passo-a-passo. A primeira é que o incremento de tempo é automaticamente ajustado nos períodos de baixa e alta atividade, evitando, assim, testes desnecessários do sistema. A segunda é o bom acompanhamento das ocorrências dos eventos significativos do modelo. No entanto, maiores informações precisam ser armazenadas e manuseadas para o controle da simulação. Tais informações incluem a criação de estruturas e rotinas especiais no tratamento da programação dos eventos.

1.2.2 A Simulação Determinística e a Estocástica

As leis que regem o funcionamento de cada elemento constituinte da simulação, bem como as leis que regem as interações entre estes elementos, podem ser reproduzidas de modo **determinístico** ou **estocástico**.

Um **sistema determinístico** é aquele cujo comportamento é inteiramente previsível. Modelos baseados em tais sistemas assumem que todos os parâmetros utilizados pela simulação podem ser determinados com precisão, sem qualquer grau de incerteza ou aleatoriedade.

Um **sistema estocástico**, por sua vez, é aquele cujo comportamento não pode ser inteiramente previsível, embora alguma afirmação possa ser feita sobre como certos eventos ocorrem.

Em um sistema de tráfego urbano, vários são os elementos cujas variáveis relacionadas não têm valores determinados com exatidão. Como exemplo, podemos citar a velocidade de cada veículo em uma via e o instante da chegada de um passageiro em um ponto de ônibus da rede.

Em todo problema de simulação é necessário escolher os fenômenos que serão reproduzidos de maneira determinística e aqueles que serão tratados de modo estocástico. Esta seleção é realizada em função da natureza dos fenômenos, da precisão requerida e das medidas disponíveis.

1.2.3 A Simulação Microscópica e a Macroscópica

Com relação à escala dos modelos de tráfego urbano, existem, essencialmente, duas grandes categorias onde a fronteira entre elas não pode ser traçada com exatidão. Distinguem-se:

- a simulação microscópica
- a simulação macroscópica

Em escala **microscópica**, observa-se o comportamento de cada elemento do sistema de forma bastante minuciosa. O acompanhamento do tráfego é feito individualizando-se os veículos. As leis do comportamento e de interação (leis de perseguição) são utilizadas para simular a trajetória de cada veículo em função de seu ambiente (infra-estrutura da rede, regulação do fluxo, outros veículos). Estes modelos são os que representam o tráfego com maior precisão e são também os que demandam ser validados com maior cuidado. Eles são limitados pela quantidade de memória necessária para a sua operação. É por isso que a sua utilização se restringe à simulação de alguns poucos cruzamentos e períodos relativamente curtos. Estes modelos se prestam à avaliação de métodos de regulação, como, por exemplo, na análise de políticas de semaforização e de fluxos de veículos.

Em escala **macroscópica** o sistema é analisado como um todo, não havendo necessidade de um elevado nível de detalhamento, desde que a representatividade do sistema real não seja afetada. Os modelos macroscópicos não procuram individualizar os veículos que compõem o tráfego, mas os tratam

como um escoamento contínuo. As leis de comportamento derivam das leis da hidrodinâmica e das leis de propagação (ondas de choque). Estes modelos apresentam a vantagem da grande simplicidade e permitem o estudo de redes de grande porte (cidades, auto-estradas).

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas diversas áreas da Física ou da Economia, a complexidade dos fenômenos ou dos sistemas estudados sempre levou os pesquisadores a elaborar modelos que forneçam uma representação simplificada da realidade e que sejam destinados a uma melhor compreensão desta realidade. A construção de modelos com o objetivo de testar hipóteses de controle, de avaliar diferentes estratégias ou a influência de um ou outro parâmetro sobre o comportamento do sistema deu espaço à construção de modelos para a simulação em computadores, incorporando diversas interfaces que permitem a regulação de vários parâmetros, a introdução de diferentes políticas de gerenciamento e a interpretação dos resultados.

Na área de tráfego urbano, os primeiros modelos de simulação apareceram na década de 60, mas até hoje a grande maioria dos simuladores de tráfego é utilizada essencialmente por pesquisadores que trabalham na área de transportes. Por outro lado, o rápido aumento da capacidade operacional dos microcomputadores contribuiu para o aparecimento de simuladores mais simples e mais poderosos em máquinas mais rápidas, com interfaces mais amigáveis com os usuários.

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica que inclui os principais enfoques empregados na simulação de tráfego urbano. Não há pretensão de ser uma revisão exaustiva, mas simplesmente discutir sucintamente os simuladores mais conhecidos e citados na literatura específica.

Em 1974, Soares Filho propôs um modelo de simulação de tráfego urbano, *SITRA* (*Simulador de Tráfego*), do tipo sequencial, com revisões a cada segundo, onde as variáveis seguem leis de distribuição probabilísticas [SOARES FILHO, 1974]. O simulador é aplicável ao estudo de redes de estrutura geométrica qualquer, e pode efetuar comparações entre diferentes políticas de regulação do tráfego, além de testar algoritmos otimizadores da operação e coordenação de semáforos. O *SITRA* é um modelo desenvolvido em FORTRAN, baseado no deslocamento de veículos individualizados. Cada veículo é identificado em uma única categoria (automóvel), mas com características operacionais diferentes. Estas características estão associadas à rapidez ou à lentidão do veículo e são representadas por um coeficiente considerado como a unidade veículo-motorista. Este coeficiente é calculado a partir da distribuição normal padrão no momento da entrada do veículo na rede, e dele são determinados o intervalo de aceitação ao atravessar cruzamentos, a velocidade de percurso nas vias e o intervalo do escoamento da fila de veículos. O propósito de se calcular os atributos de cada veículo a partir de seu coeficiente é o de incorporar nestes dados os aspectos do comportamento do veículo. A comparação das políticas de controle do tráfego é feita através da combinação do atraso total dos veículos na rede e do número de paradas efetuadas.

O *INTRAS* (*Integrated Traffic Simulation*) foi desenvolvido pela Federal Highway Administration com o objetivo de testar algoritmos de detecção de acidentes em vias urbanas e comparar

diversas estratégias de controle de acesso [ABOURS et al, 1988]. É um modelo de simulação microscópico e de escoamento do tempo realizado a intervalos regulares. O tipo de veículo gerado é determinado aleatoriamente entre cinco possíveis. O comportamento do motorista é também escolhido aleatoriamente entre dez tipos previstos. Os veículos se deslocam segundo uma lei de perseguição que permite conservar uma distância segura entre dois veículos, evitando colisões em caso de frenagem ou de desaceleração do primeiro veículo. A principal tarefa do *INTRAS* é simular o tráfego em um corredor urbano, estudando as diversas políticas de regulação do tráfego no corredor, tanto em situações de circulação normal, quanto em situações de circulação prejudicada por um acidente.

O *SEVERE (Simulation Événementielle des Véhicules sur un Réseau)* é um simulador de enfoque microscópico do tráfego, onde cada veículo é individualizado [ABOURS et al, 1988]. O modelo é dinâmico e os dados de entrada podem variar em função do tempo. A maior característica do modelo *SEVERE* é o tratamento do fluxo do tempo segundo a técnica da simulação por eventos. São quatro as categorias principais de eventos:

- escolha da faixa de circulação;
- progressão da fila de veículos;
- entrada no cruzamento;
- saída do cruzamento/entrada em uma nova faixa.

O *SEVERE* pode servir à regulação da rede e ao cálculo do consumo de combustível, mas principalmente ao estudo da sensibilidade do modelo aos parâmetros de comportamento, à compreensão das causas de um ou outro atraso e à comparação com outros modelos de simulação.

Com o objetivo de definir um sistema de controle e regulação automática de uma linha de ônibus, Baptistella [BAPTISTELLA, 1976] realizou algumas sofisticações no modelo desenvolvido por Soares Filho e propôs um modelo simples que simula a rota completa da linha em questão. Os ônibus têm um comportamento idêntico ao dos veículos, a menos das paradas que fazem nos pontos e nos terminais, quando é levada em consideração a influência dos usuários da linha, devido às operações de embarque e desembarque de passageiros. Além da influência dos usuários, os ônibus podem ser “detidos” nos pontos ou nos terminais, a fim de que obedecem aos horários de partida ou tenham seus comportamentos regulados. A rede simulada considera basicamente as vias e os cruzamentos que fazem parte do trajeto dos ônibus. Cada ônibus é representado individualmente com características operacionais próprias, mas como as de um veículo mais lento que o padrão. O número de passageiros que descem em cada ponto é obtido a partir de uma matriz origem-destino estacionária no intervalo de tempo considerado. Esta matriz contém as porcentagens de passageiros que, tendo subido em um dado ponto, descerão nos pontos seguintes. Com o propósito de medir o grau de qualidade do serviço oferecido, o modelo avalia os seguintes dados: o tempo de espera dos passageiros nos pontos, o tempo de percurso dos passageiros nos ônibus, que está ligado às condições de tráfego encontradas e aos tempos perdidos nos pontos, e a taxa de carregamento dos ônibus, que mede o grau da regulação do serviço. Este modelo foi desenvolvido em FORTRAN.

O *SIMILIBUS* (*Simulation Interactive d'une Ligne de Bus*) é do tipo por eventos: os eventos que simulam a demanda (chegadas dos usuários aos pontos, gestão das filas de espera) e os eventos que estão ligados à oferta (desembarques e embarques de passageiros, procedimentos de regulação e progressão dos veículos) [ABOURS et al, 1988]. O *SIMILIBUS* é um dispositivo de aplicação de primeira importância no domínio da regulação das linhas de ônibus, entendido como o conjunto de rotinas que permite restabelecer um funcionamento aceitável (próximo do funcionamento teórico ou, pelo menos, que assegure um nível de serviço mínimo) de menor custo, e também nas situações onde há perturbações. O modelo pode, de maneira autônoma, tomar um certo número de comandos de regulação e retroagir na marcha dos veículos, tirando do operador as tarefas repetitivas e sistemáticas da regulação do tráfego.

O *NETSIM* (*Network Simulation*) é um modelo de simulação estocástico e microscópico da operação do tráfego em redes viárias urbanas. A versão inicial do *NETSIM* foi lançada em 1971 pela Federal Highway Administration (EUA), e atualizações subsequentes ocorreram em 1973 e 1978. O modelo foi depois integrado no simulador *TRAF* (*Integrated Traffic Simulation Models*) no início dos anos 80 e desde então a versão atual do programa é denominada *TRAF-NETSIM*. Algumas inovações foram implementadas ao simulador, das quais se destacam os semáforos de controle atuado, as conversões dos veículos que passam a ser condicionadas pelas direções tomadas anteriormente, a lógica da transição semafórica de um plano para o outro e as correntes de veículos idênticas [RATHI, SANTIAGO, 1990-A], [RATHI, SANTIAGO, 1990-B], [WONG, 1990] e [RATHI, 1992]. O *TRAF-NETSIM* é um programa desenvolvido em FORTRAN, segundo um modelo de simulação a eventos discretos da dinâmica da operação do tráfego. Os veículos são representados individualmente e o desempenho de cada um é determinado a cada segundo. Além disso, ele é identificado em uma categoria (automóvel, *carpool*, ônibus ou caminhão), um tipo (16, no máximo, com características diferentes) em cada categoria, e o seu motorista é identificado pelo seu comportamento (passivo, normal ou agressivo). As características do veículo e do motorista são determinadas estocasticamente, assim como seus outros atributos (conversões, velocidade, intervalo de escoamento da fila e intervalo de aceitação). Os veículos são injetados pelas entradas da rede e cada um se desloca segundo a lógica de perseguição de veículos, obedecendo aos instrumentos de controle do tráfego, pedestres, ônibus e outras condições que influenciam o comportamento do motorista. Os semáforos podem ser de três tipos: o de tempo fixo, o de várias programações ao longo do dia ou o atuado. O *TRAF-NETSIM* ainda simula as operações de ônibus, com no máximo 25 linhas e 99 pontos de parada em uma rede. Para cada linha é atribuído o *headway* médio e para cada ponto é fornecido o número da linha, a quantidade máxima de ônibus que podem ser atendidos ao mesmo tempo e o tipo de ponto (no máximo 6, com diferentes tempos para a operação de embarque e desembarque de passageiros). A saída de dados do modelo inclui uma variedade de medidas de desempenho (velocidade, volume, densidade, atraso, filas), e ainda há a estimativa do consumo de combustível e da emissão em cada via da rede, em grupos de vias ou na rede inteira em intervalos pré-determinados.

Nos últimos anos, o conceito de se adotar medidas que dêem prioridade de circulação aos veículos mais “eficientes” no espaço viário urbano vem sendo cada vez mais utilizado [BLY, 1973]. Na medida que um ônibus contribui três vezes mais ao congestionamento do tráfego que um veículo padrão enquanto que o seu volume de passageiros é vinte ou trinta vezes maior, parece ser razoável minimizar os atrasos sofridos pelos ônibus. Isto pode ser feito de muitas maneiras, e uma atenção especial pode ser dada às faixas de prioridade à circulação dos ônibus. Estes tipos de faixas asseguram que um ônibus se desloque

livre do congestionamento dos outros veículos. Entretanto, tal ganho não pode ser obtido sem que se afete o resto do tráfego, pois reservando espaço viário exclusivamente para os ônibus resta um espaço menor para o tráfego geral, podendo causar um maior atraso para os veículos não-prioritários. Simuladores que modelam o comportamento do tráfego em uma via são utilizados para determinar o benefício geral da implementação de uma faixa de ônibus. Bly descreve os principais detalhes de uma simulação computadorizada em uma faixa de ônibus [BLY, 1973]. Iunes e Willumsen descrevem o modelo *BLISS (Bus Lane Interactive Simulation System)* [IUNES, WILLUMSEN, 1988], que auxilia o planejamento de faixas para a circulação de ônibus. Iunes e Willumsen fornecem, ainda, uma breve apresentação dos modelos de simulação já existentes que realizam tal tarefa, onde destacam-se o *CONTRAM*, o *TRAFFICQ*, o *SATURN*, os modelos do TRRL (Transport and Road Research Laboratory) e o *BLAMP*.

O modelo apresentado por Lourenço visa avaliar, sob o aspecto do tempo gasto nos deslocamentos feitos pelos usuários de um sistema de transportes urbanos, a validade da implantação de vias ou faixas exclusivas para ônibus em uma via arterial urbana de tráfego misto [LOURENÇO, 1982]. O enfoque do assunto considerou um horizonte de projeto visando a comparação do tempo total gasto tanto pelos usuários do transporte coletivo quanto do transporte individual em um sistema de uma arterial urbana. Ao longo do horizonte do projeto são comparados os tempos na situação atual de operação da via (tráfego misto) e em uma situação hipotética, onde a operação dos ônibus seria realizada em espaço reservado. O modelo utiliza técnicas de simulação por computador, tendo sido empregado o modelo *SUB (Simulation of Urban Bus Operations on Signalized Arterials)*, elaborado pela Federal Highway Administration para a simulação do transporte coletivo por ônibus. Na simulação do tráfego em geral, o modelo emprega as expressões derivadas por Webster para o cálculo dos atrasos nos semáforos. Lourenço apresenta ainda alguns modelos de simulação das operações de ônibus urbanos desenvolvidos por diversas instituições. Destacam-se, entre eles, os modelos do TRRL, da Universidade de Leeds, da Universidade de Bradford, da IBM e os modelos *SUB* e *SUBLANE* (uma versão do *SUB* com a finalidade de simular a operação de faixas exclusivas de ônibus de alta densidade).

O *SUB* é um modelo de simulação que permite a análise simultânea do desempenho de um conjunto de linhas de ônibus que operam em uma via arterial urbana. O sistema é analisado somente em uma ou duas faixas de cada via em um único sentido do tráfego, com base na suposição de que a elas fica confinada a operação dos ônibus. O tráfego geral é representado macroscopicamente. A simulação é revisada a intervalos discretos de tempo entre 5 e 15 segundos, sendo que os veículos são representados em bloco. A simulação dos movimentos dos ônibus é, no entanto, feita microscopicamente, por um processo de investigação de eventos.

O modelo proposto por ESTEVES tem como objetivo fornecer um instrumento de avaliação prévia do desempenho operacional de estratégias de prioridade para ônibus em áreas urbanas, através de um modelo de simulação da operação de ônibus em faixas exclusivas, no fluxo ou em contra-fluxo, em vias arteriais [ESTEVES, 1982]. O modelo possui uma estrutura macroscópica, na qual a evolução do sistema é inspecionada por eventos. Tais eventos correspondem à chegada de um ônibus a um ponto ou a um semáforo, ou ainda quando ele entra ou sai de uma faixa exclusiva. O programa foi desenvolvido em FORTRAN.

O *TRANSYT (Traffic Network Study Tool)* é um programa de coordenação semafórica que utiliza dados pré-determinados para modelar o movimento do tráfego na área controlada. Níveis de fluxo médio e de conversões são medidos e considerados representativos na análise da implementação dos ajustes ótimos [PIERCE, WOOD, 1977], [VINCENT et al, 1980]. O *TRANSYT* é o programa que tem obtido mais sucesso no cálculo dos tempos semafóricos que minimizam o atraso do tráfego devido às condições do fluxo nos horários de pico e fora do pico. Os ajustes semafóricos são determinados por uma função otimizadora até que a “melhor” política é encontrada. O critério utilizado para a otimização é a minimização do atraso e das paradas sofridos pelos veículos na rede.

O *BUS TRANSYT* é um programa originado do *TRANSYT* que tem como principal objetivo calcular os tempos semafóricos que dêem prioridade à operação dos ônibus em uma rede composta por semáforos de tempo fixo [PIERCE, WOOD, 1977]. O modelo aplica uma maior ponderação aos atrasos sofridos pelos ônibus para minimizar o atraso total dos passageiros quando os tempos são otimizados. Os ônibus são modelados separadamente do resto do tráfego. Eles seguem rotas fixas, com velocidades próprias, parando nos pontos de ônibus para o embarque e o desembarque de passageiros. A escolha dos parâmetros adequados à otimização dos tempos semafóricos mostrou que o *BUS TRANSYT* apresenta melhores benefícios que o modelo *TRANSYT* quando os tempos de viagem dos passageiros são levados em consideração.

1.4 A ESCOLHA DO TIPO DE MODELO

A escolha do tipo de modelo a ser desenvolvido deve ser realizada em função do objetivo a que se destina. O objetivo principal desta tese é explorar o potencial das técnicas de simulação de sistemas a eventos discretos na construção de um modelo que possibilite simular os fenômenos de tráfego urbano com a precisão necessária, avaliando as diferentes políticas de regulação do tráfego e as operações das linhas de ônibus de transporte coletivo em uma rede viária urbana.

O modelo adotado é o microscópico com individualização de veículos e usuários do transporte coletivo. Características do comportamento do tráfego (velocidades dos veículos nas vias, instantes da chegada de passageiros aos pontos, injeção de veículos nas entradas, por exemplo) são tratadas como ocorrências de natureza estocástica que seguem distribuições probabilísticas conhecidas, e são detalhadas no Capítulo 3. As técnicas de tratamento do escoamento do tempo, passo-a-passo e a orientada a eventos, são cuidadosamente elaboradas e avaliadas sob os mesmos cenários. Maiores informações são dadas nos Capítulos 4, 5 e 6.

No próximo capítulo serão apresentados os elementos do SIMTRAF-OPERBUS, suas principais características, seus comportamentos, bem como suas interações.

Capítulo 2

A REPRESENTAÇÃO DAS ENTIDADES DO MODELO

As entidades do modelo SIMTRAF-OPERBUS são classificadas em: permanentes (cruzamentos, vias, faixas, semáforos, linhas de ônibus, tipos de ônibus e pontos de parada para embarque e desembarque de passageiros), e as temporárias, que representam fluxos (veículos e usuários do transporte coletivo).

Estes enfoques têm o propósito de representar as entidades físicas da rede como entidades permanentes do sistema, e representar os veículos e os usuários como entidades temporárias, pois estes últimos não permanecerão na rede durante todo o período de simulação. Desta forma, as entidades permanentes são representadas computacionalmente por vetores e os veículos e os usuários são representados por apontadores através da alocação dinâmica de memória do computador.

Para o melhor uso de apontadores utilizamos o conceito de listas-lixo de entidades. Estas listas têm como objetivo principal economizar o uso dos comandos *malloc(.)* e *free(.)* da linguagem C, quando criamos e removemos apontadores, respectivamente.

Assim, quando um novo veículo (usuário) entra na rede, verificamos se a lista-lixo de veículos (lista-lixo de usuários) está vazia. Se a lista não possuir elementos, alocamos memória do computador; caso contrário, o último elemento da lista é retirado.

No momento em que um veículo (usuário) sair da rede, ele será armazenado na lista-lixo, sendo colocado na última posição. Ao final da simulação, as listas-lixo de veículos e de usuários serão limpas, liberando a memória alocada do computador.

2.1 OS USUÁRIOS DO TRANSPORTE COLETIVO

Os usuários do transporte coletivo são entidades temporárias que representam o fluxo de passageiros no sistema. Um usuário entra na rede quando a sua chegada a um ponto de ônibus é efetuada, onde ele se posicionará ao final da fila de espera. No instante em que o usuário embarca em um ônibus, atualizamos os valores das variáveis que medem o desempenho das linhas de ônibus simuladas e excluímos a representação do usuário no sistema.

A caracterização de cada usuário é realizada através dos seguintes atributos:

- *número do usuário*: no instante de sua entrada na rede, um número, que o acompanhará até a sua saída do sistema, lhe é atribuído.
- *instante de chegada ao ponto*
- *instante de seu embarque em um ônibus*

2.2 OS VEÍCULOS

Os veículos são outras entidades temporárias que representam o fluxo no sistema. Na rede simulada, cada veículo estará sujeito às interações com os demais veículos, obedecendo as políticas de operação vigentes no tráfego. A sua caracterização é realizada através dos seguintes atributos principais:

- *número do veículo*: no instante em que um veículo entra na rede, um número, que o acompanhará até a sua saída do sistema, lhe é atribuído.
- *semente*: cada veículo possui uma semente para a geração de variáveis aleatórias, que é utilizada no processo da escolha da direção ao final de uma via, por exemplo.
- *coeficiente*: o coeficiente de um veículo indica uma relação veículo-motorista, que mostra o quanto “arrojado” é o par. Representa tanto as características físicas do veículo (torque, potência) como as do motorista (atenção, reflexos). Desta forma, veículos mais “arrojados” terão, por exemplo, maiores velocidades de percurso e menores intervalos de aceitação. Para representar os diferentes comportamentos dos motoristas, utilizamos as técnicas de geração de variáveis aleatórias. Como a distribuição de vários atributos dos veículos (velocidade de percurso, intervalo de aceitação e o intervalo entre o escoamento de dois veículos consecutivos) apresenta-se como uma distribuição normal, geramos este coeficiente a partir de uma distribuição normal padrão, com média zero e desvio padrão um. Portanto, veículos com coeficiente maior que zero serão os mais “arrojados”, e aqueles com coeficiente menor que zero serão os menos “arrojados”.
- *tipo de veículo*: no SIMTRAF-OPERBUS estamos considerando três tipos de veículos: veículos leves, com 4 metros de comprimento; veículos pesados, com 9 metros de comprimento; e ônibus de transporte coletivo, onde o comprimento é função do tipo de ônibus utilizado por cada linha.
- *direção a ser tomada ao final de uma via*: são três as direções possíveis de serem tomadas: à esquerda, em frente e à direita.
- *intervalo de aceitação*: é o intervalo de tempo necessário para que o veículo possa atravessar um cruzamento em segurança.
- *instante desejado de chegada ao final de uma via*

No entanto, se um determinado veículo for um ônibus, maiores informações são requeridas, tais como:

- *número da linha a qual pertence*

- *número de passageiros em seu interior*

Além disso, para melhor avaliar o comportamento do sistema de transporte coletivo na rede, o modelo faz a distinção dos vários tipos de veículos utilizados pelas linhas de ônibus. Em cada tipo de ônibus da rede, o simulador exige as seguintes informações:

- *comprimento do veículo*
- *número máximo de passageiros*
- *quantidade de portas de serviço*
- *os tempos de embarque e desembarque médios por passageiro*

Embora uma determinada linha possa ter uma frota diversificada, consideramos que ela somente irá utilizar um tipo de veículo durante todo o período de simulação.

2.3 OS CRUZAMENTOS

Todos os cruzamentos da rede simulada deverão possuir, no máximo, quatro aproximações e quatro saídas, como ilustrada pela Figura 2.1:

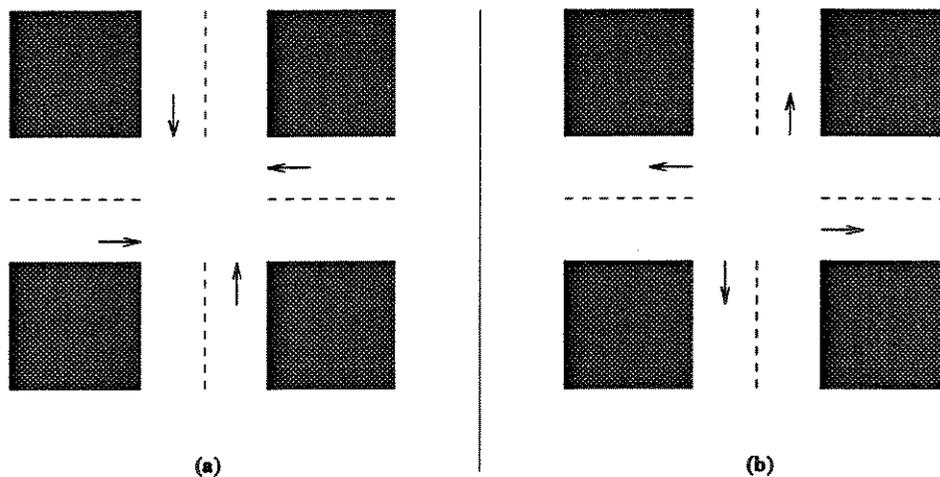


Figura 2.1: (a) cruzamento com quatro aproximações;
(b) cruzamento com quatro saídas

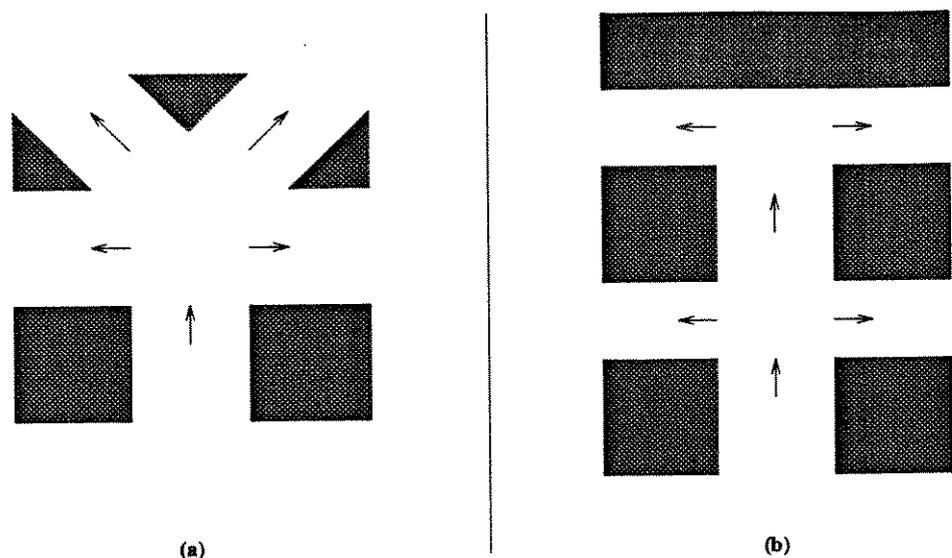


Figura 2.2: (a) cruzamento com uma aproximação e quatro saídas;
 (b) a sua representação equivalente no modelo

Os cruzamentos que apresentarem configuração diferente da Figura 2.1 serão transformados, sendo denominados cruzamentos especiais. Assim, o cruzamento dado pela Figura 2.2a é transformado para a configuração dada pela Figura 2.2b.

Cada cruzamento da rede pode ser semaforizado ou não. Caso não haja a presença de semáforos no cruzamento, podemos adotar políticas de prioridades do fluxo de veículos (cruzamentos com preferenciais ou sem-prioridades).

2.3.1 A Representação Semafórica de um Cruzamento

Consideremos o seguinte cruzamento semaforizado dado pela Figura 2.3. É um cruzamento padrão, com quatro aproximações e quatro saídas, onde não são permitidas conversões para a esquerda.

Distinguímos para este cruzamento duas fases, que são ilustradas pela Figura 2.4.

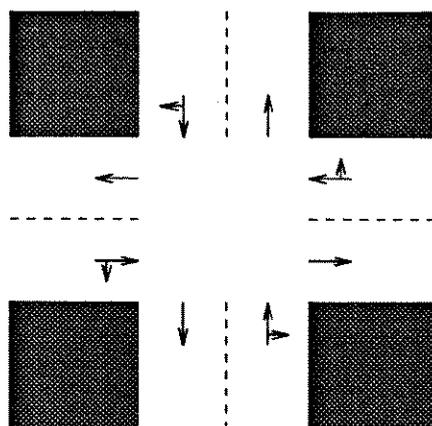


Figura 2.3: cruzamento semaforizado com quatro aproximações e quatro saídas

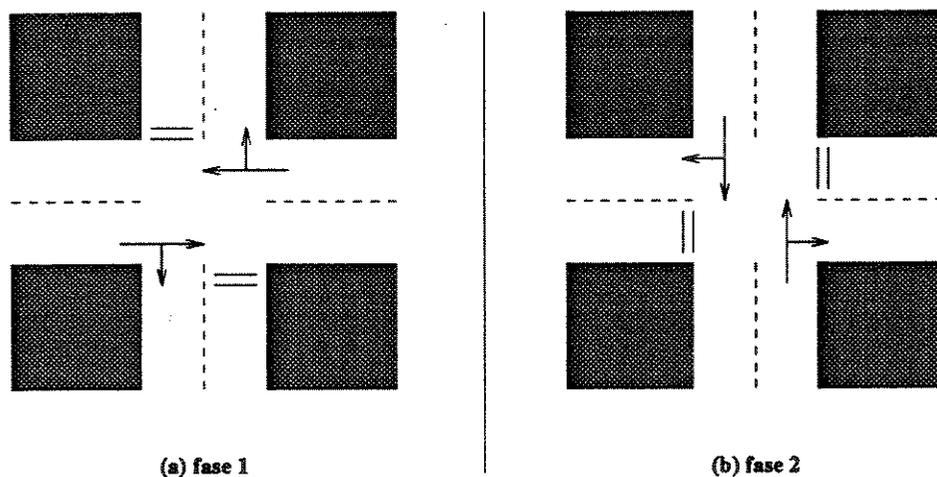


Figura 2.4: as duas fases do cruzamento

Na montagem da política de controle das fases do cruzamento, fazemos o uso de um gráfico (Gráfico 2.1), onde a parte mais destacada corresponde ao estado vermelho, e a parte sem tanto destaque ao estado verde.

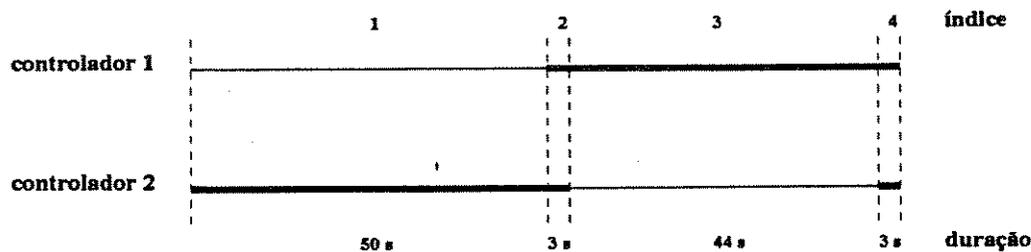


Gráfico 2.1: uma possível política de controle das fases do cruzamento

Desta forma, pelo gráfico acima, observamos que o controlador 1 corresponde à fase 1 e o controlador 2, à fase 2. Assim:

- temos 50 segundos de verde para a fase 1, e 44 segundos de verde para a fase 2;
- o período total de entre-verdes é de 6 segundos;
- o tempo de ciclo é de 100 segundos.

Pelo gráfico, distinguimos, ainda, uma seqüência de quatro combinações entre o controlador 1 e o controlador 2, que é dada pela Tabela 2.1, onde estão representados o índice de cada mudança de estado, os controladores que mudam de estado e a duração de cada mudança.

Para acompanhar a mudança dos estados das fases do cruzamento, é necessário um marcador da tabela de seqüências que é atualizado cada vez que ocorre uma mudança de estado de alguma de suas fases.

ÍNDICE DA TABELA	CONTROLADORES ATUANTES	DURAÇÃO (s)
1	1	50
2	1	3
3	2	44
4	2	3

Tabela 2.1: tabela de seqüências do cruzamento de 2 fases

Assumindo, então, que estamos a 66 segundos do início do Gráfico 2.1, temos que:

- o estado do controlador 1 é o vermelho, e o do controlador 2 é o verde;
- a posição do marcador da tabela de seqüências é a do índice 3.

O instante da próxima modificação de estado de uma fase do cruzamento é dado por:

$$hpmf = \sum_{i=1}^{mrc} dur_i - defasagem = 50 + 3 + 44 - 66 = 31 \quad (1)$$

- onde:
- *hpmf*: instante da próxima modificação de estado de alguma fase do cruzamento
 - *mrc*: marcador da tabela de seqüências
 - *dur_i*: duração da mudança de índice *i*
 - *defasagem*: defasagem inicial

Portanto, no instante 31 segundos ocorrerá uma mudança do estado de alguma fase do cruzamento. O marcador da tabela de seqüências será atualizado para o índice 4, o estado do controlador 2 passará para o vermelho, e a duração deste novo estado será de 3 segundos. Finalmente, o próximo instante de modificação de estado de uma fase será dado por:

$$hpmf = humf + dur_4 = 31 + 3 = 34 \quad (2)$$

- onde:
- *humf*: instante da última modificação de estado de fase do cruzamento

Para o caso de um cruzamento semaforizado de 3 fases (Figura 2.5), temos as seguintes fases (Figura 2.6):

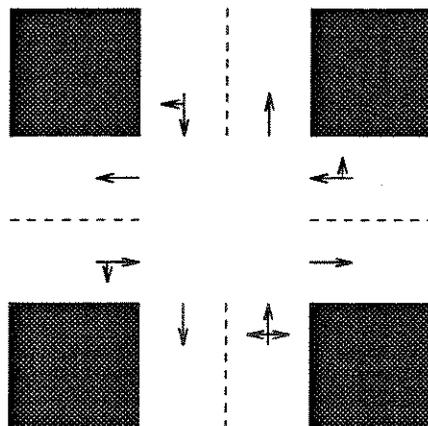


Figura 2.5: cruzamento semaforizado com quatro aproximações e quatro saídas

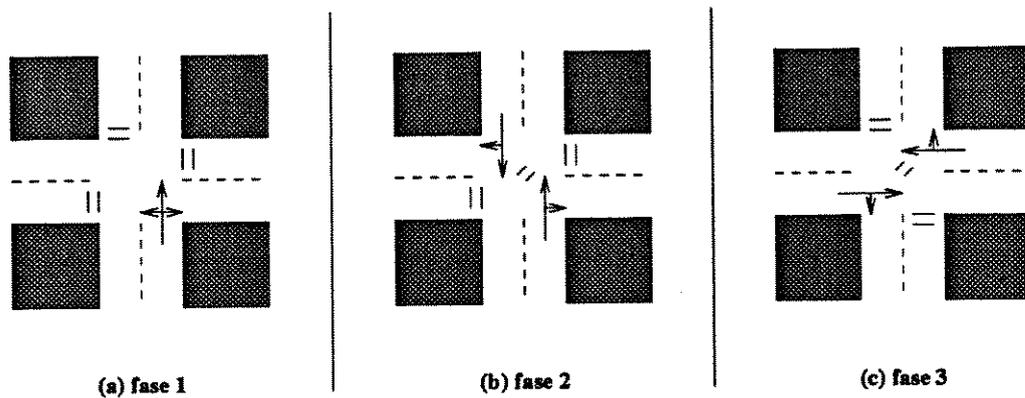


Figura 2.6: as três fases do cruzamento

Neste caso, a montagem da política de controle das fases do cruzamento necessita de quatro controladores de fase, dada pelo Gráfico 2.2, e a respectiva tabela de fases é dada pela Tabela 2.2, onde:

- a fase 1 é regida pelos controladores 1 e 2;
- a fase 2 é regida pelos controladores 2 e 3;
- a fase 3 é regida pelo controlador 4.

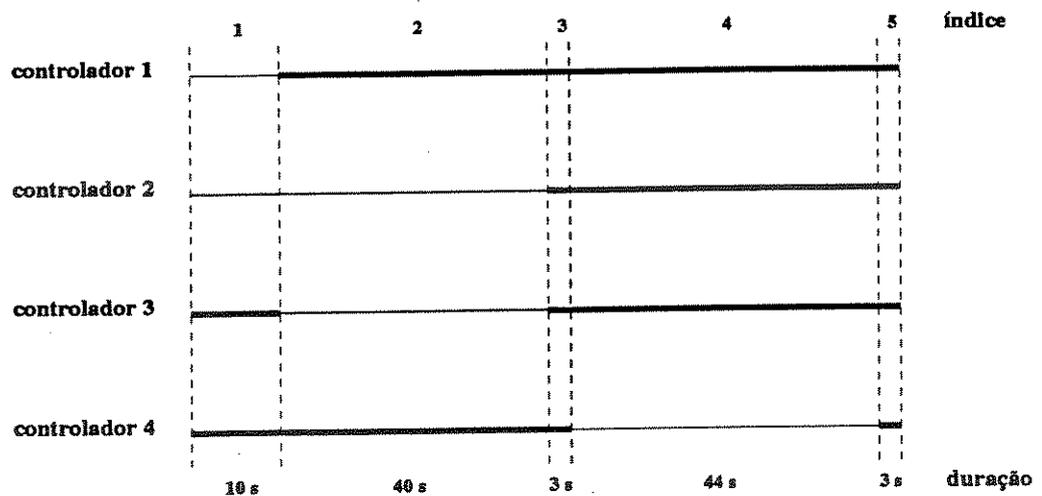


Gráfico 2.2: uma possível política de controle das fases do cruzamento

ÍNDICE DA TABELA	CONTROLADORES ATUANTES	DURAÇÃO (s)
1	1, 2	10
2	1, 3	40
3	2, 3	3
4	4	44
5	4	3

Tabela 2.2: tabela de seqüências do cruzamento de três fases

Assumindo que estamos a 66 segundos do início do Gráfico 2.2, temos que:

- o estado dos controladores 1, 2 e 3 é o vermelho;
- o estado do controlador 4 é o verde;
- a posição do marcador da tabela de seqüências é a do índice 4;
- a próxima modificação de estado de alguma fase do cruzamento se efetuará no instante 31 segundos.

Observação:

Para os cruzamentos que não possuem semaforização, a tabela de seqüências possuirá dois índices, cujas durações tenderão para o infinito, ou seja:

ÍNDICE DA TABELA	CONTROLADORES ATUANTES	DURAÇÃO (s)
1	1	$+\infty$
2	2	$+\infty$

Tabela 2.3: tabela de seqüências de um cruzamento não-semaforizado

É importante observar que os dois controladores deverão estar inicializados com o estado verde. Assim, qualquer que seja o período de simulação em estudo, o estado dos controladores nunca mudará para o vermelho.

2.4 AS VIAS

Uma via da rede pode ser classificada em três categorias: entrada, saída ou uma via que liga dois cruzamentos.

2.4.1 As Entradas da Rede

As entradas da rede são as vias onde os veículos são gerados. Neste contexto, cada entrada possui duas tabelas distintas para a injeção de veículos na rede: uma que apresenta os percentuais de geração de veículos leves e pesados, e a outra que indica quais são as linhas de ônibus que se originam por tal entrada. Supondo que a composição dos veículos que se originam em uma dada entrada seja de 70% de veículos leves e 30% de pesados, a tabela de geração de veículos leves e pesados é dada por:

VEÍCULOS LEVES	VEÍCULOS PESADOS
70%	30%

Tabela 2.4: (a) tabela exemplo de geração de veículos leves e pesados

Supondo ainda que as linhas de ônibus 2, 5, 9 e 10 se originam pela mesma entrada, a tabela das linhas de ônibus é ilustrada a seguir:

ÍNDICE DA TABELA	LINHAS
1	2
2	5
3	9
4	10

Tabela 2.4: (b) tabela exemplo das linhas de ônibus que se originam por uma entrada

Neste trabalho supomos que a geração dos veículos leves e pesados é um processo poissoniano com média horária conhecida. Assim, esta média horária constitui-se em um outro atributo importante de cada entrada da rede. A geração dos ônibus, por sua vez, depende do *headway* adotado por cada linha.

Cada entrada possui, também, uma semente para a geração de variáveis aleatórias. Esta semente serve aos seguintes propósitos:

- cálculo do próximo instante da geração de um veículo leve ou pesado;
- escolha do tipo de veículo gerado (leve ou pesado);
- inicialização da semente do veículo (leve ou pesado).

2.4.2 As Saídas da Rede

As saídas da rede são as vias a partir das quais os veículos deixam de ser analisados pelo sistema. O modelo assume que não há fatores que possam bloquear as saídas da rede.

2.4.3 As Vias que Ligam Dois Cruzamentos

Os atributos principais das vias são:

- *tipo de via*: uma via pode ser classificada em três categorias quando relacionada ao cruzamento onde desemboca. Uma via pode ser do tipo preferencial, não-preferencial ou sem-prioridades. Então:
 - vias que chegam a um cruzamento semaforizado: estas são do tipo preferencial, onde a preferência do movimento é atribuída dinamicamente quando da mudança do estado para o verde de cada fase;
 - vias que chegam a um cruzamento não-semaforizado na direção preferencial: estas vias serão sempre preferenciais ao movimento;
 - vias que chegam a um cruzamento não-semaforizado na direção não-preferencial: neste caso, os veículos são obrigados a parar para verificar a existência de conflitos que poderão acarretar prejuízos ao seu movimento;
 - vias que chegam a um cruzamento sem qualquer prioridade: tais cruzamentos não são semaforizados, e nem possuem priorização de vias. Assim, todas as aproximações do cruzamento serão do tipo sem-prioridades.
- *tipo de faixas*: o modelo permite representar quatro faixas, no máximo, em cada via. Os tipos de faixas que compõem uma via são ilustrados pelas Tabelas 2.5 a 2.8.

código	tipos de faixas
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	

Tabela 2.5: tipos de faixas em vias com faixa única

código	tipos de faixas	código	tipos de faixas
7		16	
8		17	
9		18	
10		19	
11		20	
12		21	
13		22	
14		23	
15			

Tabela 2.6: tipos de faixas em vias com duas faixas

código	tipos de faixas	código	tipos de faixas
24	↑ ↑ ↑	40	↖ ↑ ↑
25	↑ ↑ ↗	41	↖ ↖ ↗
26	↑ ↑ ↘	42	↖ ↖ ↘
27	↑ ↗ ↘	43	↖ ↗ ↘
28	↑ ↘ ↖	44	↖ ↘ ↖
29	↖ ↑ ↑	45	↖ ↖ ↗
30	↖ ↑ ↗	46	↖ ↗ ↘
31	↖ ↑ ↘	47	↖ ↖ ↖
32	↖ ↗ ↑	48	↖ ↖ ↗
33	↖ ↗ ↘	49	↖ ↖ ↘
34	↖ ↘ ↖	50	↖ ↖ ↗
35	↖ ↘ ↘	51	↖ ↖ ↗
36	↖ ↘ ↘	52	↖ ↖ ↗
37	↖ ↘ ↘	53	↖ ↖ ↗
38	↖ ↘ ↘	54	↖ ↖ ↗
39	↖ ↘ ↘		

Tabela 2.7: tipos de faixas em vias com três faixas

código	tipos de faixas	código	tipos de faixas	código	tipos de faixas
55	↑ ↑ ↑ ↑	72	↖ ↗ ↘ ↙	89	↖ ↗ ↘ ↙
56	↑ ↑ ↑ ↗	73	↖ ↗ ↘ ↗	90	↖ ↗ ↘ ↗
57	↑ ↑ ↑ ↘	74	↖ ↗ ↘ ↘	91	↖ ↗ ↘ ↘
58	↑ ↑ ↗ ↗	75	↖ ↗ ↘ ↗	92	↖ ↗ ↘ ↗
59	↑ ↑ ↗ ↘	76	↖ ↗ ↘ ↘	93	↖ ↗ ↘ ↘
60	↑ ↗ ↗ ↗	77	↖ ↗ ↘ ↗	94	↖ ↗ ↘ ↗
61	↑ ↗ ↗ ↘	78	↖ ↗ ↘ ↘	95	↖ ↗ ↘ ↘
62	↖ ↗ ↗ ↗	79	↖ ↗ ↘ ↘	96	↖ ↗ ↘ ↘
63	↖ ↗ ↗ ↘	80	↖ ↗ ↘ ↗	97	↖ ↗ ↘ ↘
64	↖ ↗ ↗ ↗	81	↖ ↗ ↘ ↘	98	↖ ↗ ↘ ↘
65	↖ ↗ ↗ ↘	82	↖ ↗ ↘ ↗	99	↖ ↗ ↘ ↘
66	↖ ↗ ↗ ↗	83	↖ ↗ ↘ ↘	100	↖ ↗ ↘ ↘
67	↖ ↗ ↗ ↘	84	↖ ↗ ↘ ↗	101	↖ ↗ ↘ ↘
68	↖ ↗ ↗ ↗	85	↖ ↗ ↘ ↘	102	↖ ↗ ↘ ↘
69	↖ ↗ ↗ ↘	86	↖ ↗ ↘ ↗	103	↖ ↗ ↘ ↘
70	↖ ↗ ↗ ↗	87	↖ ↗ ↘ ↘		
71	↖ ↗ ↗ ↘	88	↖ ↗ ↘ ↗		

Tabela 2.8: tipos de faixas em vias com quatro faixas

- *comprimento e largura*
- *penalização-extra sobre a escolha de faixas*
- *tabela de velocidades, dos intervalos de escoamento das filas de veículos e das taxas percentuais de conversões*
- *tabela dos pontos de ônibus: tabela dos índices dos pontos de cada via, onde cada ponto pode servir a diferentes linhas de ônibus. Supondo então que uma dada via apresente três pontos de ônibus (Figura 2.7), esta tabela é ilustrada pela Tabela 2.9.*

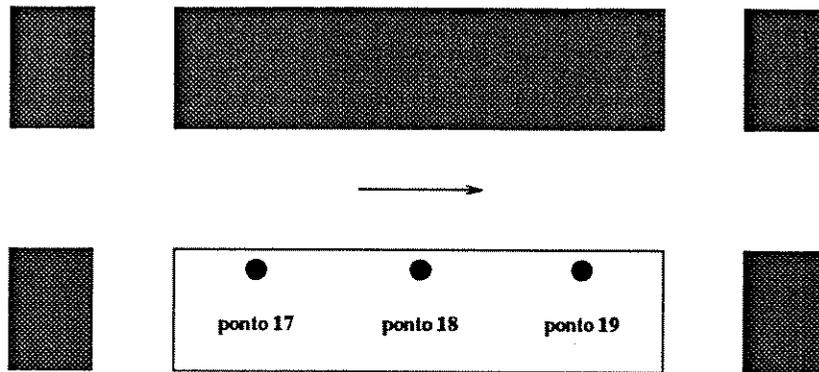


Figura 2.7: uma via exemplo com três pontos de ônibus (pontos 17, 18 e 19)

ÍNDICE DA TABELA	PONTOS
1	17
2	18
3	19

Tabela 2.9: tabela dos índices dos pontos da via exemplo

Observação:

Todas as informações (atributos) dadas acima às vias que ligam dois cruzamentos são aplicáveis também às entradas da rede.

2.5 AS FAIXAS

A caracterização de cada faixa da rede é realizada através dos seguintes atributos:

- *número da via à qual pertence*
- *número do controlador de fase ao qual está associada:* como admitimos a possibilidade de cada cruzamento possuir mais que duas fases, cada faixa de cada aproximação deve corresponder a um controlador de fase específico. Assim, no cruzamento de três fases da Figura 2.8, temos que a tabela das vias e das faixas do cruzamento é dada pela Tabela 2.10.

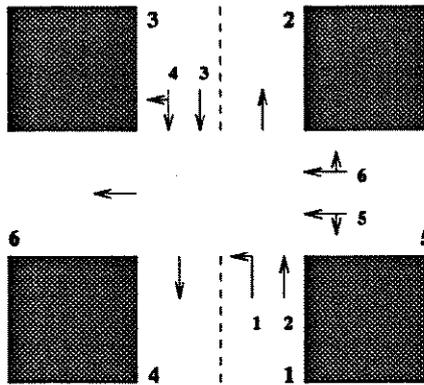


Figura 2.8: cruzamento de três fases, com três aproximações e três saídas

APROXIMAÇÃO	TIPO DE FAIXAS	FAIXAS
1	10	1, 2
3	9	3, 4
5	20	5, 6

Tabela 2.10: tabela das vias do cruzamento

As fases do cruzamento são ilustradas pela Figura 2.9:

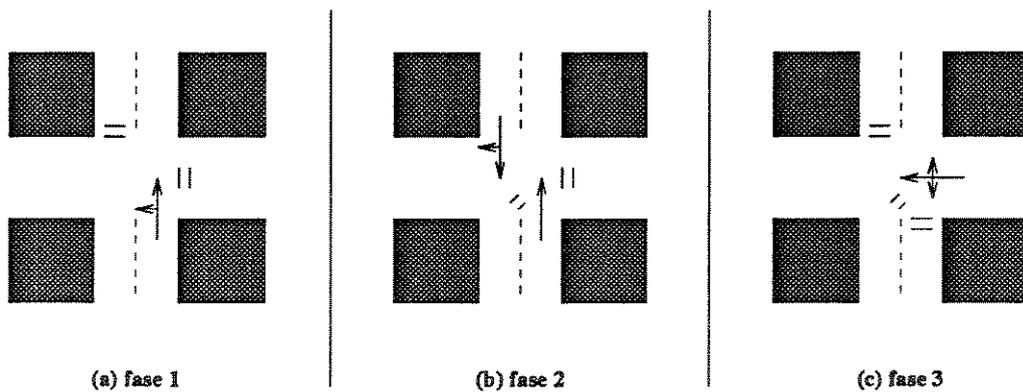


Figura 2.9: as três fases do cruzamento

Neste caso, temos que a fase 1 corresponde à liberação do fluxo de veículos das faixas 1 e 2; a fase 2 corresponde à liberação das faixas 2, 3 e 4; e a fase 3, à liberação das faixas 5 e 6. Assim:

FAIXAS	CONTROLADOR DE FASE
1	1
2	2
3	3
4	3
5	4
6	4

Tabela 2.12: tabela dos controladores do cruzamento

- *tipo de movimento permitido na faixa*: a ocupação do espaço viário vem sendo motivo de preocupação por parte dos planejadores de sistemas de tráfego nos últimos anos. Tem-se conseguido uma otimização do fluxo do sistema de tráfego através de medidas de prioridade para ônibus, ora restringindo a presença de carros de passeio em áreas saturadas, ora segregando os ônibus em espaços exclusivos, evitando, assim, conflitos com os demais veículos. Dentre os diversos tipos de facilidade para os veículos com altas taxas de ocupação, os mais utilizados são os das faixas exclusivas e os das faixas reservadas. São os tipos de adaptação do espaço viário para ônibus mais comuns, dada a flexibilidade de utilização, além do baixo custo de implantação. Caracterizam-se pela separação do tráfego através de marcações no solo, ou até mesmo pela utilização de bloqueios. O que diferencia uma faixa exclusiva de uma reservada é que apesar de ser utilizada somente por ônibus, a faixa exclusiva permite, em certos trechos, a presença de outros tipos de veículos para a conversão à direita, bem como a presença de veículos de serviços urgentes, como ambulâncias, bombeiros e polícia. Na faixa reservada, tais movimentos não são permitidos. Desta forma, a tabela dos códigos dos movimentos permitidos em uma faixa é dada a seguir:

MOVIMENTO PERMITIDO	EXCLUSIVA	RESERVADA
leves	1	7
pesados	2	8
ônibus	3	9
leves + pesados	4	10
leves + ônibus	5	11
pesados + ônibus	6	12
livre	0	

Tabela 2.13: tabela dos códigos dos tipos de movimento permitidos em uma faixa

- *fluxo de saturação*: é o fluxo máximo de veículos suportado pela faixa.
- *tabela dos índices dos pontos de ônibus na faixa*

2.6 OS PONTOS DE ÔNIBUS

A caracterização dos pontos de ônibus é realizada através dos seguintes atributos:

- *número da via e da faixa a que pertence*
- *distância do ponto ao início da via*
- *tabela das linhas do ponto*: para cada linha que pára no ponto temos o número da linha correspondente, a taxa média da chegada de usuários ao ponto e a semente que é utilizada no cálculo do próximo instante da chegada de usuário da linha ao ponto.

2.7 AS LINHAS DE ÔNIBUS

As linhas de ônibus de transporte coletivo possuem as seguintes informações:

- *número da entrada de onde se originam*
- *semente para a geração de variáveis aleatórias*: esta semente tem como função principal auxiliar no cálculo da próximo instante da injeção de ônibus e no cálculo da semente para cada ônibus injetado pela linha.

- *tipo de ônibus adotado*: consideramos que cada linha de ônibus utilizará somente um tipo de veículo.
- *headway*: é o intervalo de tempo entre o lançamento de dois ônibus consecutivos da linha. Este tempo está sujeito às perturbações da rede.
- *tabela de direções*: a programação do percurso dos ônibus da linha é dada por uma tabela de direções. Esta tabela é organizada de forma seqüencial, desde a injeção do veículo até a sua saída da rede.
- *tabela dos pontos de parada*: esta tabela indica a seqüência dos pontos de parada da linha para a realização das operações de embarque e desembarque de passageiros.
- *tabela de injeções*: para cada injeção de ônibus da linha, dados de uma pesquisa sobe-desce devem ser fornecidos. Estes dados correspondem aos limites inferior e superior do volume esperado de passageiros dentro de cada ônibus quando entra na rede, e aos limites inferior e superior do número esperado de passageiros que descem em cada ponto de parada da linha.

Capítulo 3

OS EVENTOS E AS OPERAÇÕES DO MODELO

Neste capítulo mostraremos os principais eventos e operações envolvendo as entidades do modelo proposto. Vamos também detalhar as atividades que os veículos e os usuários do transporte coletivo executam em cada evento.

3.1 A INJEÇÃO DE VEÍCULOS

O modelo considera três tipos de veículos: *leves*, *pesados* e *ônibus*. E como o processo de injeção de ônibus é diferente daquele da injeção de veículos leves e pesados, temos que diferenciar a injeção de veículos na rede em dois casos distintos:

- a injeção se refere a veículos leves e pesados;
- a injeção se refere a ônibus de transporte coletivo.

3.1.1 A Injeção de Veículos Leves e Pesados

O SIMTRAF-OPERBUS considera que a injeção dos veículos leves e pesados em uma entrada é um processo poissoniano, com média horária conhecida.

Desta forma, o instante da próxima injeção de veículo leve ou pesado é dado pela seguinte expressão:

$$hpiv = huiv + NEG_EXP(mda) \quad (1)$$

- onde:
- *hpiv*: instante da próxima injeção de veículo (leve ou pesado)
 - *huiv*: instante da última injeção de veículo (leve ou pesado)
 - *NEG_EXP(mda)*: rotina que retorna um valor de uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa, com média dada, *mda*

Embora a forma de geração destes veículos na entrada se origine de um mesmo processo, a caracterização do tipo de veículo (leve ou pesado) injetado obedece a uma taxa percentual conhecida,

disposta sob a forma de uma tabela (Tabela 3.1):

VEÍCULOS LEVES	VEÍCULOS PESADOS
70%	30%

Tabela 3.1: tabela exemplo do percentual da geração de veículos em uma entrada

Pelos dados da Tabela 3.1, 70% dos veículos injetados em uma entrada serão do tipo leve, e 30% serão do tipo pesado.

Assim, quando um veículo (não-ônibus) é gerado em uma entrada, a sua caracterização será determinada pelo Algoritmo 3.1.

Algoritmo 3.1

Procedimento ESCOLHA_TIPO_VEÍCULO (no_ent)

Inteiro

no_ent: número da entrada;

Início

Inicializar Variáveis

y = RAND_INT (0, 100): variável aleatória com distribuição uniforme inteira no intervalo [0,100]

prc_leve = taxa percentual da geração de veículos leves da entrada

Se $(y \leq \text{prc_leve})$ e $(\text{prc_leve} > 0)$

Então

TIPO_VEÍCULO = leve;

Senão

TIPO_VEÍCULO = pesado;

FimSe

FimProcedimento

3.1.2 A Injeção de Ônibus

A injeção de ônibus de uma linha é determinada pelo *headway* empregado. O *headway* é o intervalo de tempo entre o lançamento de dois ônibus consecutivos de uma linha e está sujeito às perturbações da rede.

Para o início das injeções, um intervalo do início da simulação se faz necessário, pois se um ônibus está programado a entrar na rede às 8h05, e a simulação começa às 8h00, uma defasagem

equivalente a 300 segundos precisa ser aplicada na injeção deste primeiro ônibus da linha. Portanto, a primeira injeção de ônibus de uma linha é dada por:

$$hpio = \text{delta} + prt b \quad (2)$$

- onde:
- *hpio*: instante da próxima injeção de um ônibus
 - *delta*: defasagem do início da simulação
 - *prt b*: perturbação sofrida pelo ônibus desde a saída do ponto inicial até a chegada à rede

A perturbação da rede é consequência das interações de cada ônibus com o tráfego e dos tempos de permanência nos pontos de parada, e neste trabalho ela é dada por uma distribuição normal, com média zero e desvio padrão igual a um minuto.

A seguir, o instante da próxima injeção de ônibus é dado por:

$$hpio = hui o + hdwy + prt b \quad (3)$$

- onde:
- *hui o*: instante da última injeção de ônibus
 - *hdwy*: *headway* adotado pela linha

3.2 A ESCOLHA DA CONVERSÃO AO FINAL DAS VIAS

Quando um veículo entra em uma via, ele deverá escolher a direção que irá tomar ao final desta. Esta escolha depende tanto das características da via (taxas de conversões) como do tipo de veículo considerado.

Segundo o modelo, um veículo possui três direções possíveis de serem tomadas ao final de uma via: *esquerda*, *frente* e *direita*. No entanto, como o trajeto de cada linha de ônibus já é conhecido, temos que diferenciar o processo de escolha em dois casos:

- a escolha se refere aos veículos leves ou pesados;
- a escolha se refere aos ônibus de transporte coletivo.

3.2.1 A Escolha se Refere a um Veículo Leve ou Pesado

A restrição da circulação de certos tipos de veículos em determinadas áreas de uma cidade é uma prática comum em grandes centros. Esta restrição é realizada através da proibição da entrada de tais veículos em suas vias de acesso, sendo direcionados a vias de tráfego alternativas.

No SIMTRAF-OPERBUS, cada via da rede possui uma tabela de taxas percentuais de conversões para cada tipo de veículo (leve e pesado) considerado.

Esta tabela pode expressar tanto o comportamento das conversões dos veículos no período de tempo em estudo, como pode representar a restrição da circulação de veículos na via.

Consideremos a via ilustrada pela Figura 3.1:

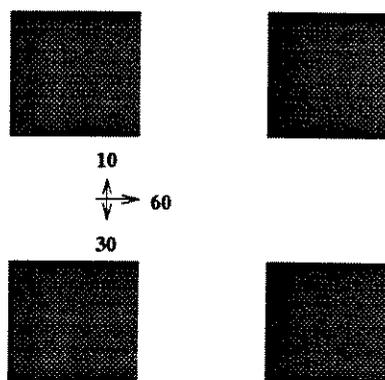


Figura 3.1: representação das taxas percentuais de conversão de uma via

Vamos supor que as taxas ilustradas pela Figura 3.1 se referem ao comportamento das conversões de veículos leves em um determinado horário. Assim, a tabela de conversões dos veículos leves é dada pela Tabela 3.2:

ESQUERDA	FRENTE	DIREITA
10%	60%	30%

Tabela 3.2: tabela de conversões dos veículos leves

Tabela semelhante é obtida para o caso de veículos pesados utilizando o mesmo procedimento.

O algoritmo da escolha da direção a ser tomada ao final de uma via pode ser assim expresso (Algoritmo 3.2):

Algoritmo 3.2

Procedimento ESCOLHA_DIREÇÃO_LEVE_PESADO (no_via)

Inteiro

no_via: número da via;

Início

Inicializar Variáveis

y = RAND_INT(0, 100): variável aleatória com distribuição uniforme inteira no intervalo [0,100]

prc_esq = taxa percentual de conversões da via à esquerda

prc_frt = taxa percentual de conversões da via em frente

Se (prc_esq > 0) e (y ≤ prc_esq)

Então

DIREÇÃO = esquerda;

Senão

Se (prc_frt > 0) e (y ≤ prc_esq+prc_frt)

Então

DIREÇÃO = frente;

Senão

DIREÇÃO = direita;

FimSe

FimSe

FimProcedimento

Suponhamos, por exemplo, que y = 63. Então pelos dados da tabela 1, teríamos:

$$prc_esq < y < (prc_esq + prc_frt)$$

ou seja:

$$10 < 63 < (10 + 60 = 70)$$

o que implicaria que a direção escolhida pelo veículo seria a de seguir em frente.

3.2.2 A Escolha se Refere a um Ônibus de Transporte Coletivo

Por outro lado, os ônibus de transporte coletivo possuem rotas pré-determinadas pelas linhas as quais pertencem. Assim, as direções que irão tomar já estão programadas e estão elaboradas em uma tabela de direções.

Consideremos a seguinte rede e o trajeto de uma linha de ônibus hipotética:

Algoritmo 3.3

Procedimento ESCOLHA_DIREÇÃO_ÔNIBUS

Inicializar Variáveis

tabela[.]: tabela de direções de uma linha (semelhante à Tabela 3.3)
mrc: marcador da tabela de direções de um ônibus

Início

DIREÇÃO = tabela [mrc]

mrc = mrc + 1

FimProcedimento

3.3 A ESCOLHA DA FAIXA DE UMA VIA

Após determinar a direção que um veículo irá tomar ao final de uma via, passamos ao processo da escolha da faixa na qual ele irá trafegar. No entanto, dependendo da direção escolhida e dos tipos de faixa que compõem a via, há a possibilidade de que exista mais de uma faixa possível de circulação.

Para o critério de desempate, analisamos a composição e o tamanho ponderados das filas de veículos nas faixas. A ponderação é responsável pelo balanceamento do processo da escolha da faixa na qual o veículo irá se dirigir, e ela depende do tipo de veículo e do tipo de faixas com que estamos lidando. Através desta ponderação tentamos assegurar uma diversidade de situações:

- que os veículos se dirijam às faixas onde sua circulação é permitida (faixas livres ou com reserva ao seu movimento);
- a proibição da circulação de veículos cuja categoria não coincida com as da segregação;
- que veículos pesados e ônibus se mantenham na faixa mais à direita das vias, desde que estas sejam vias de livre circulação de veículos;
- que os ônibus se dirijam às faixas onde estão localizados seus pontos de parada;
- que a entrada nas faixas exclusivas por outros tipos de veículos só seja permitida para os casos de conversão à esquerda ou à direita.

As Tabelas 3.4 a 3.6 nos mostram as diversas situações de ponderação:

TIPO DE MOVIMENTO	PONDERAÇÃO
livre	1,0
exclusiva ou reservada ao movimento	0,0
exclusiva a outros veículos	1,5/+∞ *
reservada a outros veículos	+∞

* para conversão à esquerda/direita e para seguir em frente, respectivamente

Tabela 3.4: tabela de ponderação para o caso da análise de veículos leves

TIPO DE MOVIMENTO	PONDERAÇÃO
livre	0,5/1,5 *
exclusiva ou reservada ao movimento	0,0
exclusiva a outros veículos	1,5/+∞ **
reservada a outros veículos	+∞

* para a faixa mais à direita da via, e para as demais faixas, respectivamente

** para conversão à esquerda/direita e para seguir em frente, respectivamente

Tabela 3.5: tabela de ponderação para o caso da análise de veículos pesados

TIPO DE MOVIMENTO	PONDERAÇÃO
livre	0,0/0,5/1,5 *
exclusiva ou reservada ao movimento	0,0
exclusiva a outros veículos	1,5/+∞ **
reservada a outros veículos	+∞

* para faixa onde há um de seus pontos de parada, para a mais à direita da via, e para as demais faixas, respectivamente

** para conversão à esquerda/direita e para seguir em frente, respectivamente

Tabela 3.6: tabela de ponderação para o caso da análise de ônibus de transporte coletivo

O cálculo da ponderação está ainda sujeito às conversões permitidas em cada faixa. Há uma penalização-extra às faixas que não possuem exclusividade de conversão, visto que veículos virando à esquerda ou à direita geralmente causam atrasos aos veículos atrás deles.

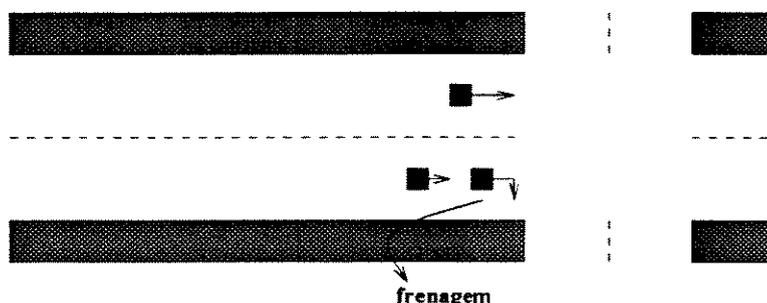


Figura 3.3: efeito de um veículo fazendo uma conversão

Esta penalização-extra não é a mesma para todas as vias da rede. Utilizamos um valor igual a 1.0 para não penalizar, e valores maiores que 1.0 para penalizar. Assim:

$$peso = peso_seg * peso_via \quad (4)$$

onde:

- *peso*: ponderação total da faixa
- *peso_seg*: peso da segregação, dado pelas Tabelas 3.4 à 3.6
- *peso_via*: penalização-extra

Consideremos, por exemplo, que um veículo leve se desloque em uma via onde não há reserva de faixas, e que ao final desta via ele deverá continuar seu movimento em frente. A Figura 3.4 ilustra esta situação. Desta forma, o veículo deverá optar entre as faixas 1 ou 2. As ponderações aplicadas serão:

- $peso_1 = peso_seg_1 * peso_via_1 = 1,0 * 1,5 = 1,5$
- $peso_2 = peso_seg_2 = 1,0$

onde $peso_i$ é a ponderação da faixa i , e a penalização-extra, neste caso, é aplicada somente à faixa 1, com valor igual à 1,5, por não possuir exclusividade de conversão.

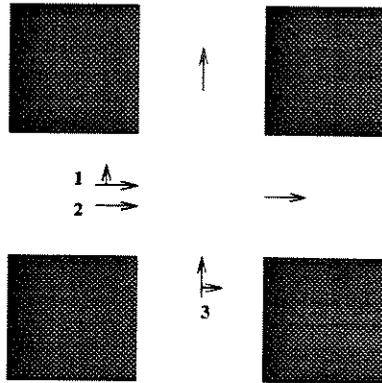


Figura 3.4: exemplo de uma penalização extra

Portanto, determinados os pesos das faixas, passamos à ponderação das informações:

- $nl_i = (\text{número de veículos leves na faixa } i) * \text{peso da faixa } i$
- $nvp_i = (\text{número de veículos pesados + ônibus na faixa } i) * \text{peso da faixa } i$
- $nv_i = (\text{número de veículos na faixa } i) * \text{peso da faixa } i$
- $comp_i = (\text{comprimento da fila da faixa } i) * \text{peso da faixa } i$

As faixas candidatas são avaliadas duas a duas até que reste somente uma, aquela na qual o veículo irá se transferir. O algoritmo do processo desta escolha é dado por:

Algoritmo 3.4

Procedimento ESCOLHA_FAIXA (entre as faixas 1 e 2)

Início

```
Se (nv1 < nv2)
Então aux1 = 1;
Senão Se (nv1 > nv2)
Então aux1 = 2;
Senão Se (RAND_INT (0,100) ≤ 50)
Então aux1 = 1;
Senão aux1 = 2;
FimSe

Se (nvp1 < nvp2)
Então aux2 = 1;
Senão Se (nvp1 > nvp2)
Então aux2 = 2;
Senão Se (RAND_INT (0,100) ≤ 50)
Então aux2 = 1;
Senão aux2 = 2;
FimSe

Se (aux1 = aux2)
Então FAIXA_ESCOLHIDA = aux1 = aux2
Senão Se (comp1 < comp2)
Então FAIXA_ESCOLHIDA = 1
Senão Se (comp1 > comp2)
Então FAIXA_ESCOLHIDA = 2
Senão Se (nv1 < nv2)
Então FAIXA_ESCOLHIDA = 1
Senão Se (nv1 > nv2)
Então FAIXA_ESCOLHIDA = 2
Senão Se (RAND_INT (0,100) ≤ 50)
Então FAIXA_ESCOLHIDA = 1
Senão FAIXA_ESCOLHIDA = 2
FimSe
```

FimProcedimento

onde:

- RAND_INT (0,100): é uma função de geração de uma variável aleatória com distribuição uniforme inteira, com limites inferior 0 e superior 100

3.4 O DESLOCAMENTO DE VEÍCULOS NAS VIAS

Quando um veículo entra em uma via, ele calcula qual será o instante esperado de sua chegada ao final desta. Este cálculo envolve determinar o tempo de deslocamento na via, bem como o tempo de permanência em um ponto da via, se o veículo corresponder a um ônibus.

3.4.1 O Tempo de Deslocamento dos Veículos

No SIMTRAF-OPERBUS, consideramos que a velocidade de percurso de um veículo em uma via será mantida constante, salvo nas situações em que é obrigado a parar por encontrar obstáculos ao seu movimento.

Assumimos que a distribuição das velocidades dos veículos em uma via é dada por uma distribuição normal, com média e desvio padrão conhecidos. Desta forma, a velocidade de um veículo em uma via pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$vel_vcl = vel_mda - dpv * coef \quad (5)$$

- onde:
- *vel_vcl*: velocidade do veículo em uma via
 - *vel_mda*: velocidade média
 - *dpv*: desvio padrão da velocidade
 - *coef*: coeficiente do veículo

A velocidade média de percurso e o desvio padrão da equação (5) são dados da tabela de velocidades de cada via da rede e dependem do tipo de veículo estudado.

Calculada a velocidade de deslocamento do veículo, o tempo de percurso até o final da via é dado por:

$$tmp_prc = \frac{comp_via}{vel_vcl} \quad (6)$$

- onde:
- *tmp_prc*: tempo de percurso
 - *comp_via*: comprimento total da via
 - *vel_vcl*: velocidade do veículo, dada em (5)

Neste trabalho, se a via não for do tipo preferencial, um atraso de um segundo é acrescentado ao tempo de percurso, pois veículos que trafegam em vias que não são preferenciais têm que parar ao final delas para verificar se há alguma ocorrência que possa retardar a sua saída.

Portanto, a expressão do cálculo do instante da provável chegada do veículo ao final da via é dada por:

$$hdcfv = hora_cte + tmp_prc \quad (7)$$

- onde:
- *hdcfv*: instante da provável chegada do veículo ao final da via

- *hora_cte*: instante corrente da simulação; neste caso, quando o veículo entra na via
- *tmp_prc*: tempo de percurso, dado em (6)

3.4.2 O Tempo de Permanência dos Ônibus nos Pontos de Parada

O comportamento de um ônibus quando de sua chegada, permanência e partida de um ponto de ônibus pode ser esquematicamente representado conforme o Gráfico 3.1:

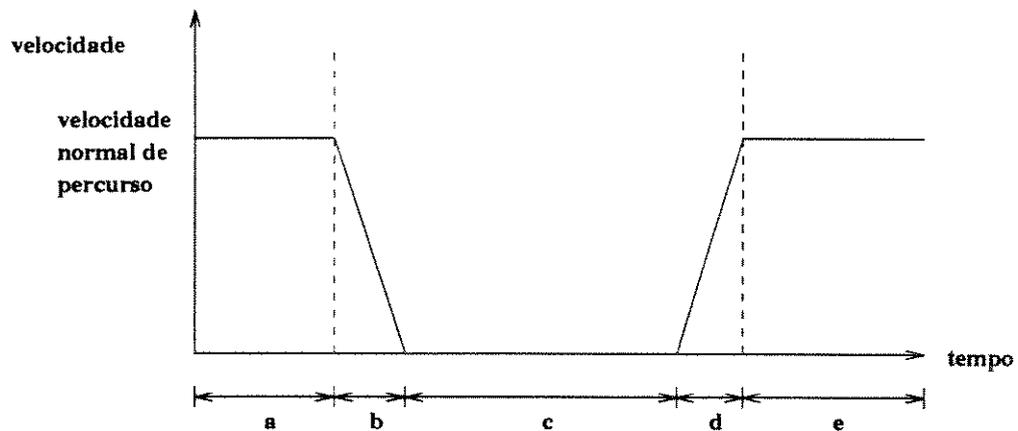


Gráfico 3.1: diagrama velocidade x tempo da operação de um ônibus na região de um ponto

- onde:
- *a*: tempo anterior à chegada ao ponto de parada
 - *b*: tempo de desaceleração até a parada completa
 - *c*: tempo parado no ponto
 - *d*: tempo de aceleração até a retomada da velocidade inicial
 - *e*: tempo posterior à retomada da velocidade

Tempo de aceleração e desaceleração

Os tempos de desaceleração (*b*) e aceleração (*d*) dependem basicamente das características de desempenho dos ônibus e de sua velocidade normal de operação. O atraso sofrido pelos ônibus devido à desaceleração na aproximação do ponto de parada, e à aceleração, quando da sua partida, é denominado *penalidade pela parada*.

Tempo parado no ponto

O tempo que um ônibus gasta em um ponto, excluídos os tempos de desaceleração e aceleração, é constituído por dois componentes principais. Um deles está relacionado com as operações de abertura e fechamento de portas, bem como outras operações em que o ônibus permanece parado sem que ocorra embarque ou desembarque de passageiros, denominado tempo morto. O outro componente expressa o tempo efetivamente gasto no embarque e desembarque de passageiros.

O tempo marginal de embarque ou desembarque representa o tempo médio gasto por um passageiro para embarcar no ônibus ou desembarcar dele. Este tempo marginal é constituído por inúmeras variáveis, as quais podem ser agrupadas segundo dois fatores principais:

- o tempo efetivamente gasto pelo passageiro para embarcar ou desembarcar, que depende de vários fatores, tais como o número e a altura dos degraus, a largura, número e posicionamento das portas e desenho interno dos ônibus;
- o tempo necessário para o pagamento da tarifa, onde são determinantes principais o número e disposição das portas, o tipo de bilhete utilizado, o sistema de recolhimento do bilhete e a localização das roletas.

Supondo-se que cada porta do ônibus seja utilizada ou para a subida ou para a descida de passageiros, podemos representar as expressões analíticas do tempo de embarque e desembarque sob dois enfoques de uma maneira simplificada:

Ônibus de Duas Portas

$$tmp_opr = máx \{ nd * td, ne * te \} \quad (8)$$

- onde:
- *tmp_opr*: tempo de operação para o embarque e desembarque de passageiros
 - *nd*: número de desembarques
 - *td*: tempo de desembarque médio por passageiro
 - *ne*: número de embarques
 - *te*: tempo de embarque médio por passageiro

Ônibus de Três Portas

Neste caso, supomos que duas portas são reservadas para o desembarque de passageiros. Desta forma, então, dividimos ao meio os passageiros que descem em cada porta. O tempo de operação é dado por:

$$tmp_opr = máx \{ nd_1 * td, nd_2 * td, ne * te \} \quad (9)$$

- onde:
- nd_i : número de desembarques pela porta i
 - $nd_1 = \lfloor nd / 2 \rfloor$
 - $nd_2 = nd - nd_1$

O SIMTRAF-OPERBUS determina o tempo de permanência de um ônibus em um ponto através de uma equação abrangente, passível de utilização para qualquer tipo de ônibus ou de processo de recolhimento de bilhete. Esta equação é dada por:

$$tmp_prm = FATOR + tmp_opr \quad (10)$$

- onde:
- tmp_prm : tempo de permanência no ponto
 - $FATOR$: tempo de aceleração e desaceleração mais o tempo morto
 - tmp_opr : tempo de operação de embarque e desembarque de passageiros, obtidos em (8) ou (9)

Para a simplificação do modelo, o tempo de aceleração e desaceleração e o tempo morto são agregados em uma única variável de penalização denominada FATOR. Neste trabalho, esta variável assume um único valor, independente do tipo de ônibus sendo analisado, e equivale a 10 segundos.

Desta forma, a expressão do cálculo do instante da provável chegada ao final da via fica expressa pela seguinte fórmula:

$$hdcfv = hora_cte + tmp_prc + tmp_prm \quad (11)$$

- onde:
- $hdcfv$: instante da provável chegada do ônibus ao final da via
 - $hora_cte$: instante corrente da simulação; neste caso, quando o ônibus entra na via
 - tmp_prc : tempo de percurso, dado em (6)
 - tmp_prm : tempo de permanência no ponto de ônibus, dado em (10)

3.5 A SAÍDA DE VEÍCULOS DAS FAIXAS

Em uma faixa, quando o período de verde começa, iniciamos o processo de escoamento da fila formada durante o período de vermelho. Neste processo, percebe-se uma fase transitória em que o fluxo de descarregamento da fila é crescente para depois estabilizar-se em um fluxo de regime. Esta fase de transição acarreta um atraso que representa o custo (em segundos) de colocar a fila de veículos em movimento, ou seja, é o tempo gasto pela fila para entrar em regime de escoamento permanente, a partir do início do verde.

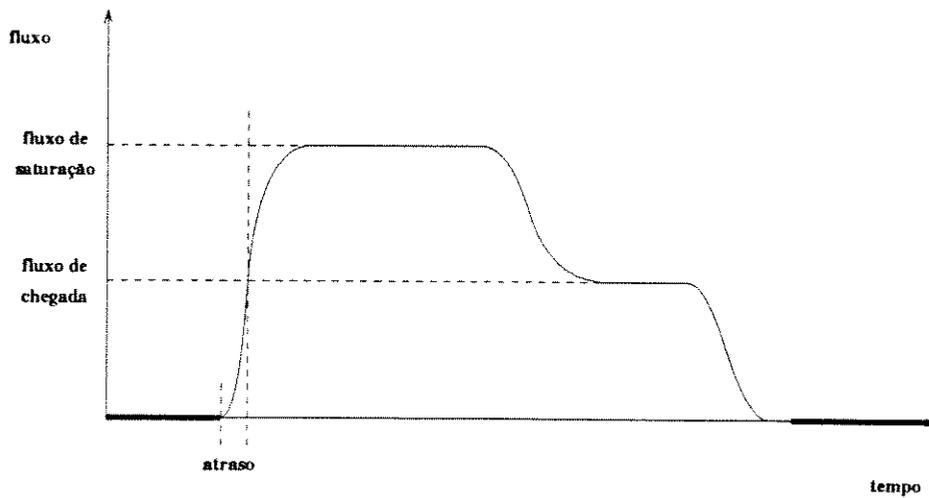


Gráfico 3.2: gráfico do fluxo da saída de veículos

onde: - *atraso*: tempo gasto pela fila para entrar em regime de escoamento (*atraso*)

No entanto, este *atraso* está distribuído entre os primeiros veículos da fila em uma forma decrescente (Gráfico 3.3).

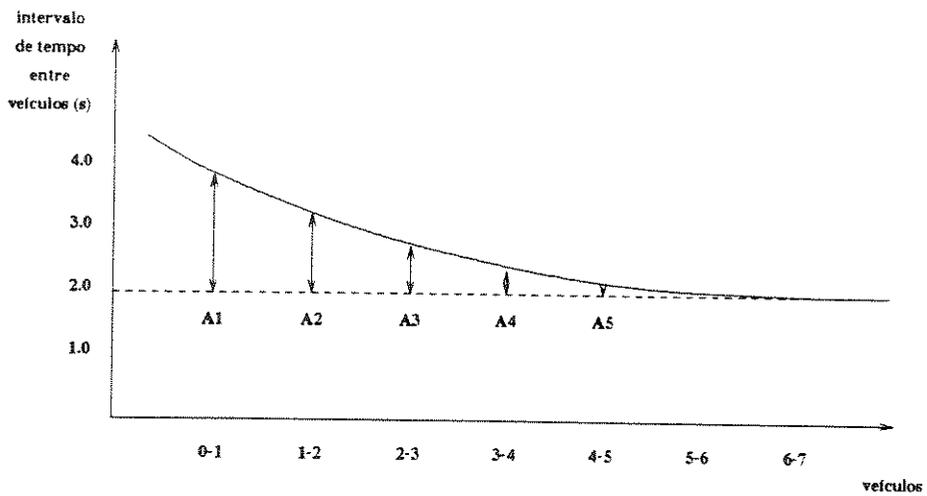


Gráfico 3.3: atraso entre a saída de dois veículos consecutivos a partir do início do verde

Para efeito de simplificação do modelo, atribuímos este atraso totalmente ao primeiro elemento da fila. Este atraso é dado por cada via da rede e depende do tipo de veículo a qual este elemento se refere. Assim, quando o sinal abre, o instante da saída do primeiro veículo da faixa será dado por:

$$hsv = hora_cte + aief \quad (12)$$

- onde:
- *hsv*: instante da saída de veículo da faixa
 - *hora_cte*: instante corrente da simulação; neste caso, quando o período de verde inicia
 - *aief*: atraso da saída do primeiro veículo da faixa

Em seguida, o valor da próxima saída de veículo da faixa é atualizado pelo intervalo de escoamento de veículos. Este intervalo é, em média, o intervalo mínimo entre a passagem de dois veículos consecutivos por um mesmo ponto fixo. Este intervalo mínimo pode ser considerado como o inverso do fluxo máximo (fluxo de saturação) suportado pela faixa.

A distribuição do intervalo de escoamento segue uma distribuição normal, dada pela seguinte fórmula:

$$int_esc = \frac{1}{flx_sat} - dpev * coef \quad (13)$$

- onde:
- *int_esc*: intervalo de escoamento de veículos
 - *flx_sat*: fluxo de saturação da faixa
 - *dpev*: desvio padrão do escoamento da fila
 - *coef*: coeficiente do veículo que sai da faixa

onde a média é dada por $1/flx_sat$, e o desvio padrão é dado por cada via da rede, e depende do tipo de veículo que sai da faixa.

Neste sentido, o próximo instante da saída de veículos da faixa será dado por:

$$hsv = husv + int_esc \quad (14)$$

- onde:
- *hsv*: instante da provável saída de veículo da faixa
 - *husv*: instante da última saída de veículo da faixa
 - *int_esc*: intervalo de escoamento, dado em (13)

Entretanto, nem sempre o veículo sairá no instante determinado em (14). Caso o instante de sua provável chegada ao fim da via for maior, este será o instante da próxima saída de veículo da faixa.

$$hpsvf = \max \{ hsv, hdcfv \} \quad (15)$$

- onde:
- $hpsvf$: instante da próxima saída de veículo da faixa
 - hsv : instante da provável saída de veículo da faixa, dado em (14)
 - $hdcfv$: instante da provável chegada do primeiro veículo da fila ao final da faixa, dado em (7) para veículos leves e pesados, e em (11) para os ônibus

3.5.1 O Intervalo de Aceitação

Quando um veículo está prestes a sair de uma via, calculamos um intervalo de aceitação que desempenha duas funções principais. A primeira é que este intervalo é utilizado como parâmetro para a travessia segura do cruzamento, e a segunda é que ele serve ao cálculo do intervalo de tempo perdido nesta travessia.

No primeiro caso, quando o veículo encontra algum conflito ao seu movimento, verificamos para cada faixa de cada via-conflito se o intervalo de aceitação do veículo é menor que o intervalo que o primeiro veículo de cada faixa chega ao cruzamento. Se para todas as faixas-conflito o intervalo de aceitação for menor, o veículo será liberado para atravessar o cruzamento; caso contrário, pode ocorrer um atraso na saída do veículo.

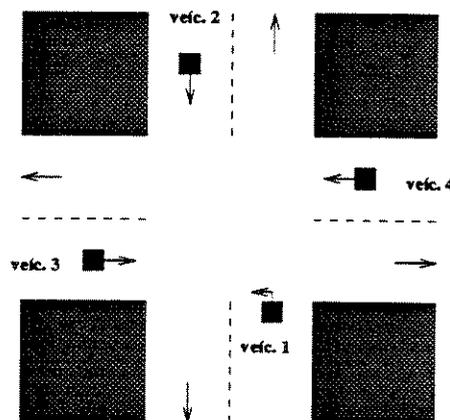


Figura 3.5: situação de conflito em um cruzamento não-semaforizado, em sentido não-preferencial

Pela Figura 3.5, o veículo 1 encontra conflitos nas vias ocupadas pelos veículos 2, 3 e 4. Supondo que o veículo 1 possua um intervalo de aceitação igual a quatro segundos, temos duas situações a considerar:

- se todos os outros veículos chegarem ao cruzamento depois destes quatro segundos, o veículo 1 poderá atravessar o cruzamento;
- se algum veículo chegar ao cruzamento antes dos quatro segundos, o veículo 1 deverá esperar.

Supondo que o veículo 1 saia de sua via e atravesse o cruzamento, precisamos determinar o tempo que ele irá gastar para realizar a travessia: configura-se, aqui, a segunda função do intervalo de aceitação.

O SIMTRAF-OPERBUS assume que o tempo gasto na travessia de um cruzamento é dado pela metade do tempo calculado para o intervalo de aceitação. No exemplo do veículo 1, ele irá gastar 2 segundos para chegar até a sua via destino.

O cálculo do intervalo de aceitação é dado por uma distribuição normal, com média e desvio padrão conhecidos. A média depende das larguras das vias que o veículo irá atravessar, bem como do tipo de veículo considerado. O modelo ainda assume o valor 1.0 para o desvio padrão. Como este intervalo depende das características do veículo, este cálculo é dado por:

$$int_conf = média - coef \quad (16)$$

- onde:
- *int_conf*: intervalo de aceitação do veículo
 - *média*: média do intervalo de aceitação, que depende das larguras das vias a serem atravessadas e do tipo de veículo
 - *coef*: coeficiente do veículo

Assim, veículos mais “arrojados” terão intervalos de aceitação menores (pois $coef > 0$) e os menos “arrojados” terão intervalos de aceitação maiores (pois $coef < 0$).

3.5.2 Conflitos

Configura-se uma situação de conflito quando um veículo, que está prestes a sair de uma via, irá atravessar fluxos que são preferenciais ao seu movimento.

Os conflitos dependem do tipo de via na qual o veículo se encontra e de qual será a direção a ser tomada ao final desta. Como são três os tipos de via (sem-prioridades, preferencial, não-preferencial) e três as direções consideradas no modelo (esquerda, frente, direita) existem nove situações a serem analisadas.

Conflitos nas Vias do Tipo Sem-Prioridades

De acordo com as leis de trânsito, quando um veículo chega em um cruzamento sem prioridades, a não ser que a sua direção escolhida seja para a direita, sempre haverá conflito com a aproximação à sua direita. A Tabela 3.7 faz a esquematização dos conflitos nas vias do tipo sem-prioridades, de acordo com a direção desejada por um veículo.

DIREÇÃO ESCOLHIDA	CONFLITO
esquerda	em frente, à direita
frente	à direita
direita	-

Tabela 3.7: conflitos em uma via do tipo sem-prioridade

Consideremos, por exemplo, o cruzamento sem prioridades ilustrado pela Figura 3.6:

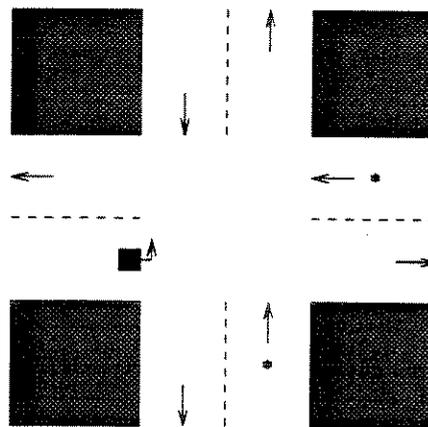


Figura 3.6: veículo prestes a sair de uma via do tipo sem-prioridade, desejando virar para a esquerda

O veículo encontra, neste caso, conflitos nas aproximações à sua frente e à sua direita (vias denotadas com um asterisco).

Conflitos nas Vias do Tipo Preferencial

Qualquer que seja a direção escolhida por um veículo que se encontra prestes a sair de uma via do tipo preferencial, os veículos nas aproximações não-preferenciais à sua esquerda e à sua direita não interferirão no movimento. O mesmo se verifica em cruzamentos semaforizados: se considerarmos que o veículo irá partir no estado verde de sua fase correspondente, as aproximações à sua esquerda e à sua direita estarão com as respectivas fases no estado vermelho. Se, no entanto, a direção escolhida pelo veículo for para a esquerda, haverá conflito com a aproximação à sua frente. A Tabela 3.8 traz a esquematização dos conflitos segundo a direção desejada:

DIREÇÃO ESCOLHIDA	CONFLITO
esquerda	em frente
frente	-
direita	-

Tabela 3.8: conflitos em uma via do tipo preferencial

Consideremos, por exemplo, o cruzamento ilustrado pela Figura 3.7. O veículo, neste caso, encontra conflito na aproximação à sua frente (denotada com um asterisco). Observe que as aproximações à esquerda e à direita têm o fluxo de veículos impedido (vias denotadas com uma barra dupla).

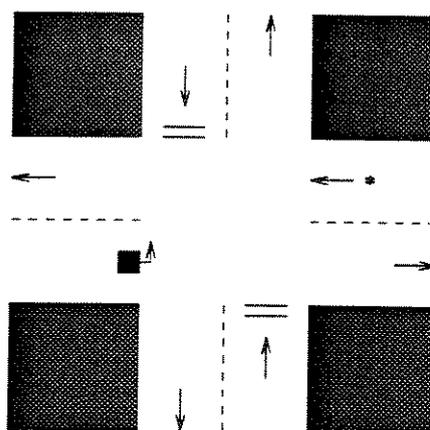


Figura 3.7: um veículo prestes a sair de uma via do tipo preferencial, desejando virar para a esquerda

Conflitos nas Vias do Tipo Não-Preferencial

Veículos que se encontram neste tipo de via sempre encontrarão conflitos, qualquer que seja sua direção escolhida.

DIREÇÃO ESCOLHIDA	CONFLITO
esquerda	à esquerda, em frente, à direita
frente	à esquerda, à direita
direita	à esquerda

Tabela 3.9: conflitos em uma via do tipo não-preferencial

Seja o cruzamento não-semáforizado, mas com priorização, ilustrado pela Figura 3.8:

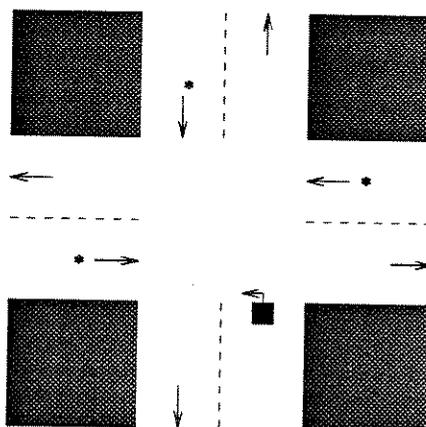


Figura 3.8: veículo prestes a sair de uma via do tipo não-preferencial, desejando virar para a esquerda

Neste caso, o veículo encontra conflitos nas aproximações à sua frente, esquerda e direita (vias denotadas com um asterisco).

3.5.3 Impasses

Um caso especial de conflito é o que denominamos de impasse. Um impasse ocorre quando dois ou mais veículos desejam sair de suas vias em um mesmo instante, mas não o conseguem pois um espera a saída do outro.

No SIMTRAF-OPERBUS, os impasses ocorrerão em cruzamentos onde não há semaforização, com aproximações de faixa única. No caso de cruzamentos semaforizados, tais impasses não são considerados, pois todas as fases deverão estar apropriadamente coordenadas. As configurações, a detecção e os critérios de desempate de cada tipo de impasse são expostos a seguir:

Impasse Envolvendo Dois Veículos

Impasses deste tipo ocorrem em qualquer que sejam as naturezas das vias que desembocam em um cruzamento não-semaforizado. Observe que a direção escolhida pelos dois veículos é para a esquerda.

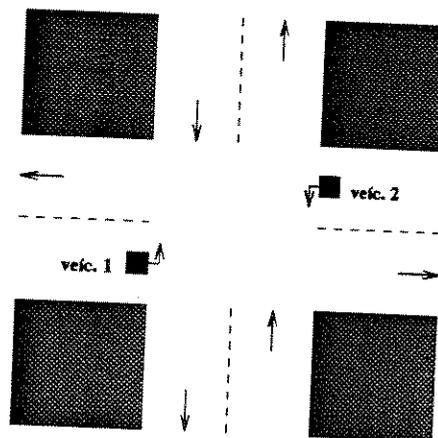


Figura 3.9: impasse com dois veículos

A liberação de um veículo é feita a partir dos seguintes critérios de desempate:

- se os veículos forem de natureza distinta, liberamos aquele de maior prioridade na seguinte ordem: ônibus, veículos pesados e veículos leves;
- se os veículos forem de natureza semelhante, liberamos aquele de maior "arrojo", isto é, aquele que possuir maior coeficiente de veículo;
- se, ainda assim, os veículos possuírem o mesmo coeficiente, a escolha do veículo será aleatória.

Caso não seja possível liberar o veículo escolhido, devido ao congestionamento da via de destino, tentamos liberar o veículo da aproximação à sua frente. Se nenhuma transferência possa ser realizada, nenhum veículo é deslocado.

Impasse Envolvendo Três Veículos

Impasses deste tipo só ocorrem em cruzamentos sem prioridades. O critério de desempate é liberar o veículo que se encontra mais à direita a cada instante. Assim, pelo exemplo da Figura 3.10, o veículo 1 sairia primeiro, tendo como seqüência o veículo 2, e depois o veículo 3.

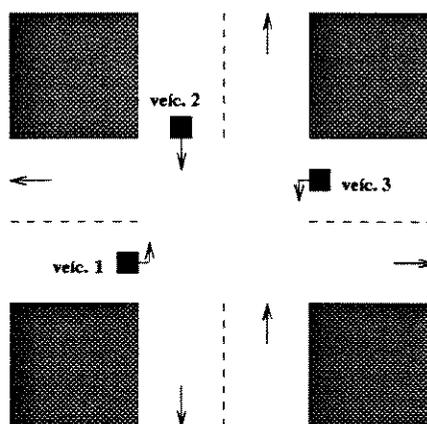


Figura 3.10: impasse com três veículos

No caso da impossibilidade da transferência de algum veículo, o próximo da seqüência será liberado, isto é, o veículo que se encontra à esquerda do veículo penalizado será o escolhido. Pelo exemplo, se o veículo 1 não puder ser liberado, passamos à transferência do veículo que se encontra à sua esquerda, isto é, o veículo de número 2.

Impasse Envolvendo Quatro Veículos

Como o caso anterior, este tipo de impasse só ocorre em cruzamentos onde não há priorização. O critério de desempate para a liberação do primeiro veículo é análogo ao caso envolvendo dois veículos, sem, no entanto, utilizar o critério da geração aleatória. Se, por acaso, dois ou mais veículos possuírem o mesmo coeficiente, aquele escolhido pela ordenação *quicksort* (ordenação segundo o coeficiente de veículo) será o primeiro a ser liberado. Para os três últimos veículos, utilizamos os critérios mostrados no caso de impasse envolvendo três veículos.

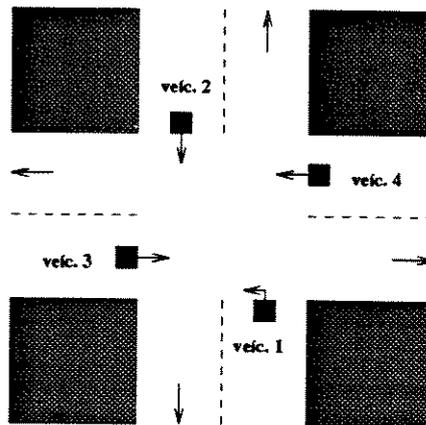


Figura 3.11: impasse com quatro veículos

Observação:

Quando um veículo está prestes a sair de sua via e ele detecta algum conflito, devemos realizar o teste do intervalo de aceitação para todas as vias-conflito. Este teste verificará se o veículo terá ou não de esperar para efetuar seu movimento.

No entanto, existe uma peculiaridade quando apenas um carro está prestes de sair de uma via do tipo sem-prioridades. A Figura 3.12 ilustra esta situação.

Neste caso, mesmo que o teste do intervalo de aceitação confirme que o veículo não deve ser transferido, executamos a sua liberação, pois entendemos que quem chega primeiro a um cruzamento sem-prioridades tem a preferência de saída.

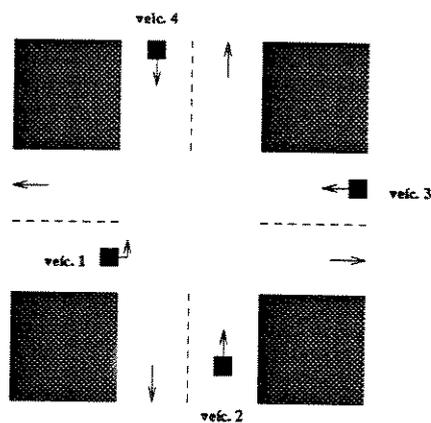


Figura 3.12: apenas um veículo está prestes a atravessar o cruzamento sem-prioridades

3.6 A CHEGADA DE USUÁRIOS AOS PONTOS

A taxa de chegada de usuários aos pontos de ônibus é um dado importante na operação do sistema, pois ela se reflete na demanda acumulada nos pontos durante o período compreendido entre a chegada de dois ônibus consecutivos de uma linha.

O padrão de chegadas de passageiros está diretamente ligado ao grau de confiança na regularidade de serviço, ou seja, ao nível de manutenção de uma programação de horários. Conhecendo a tabulação de horários dos ônibus, os usuários passam a programar sua chegada aos pontos de forma a minimizar sua espera.

Em Esteves [ESTEVES, 1982] foram analisadas duas situações de taxas distintas da chegada de passageiros. Para as linhas que operam com *headways* grandes, existe uma tendência do ajuste das chegadas de passageiros aos horários das chegadas dos ônibus aos pontos. Para as linhas que operam com *headways* pequenos, observa-se uma certa constância das chegadas aos pontos.

No SIMTRAF-OPERBUS, a chegada de usuários aos pontos de ônibus é considerada um processo poissoniano com taxa horária conhecida. Desta forma, as chegadas ocorrem de forma aleatória, mas apresentam uma certa constância durante o período simulado. Portanto, o próximo instante da chegada de um usuário ao ponto é dado por:

$$hpcu = hucu + NEG_EXP(mda) \quad (17)$$

- onde:
- *hpcu*: instante da próxima chegada de usuário ao ponto
 - *hucu*: instante da última chegada de usuário ao ponto
 - *NEG_EXP(mda)*: rotina que retorna um valor de uma variável aleatória com distribuição exponencial negativa, com média dada, *mda*

3.7 O VOLUME DE PASSAGEIROS

Quando um ônibus entra na rede simulada, dando continuidade ao seu itinerário, é de se supor que ele já possua um determinado carregamento, ou seja, o ônibus possua um volume de passageiros a bordo. Para cada injeção de ônibus de uma linha é calculado o número esperado de passageiros a bordo do veículo. Este cálculo leva em consideração uma pesquisa sobe-desce, e é baseado na geração de uma variável aleatória com distribuição uniforme inteira com limites inferior e superior conhecidos.

3.7.1 As Demandas nos Pontos de Parada

Desembarque

O número de passageiros que desembarcam em cada ponto leva em consideração uma pesquisa sobe-desce. Para o cálculo do número de desembarques em cada ponto, o modelo baseia-se na geração de uma variável aleatória com distribuição uniforme inteira com limites inferior e superior conhecidos.

Embarque

A princípio, todas as pessoas que esperam em uma fila a chegada do ônibus são candidatas a embarcar nele. No entanto, o modelo verifica a capacidade de transporte do veículo para que sejam calculados o número de passageiros que podem realmente embarcar, bem como a demanda recusada pelo veículo. Se o número de pessoas na fila é menor ou igual ao número de lugares disponíveis no ônibus, a lotação máxima do veículo não é comprometida e toda a fila será descarregada. Se, por outro lado, o número de pessoas na fila é maior que o número de lugares disponíveis no ônibus, a fila será parcialmente descarregada até o enchimento máximo do veículo. Haverá, portanto, passageiros recusados, que esperarão pelo próximo ônibus.

3.8 AS FILAS

3.8.1 As Filas nos Pontos de Ônibus

Um ponto de parada que serve a duas linhas de ônibus distintas possui duas filas de espera, uma para cada linha que é atendida. Na medida que algum usuário de uma linha chega ao ponto, ele irá se posicionar ao final da fila correspondente. Assim, o exemplo abaixo ilustra a chegada de um usuário da linha 1 ao ponto de ônibus P:

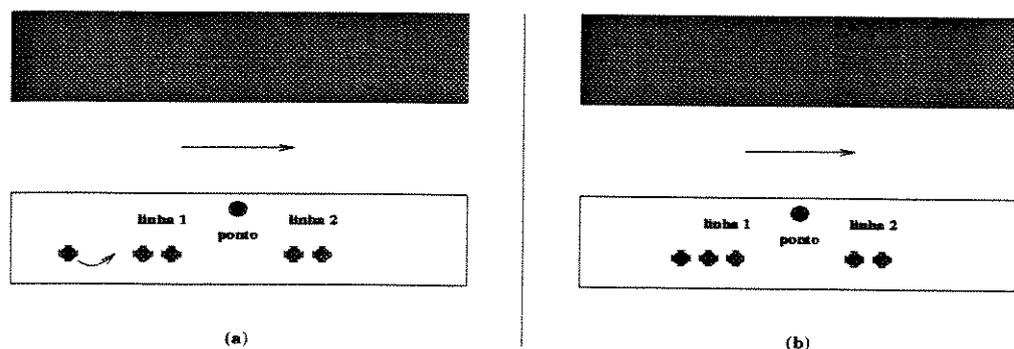


Figura 3.13: chegada de um novo usuário da linha 1 ao ponto P

Com respeito à disciplina de atendimento das filas de espera, o modelo adota a disciplina FIFO (*first in, first out*), onde os primeiros elementos da fila serão os primeiros a embarcar.

3.8.2 As Filas nas Faixas

Uma fila de veículos corresponde a uma seqüência de veículos em uma faixa, parados ou não.

Quando um veículo é injetado em uma entrada, ele é posicionado na fila virtual da faixa a qual ele se dirige, seguindo a disciplina FIFO. A fila virtual tem como objetivo guardar a informação dos veículos que ainda não trafegam pela faixa.

No instante em que o veículo entra efetivamente na faixa, ele é retirado da fila virtual, e então posicionado na fila da faixa, de acordo com o seu instante desejado de chegada ao final da via e da possibilidade ou não de ultrapassagens.

Para que haja ultrapassagens, as seguintes condições são exigidas:

- que exista, pelo menos, uma faixa adjacente que permita o acesso do veículo;
- a faixa que o veículo se encontra e a faixa a ser utilizada para a ultrapassagem possuam uma taxa de ocupação inferior a 60% (por motivos de simplificação do modelo).

Caso seja possível a realização de ultrapassagens, o veículo comparará o seu instante desejado de chegada ao final da via com os instantes dos demais veículos, a partir do primeiro elemento da fila. Se, por outro lado, as ultrapassagens não são possíveis, o veículo se posicionará ao final da fila:

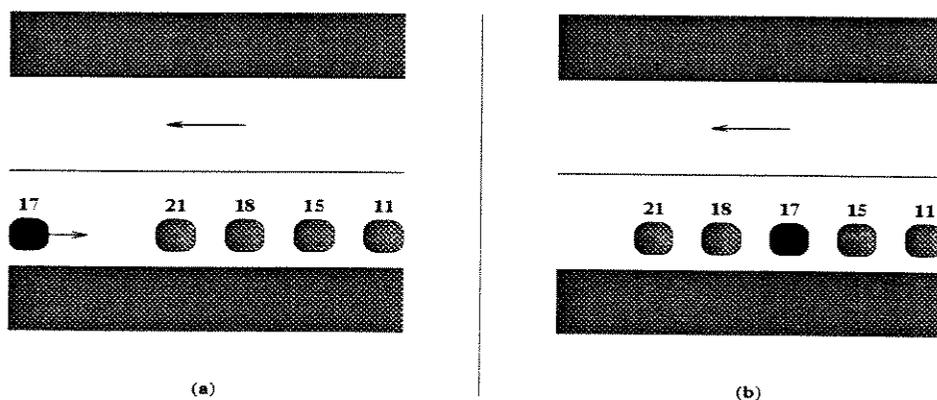


Figura 3.14: posicionamento do veículo na fila com ultrapassagem

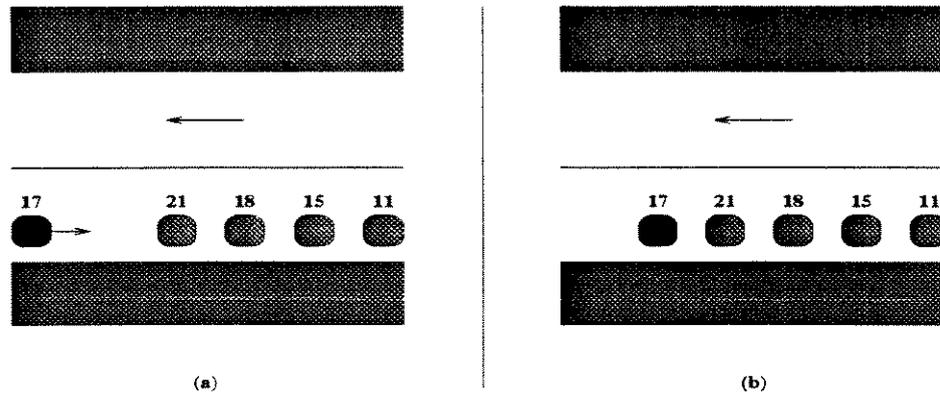


Figura 3.15: posicionamento do veículo na fila sem ultrapassagem

Ao sair de uma via para outra, o veículo se dirigirá a uma faixa-destino. No entanto, ele perde um certo tempo na travessia do cruzamento, e para guardar a informação dos veículos que se dirigem à mesma faixa, os posicionamos na fila virtual da faixa-destino. O SIMTRAF-OPERBUS assume que nos cruzamentos é possível realizar ultrapassagens de veículos, e, portanto, esta fila virtual é ordenada segundo o instante de chegada à faixa-destino. Os veículos que possuírem menores instantes de chegada serão colocados nas primeiras posições desta fila.

Capítulo 4

A SIMULAÇÃO PASSO-A-PASSO

O comportamento dinâmico do sistema é estudado através do acompanhamento dos vários estados do sistema como uma função do tempo, além da coleta e análise de dados estatísticos. Os eventos que mudam o estado do sistema são gerados em diferentes pontos do tempo, e a passagem do tempo é representada por um relógio que é incrementado pelo simulador.

Uma das maneiras de se atualizar o relógio da simulação é através do método de incremento de tempo uniforme, que será discutido neste capítulo.

4.1 CONCEITOS BÁSICOS

A maneira mais simples de controlar o fluxo de tempo em uma simulação é movê-lo para a frente em intervalos de tempo iguais. Tal enfoque é denominado método de incremento fixo do tempo (ou passo-a-passo), de forma que o relógio é atualizado do instante t para $t+\Delta t$, onde Δt é o incremento de tempo fixo.

Esquemáticamente, a simulação passo-a-passo pode ser visualizada da seguinte forma [NEELAMKAVIL, 1988]:

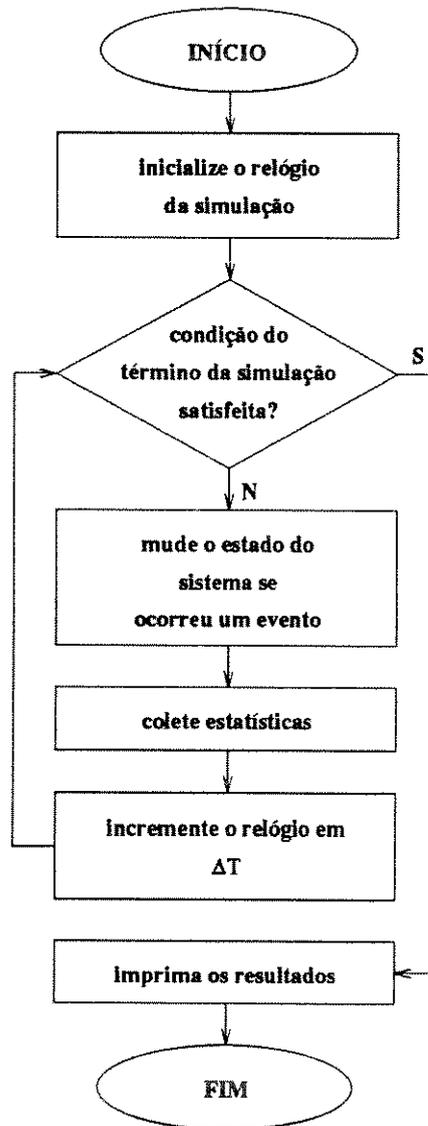


Figura 4.1: esquema simplificado da simulação passo-a-passo

Obviamente, este método detecta os eventos que ocorrem durante o intervalo $(t, t+\Delta t)$ somente no instante $t+\Delta t$, introduzindo erros na simulação. Fica claro que uma decisão sobre o tamanho do incremento deve ser tomada antes que a simulação seja executada. Se Δt for muito grande, então o comportamento do modelo será muito grosseiro, porque será impossível simular algumas das mudanças de estado que ocorrerem. Se, por outro lado, Δt for muito pequeno, então o modelo será freqüentemente examinado desnecessariamente, pois nenhuma mudança é efetuada, provocando tempos computacionais excessivamente longos.

4.2 AS ROTINAS DO MODELO PASSO-A-PASSO

Passamos, a seguir, à descrição das principais rotinas do modelo passo-a-passo.

4.2.1 O Corpo Principal do Modelo

O simulador, sendo do tipo seqüencial, revisa a cada intervalo de tempo Δt os vários eventos tratados no modelo, através dos seguintes testes:

- teste em todos os cruzamentos da rede, para verificar se é o instante de mudança de fase;
- teste em todos os pontos, para verificar se é o instante da chegada de um usuário;
- teste em todas as entradas, para verificar se é o instante de um veículo (leve ou pesado ou ônibus) ser injetado;
- teste em todas as faixas para verificar se é o instante da chegada efetiva de veículo (de uma entrada ou de uma via), e ainda se é o instante da saída de um veículo;

Toda vez que for o instante de ocorrer o evento, passa-se à procura de conflitos e outras incompatibilidades que não permitam a sua realização. Se não houver tais perturbações, o evento é executado, sendo calculado, a seguir, o instante da próxima ocorrência do mesmo.

4.2.2 A Mudança de Fase nos Cruzamentos

O procedimento `MUDANÇA_FASE_CRUZAMENTO` tem como objetivo mudar a fase dos cruzamentos do sistema.

Dentro de um *loop* dos cruzamentos da rede, a rotina verifica inicialmente se é ou não instante de modificar alguma fase do cruzamento em estudo. Caso seja, dentro de um *loop* dos controladores de fase que mudam de estado, a rotina verifica qual é o estado de cada controlador (verde ou vermelho). Caso o estado seja verde, executamos a sua mudança para o vermelho; caso contrário, além de mudar o estado para o verde, para cada faixa que depende do controlador, devemos calcular o instante da próxima saída de veículo, sendo que o valor mínimo será igual ao instante corrente de simulação (`hora_cte`) mais o atraso para o início do escoamento da fila (`ATRASSO_VERDE`). Por fim, calculamos o instante da próxima modificação de fase do cruzamento.

4.2.3 A Injeção de Veículos na Rede

O procedimento `INJEÇÃO_VEÍCULO_LEVE_PESADO` é responsável pelas injeções de veículos leves e pesados nas entradas do sistema.

Dentro de um *loop* das entradas da rede, a rotina inicialmente verifica se é ou não instante de injetar um veículo leve ou pesado pela entrada em estudo. Caso seja, esta rotina cria a entidade veículo através da lista-lixo de veículos ou da alocação dinâmica de memória do computador. A seguir, passamos à caracterização do veículo através dos seus atributos (*número, semente, coeficiente, tipo de veículo, direção, intervalo de aceitação e instante desejado de chegada ao final da via-entrada*) e o veículo determina a faixa onde ele irá trafegar, onde ele será posicionado na fila virtual. Realizamos, então, a chegada efetiva do veículo à faixa da entrada em questão. Por fim, determinamos o instante da próxima injeção de veículo leve ou pesado na entrada, utilizando uma lei de distribuição poissoniana com média horária conhecida.

O procedimento **INJEÇÃO_ÔNIBUS** é responsável pelas injeções de ônibus das linhas nas entradas da rede.

Dentro de um *loop* das entradas da rede, e dentro de um outro *loop* interno das linhas de ônibus de cada entrada, a rotina verifica se é ou não instante de injeção de ônibus da linha em estudo. Caso seja, a rotina cria a entidade veículo através da lista-lixo de veículos ou da alocação dinâmica de memória do computador. A seguir, passamos à caracterização do veículo através dos seus atributos (*número, semente, coeficiente, tipo de veículo, direção, intervalo de aceitação e instante desejado de chegada ao final da via-entrada*) e da caracterização dos atributos adicionais do ônibus (*número da linha, número de passageiros em seu interior*). O veículo determina a faixa onde ele irá trafegar, onde ele será posicionado na fila virtual. Realizamos, então, a chegada efetiva do veículo à faixa da entrada em questão. Por fim, determinamos o instante da próxima injeção de ônibus pela linha na entrada, através do *headway* utilizado pela linha e por uma perturbação aleatória.

4.2.4 A Chegada Efetiva de Veículos às Entradas

O procedimento **CHEGADA_EFETIVA_ENTRADA** tem como objetivo realizar a chegada efetiva de veículos nas entradas do sistema.

Inicialmente, dentro de um *loop* das faixas de cada entrada da rede, a rotina analisa se é ou não instante da entrada efetiva de veículo à rede. Caso seja, se houver lugar na faixa então retiramos o veículo da fila virtual da faixa, calculamos o instante desejado da chegada ao final da via e posicionamos o veículo na fila de veículos da faixa. Se o veículo é o primeiro da fila, então programamos a saída do veículo da faixa.

Caso não haja lugar na faixa, então programamos a próxima chegada efetiva do veículo para o instante dado pela hora corrente de simulação (*hora_cte*) mais o atraso de congestionamento (**ATRASO_CONGESTIONAMENTO**).

4.2.5 A Chegada Efetiva de Veículos nas Faixas

O procedimento **CHEGADA_EFETIVA_FAIXA** tem como objetivo realizar a entrada de veículos nas faixas da rede.

Dentro de um *loop* das faixas do sistema, a rotina inicialmente analisa se é ou não instante da chegada efetiva de um veículo à faixa em estudo. Caso seja, retiramos o veículo da fila virtual da faixa, calculamos o instante desejado da chegada ao final da via e posicionamos o veículo na fila de veículos da faixa. Se o veículo é o primeiro da fila, então programamos a saída do veículo da faixa.

4.2.6 A Saída de Veículos das Faixas

O procedimento **SAÍDA_VEÍCULO_FAIXA** é responsável pela verificação da possibilidade da saída de veículo das faixas da rede.

Dentro de um *loop* das faixas, a rotina verifica se o estado do controlador de fase da faixa está verde. Se for vermelho, calculamos o instante da próxima saída de veículo para o instante dado pela hora corrente de simulação (**hora_cte**) mais o atraso dado para o próximo verde (**ATRASO_VERDE**). Caso seja verde, analisamos a possibilidade de conflitos ou impasses. A transferência propriamente dita ocorrerá no caso de não haver atraso devido a algum conflito ou impasse; caso contrário, este atraso (**ATRASO_CONFLITO**) será incorporado no cálculo do próximo instante de saída do veículo da faixa.

4.2.7 A Transferência de Veículos

O procedimento **TRANSFERIR_VEÍCULO** é responsável pela transferência de um veículo de uma via para outra, ou para uma saída da rede, a partir de uma faixa da via-origem.

Caso o veículo venha a sair da rede, ele é retirado da fila da faixa-origem e é armazenado na lista-lixo de veículos. A seguir, fazemos a programação da próxima saída de veículo da faixa-origem.

Caso a via de destino não se referir a uma saída da rede, determinamos qual será a direção desejada ao final da via-destino, e passamos à escolha da faixa-destino. Se houver lugar na faixa-destino, o veículo é retirado da fila da faixa-origem. Se tal veículo for do tipo ônibus, e este parou em algum ponto da via-origem, realizamos as operações estatísticas de embarque e desembarque de passageiros. Passamos, então, à programação da próxima saída de veículo da faixa-origem, bem como da chegada efetiva do veículo à faixa-destino e posicionamos o veículo na fila virtual da faixa-destino.

Se não houver lugar para o veículo na faixa-destino, atualizamos o instante da próxima saída do veículo da faixa-origem para o instante dado pela hora corrente de simulação (**hora_cte**) mais o atraso de congestionamento (**ATRASO_CONGESTIONAMENTO**).

4.2.8 O Embarque de Passageiros nos Ônibus

O procedimento **EMBARQUE_USUÁRIOS** é responsável pelo embarque de passageiros das linhas de ônibus em cada ponto da rede.

Para todos os elementos da fila que embarcam no ônibus, cada um é retirado da fila de espera do ponto e é depois colocado na lista-lixo de usuário, após a realização dos cálculos estatísticos do desempenho da linha em questão.

4.2.9 A Chegada de Usuários nos Pontos de Ônibus

O procedimento **CHEGADA_USUÁRIO_PONTO** tem como objetivo realizar a chegada dos usuários das linhas nos pontos da rede.

Dentro de um *loop* dos pontos do sistema, e dentro de um segundo *loop* das linhas de cada ponto, a rotina verifica se é ou não instante da chegada de um usuário ao ponto. Caso seja, a rotina cria a entidade usuário através da lista-lixo de usuários ou da alocação dinâmica de memória. A seguir, determinamos os atributos do usuário (*número e instante de chegada*), para assim o colocarmos na fila de espera do ponto, através da política FIFO. Finalmente, calculamos o instante da próxima chegada de usuário ao ponto.

Capítulo 5

A SIMULAÇÃO ORIENTADA A EVENTOS

Pelo motivo que muitos sistemas possuem períodos de “ociosidade” (isto é, períodos onde nada acontece) de tamanhos variáveis, é geralmente preferível utilizar um incremento de tempo variável. Neste caso, o modelo é examinado e atualizado somente nos instantes que é conhecido que uma mudança no estado do sistema está para ocorrer. Estas mudanças de estado do sistema são denominadas eventos, e por causa que o tempo é incrementado de evento para evento, este enfoque é conhecido como a técnica do próximo evento.

5.1 CONCEITOS BÁSICOS

Na simulação orientada a evento, um sistema é modelado pela descrição das mudanças que ocorrem em pontos discretos do tempo, chamados de tempo de evento [SOARES, 1990]. A tarefa do modelador é determinar os eventos que podem causar a mudança no estado do sistema e então desenvolver a lógica associada com cada tipo de evento. A simulação do sistema é produzida pela execução lógica associada a cada evento, em uma seqüência ordenada no tempo.

O conceito de que os eventos acontecem instantaneamente é crucial. Um evento pode iniciar ou terminar uma atividade, mas as mudanças no estado de um modelo são instantâneas, pois o tempo não avança dentro de um evento, e mudanças no estado do sistema só podem ocorrer no tempo de evento. Quando ocorre um evento, o estado do sistema pode mudar de quatro modos, ou por uma combinação destes quatro modos:

- pela alteração do valor de uma ou mais variáveis associadas com a simulação;
- pela alteração do número de entidades presentes no sistema;
- pela alteração do valor designado a um ou mais atributos de uma entidade;
- pela alteração da relação que existe entre entidades, através da manipulação de filas.

Para a simulação orientada a evento, devemos manter um calendário de eventos (lista de eventos futuros), e causar a execução das rotinas adequadas em pontos apropriados do tempo simulado. Cada evento será executado em uma seqüência ordenada, com o tempo simulado sendo avançado de um

evento para o próximo, dentro do calendário de eventos. Esquemáticamente, a simulação a eventos discretos pode ser visualizada da seguinte forma [NEELAMKAVIL, 1988]:

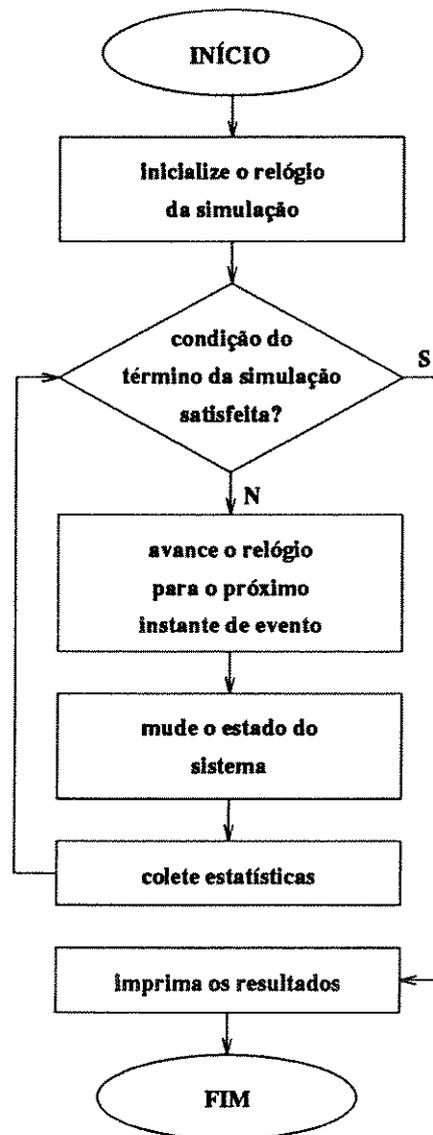


Figura 5.1: esquema simplificado de uma simulação orientada a eventos

5.2 A LISTA DE EVENTOS FUTUROS

Uma simulação orientada a eventos deve executar suas atividades através da utilização de uma lista de eventos, que pode ser considerada como um diário na qual os eventos futuros são escritos. Os eventos são acrescentados e removidos desta lista na medida que a simulação prossegue.

5.2.1 Filas de Prioridade

Nesta seção nós estudaremos uma maneira de estruturar dados que nos permite inserir elementos em um conjunto e também encontrar o maior elemento eficientemente. A estrutura de dados que possibilita realizar ambas operações é denominada fila de prioridade. Muitos algoritmos precisam utilizar filas de prioridade, e, portanto, um modo eficiente de implementar estas operações será muito útil [HOROWITZ, SAHNI, 1978].

Poderíamos primeiramente considerar uma fila simples, desde que a inserção de novos elementos é muito eficiente. No entanto, encontrar o maior elemento necessita uma procura na fila inteira. Uma segunda opção seria utilizar, então, uma lista ordenada que é armazenada seqüencialmente. Mas uma inserção requer mover todos os itens da lista. O que queremos é uma estrutura de dados que permita a realização destas duas operações eficientemente.

Vamos definir, então, um monte (*heap*). Um monte é uma árvore binária completa com a propriedade de que o valor em cada nó é pelo menos tão grande quanto os de seus filhos (se estes existirem). Segundo esta definição, o maior elemento estará na raiz do monte. A relação maior ou igual pode ser revertida, fazendo com que o nó pai possua um valor menor ou igual a de seus filhos. Neste caso, a raiz possuirá o menor elemento.

Podemos representar árvores binárias completas seqüencialmente em um vetor, simplesmente colocando a raiz na posição 1, seus filhos nas posições 2 e 3, os nós do próximo nível nas posições 4, 5, 6 e 7, etc. A representação da árvore da Figura 5.2, por exemplo, será dada por um vetor ilustrado pela Figura 5.3.

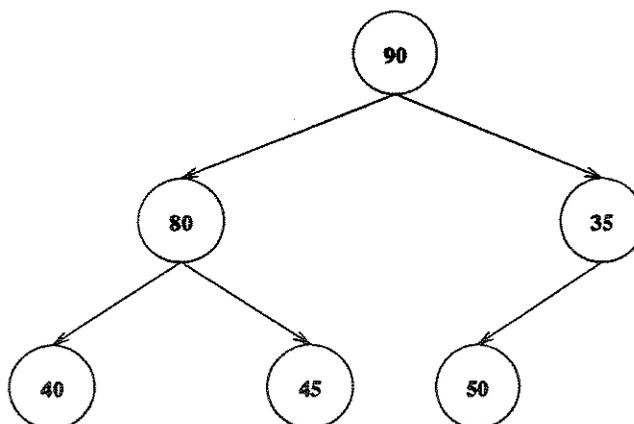


Figura 5.2: exemplo de um monte (*heap*) em uma árvore binária

i	1	2	3	4	5	6
heap[i]	90	80	35	40	45	50

Figura 5.3: representação do monte em um vetor

Esta representação natural é útil porque é muito fácil obter de um nó quem é o seu pai e quem são os seus filhos. O pai do nó da posição j está na posição $\lfloor j/2 \rfloor$, e seus filhos estarão nas posições $2j$ e $2j+1$. Desta forma, percorrer tal árvore é muito mais fácil que percorrer aquela de representação padrão (com arcos).

Algoritmos em Heaps

Os algoritmos de filas de prioridade trabalham primeiro fazendo uma modificação estrutural simples que permite violar a propriedade do monte, para depois ajustá-lo, assegurando que a propriedade é satisfeita em todo o monte.

Vamos assumir que o vetor `heap[.]` possua um único campo (um número inteiro), e que o tamanho atual do monte seja N . Para construirmos um monte, é necessário primeiro implementar a operação de inserção de elementos. Desde que esta operação aumentará o tamanho do monte em uma unidade, N deve ser aumentado. Assim, o registro a ser inserido é colocado em `heap[N]`, mas isto pode violar a propriedade do monte (o novo nó é maior que seu pai). Se a propriedade é violada, então esta violação pode ser reparada trocando o novo nó com seu pai. Isto pode, por sua vez, pode causar uma nova violação e pode ser reparada da mesma forma.

O código para esta operação segue abaixo:

Algoritmo 5.1

Procedimento INSERÇÃO_ELEMENTO (novo_registro)

Inteiro

novo_registro: novo elemento a ser inserido

Início

Inteiros i, j

$N = N + 1$

Se ($N = 1$)

Então

heap[1] = novo_registro

Senão

$i = N$

$j = \lfloor N/2 \rfloor$

Enquanto ($j > 0$) e (heap[j] < novo_registro) *faça*

heap[i] = heap[j]

$i = j$

$j = \lfloor j/2 \rfloor$

FimEnquanto

heap[i] = novo_registro

FimSe

FimProcedimento

A operação de remoção do maior elemento do monte, por sua vez, consiste em retirar o valor contido na raiz, substituindo-o pelo valor armazenado em heap[N], e restabelecer a propriedade do monte. Desde que o monte possuirá um elemento a menos depois da operação, é necessário decrementar N em uma unidade. A implementação da operação de remoção é uma aplicação direta de duas rotinas:

Algoritmo 5.2

Procedimento REARRANJA_HEAP (nmro)

Inteiro

nmro: número da posição do monte a partir do qual se faz o rearranjo

Início

Inteiros i, aux

aux = heap[nmro]

Enquanto (nmro \lfloor N/2 \rfloor) *faça*

i = nmro + nmro

Se (i < N) e (heap[j] < heap[j+1])

Então

i = i + 1

FimSe

Se (aux \geq heap[i])

Então

sair do loop

FimSe

heap[nmro] = heap[i]

nmro = i

FimEnquanto

heap[nmro] = aux

FimProcedimento

Procedimento REMOÇÃO_ELEMENTO

Início

Inteiro aux

aux = heap[1]

heap[1] = heap[N]

N = N - 1

REARRANJA_HEAP (1)

Retorne (aux)

FimProcedimento

5.2.2 A Lista de Eventos Futuros do SIMTRAF-OPERBUS

No SIMTRAF-OPERBUS, a lista de eventos futuros é composta das seguintes informações:

- tipo de evento
- instante da programação do evento na lista
- instante da execução do evento
- índices que identificam quais as entidades envolvidas neste evento

A representação de cada elemento da lista de eventos futuros é feita através da alocação dinâmica de memória do computador (utilização de ponteiros). Analogamente ao caso de veículos e usuários, existe uma lista-lixo de eventos que otimiza o uso dos comandos de alocação e posterior liberação de memória do computador. A lista de eventos futuros é, por sua vez, representada por um vetor de ponteiros para os eventos.

As rotinas de inserção e remoção de elementos da lista podem ser visualizadas pelos Algoritmos 5.3 e 5.4, respectivamente.

Algoritmo 5.3

Procedimento INSERÇÃO_ELEMENTO (novo_registro)

Inteiro

novo_registro: novo elemento a ser inserido

Início

Inteiros i, j

N = N + 1

Se (N = 1)

Então

heap[1] = novo_registro

Senão

i = N

j = $\lfloor N/2 \rfloor$

Enquanto (j > 0) e (heap[j] < novo_registro) faça

heap[i] = heap[j]

i = j

j = $\lfloor j/2 \rfloor$

FimEnquanto

heap[i] = novo_registro

FimSe

FimProcedimento

Algoritmo 5.4

Procedimento REARRANJA_HEAP (nmro)

Inteiro

nmro: número da posição do monte a partir do qual se faz o rearranjo

Início

Inteiros i, aux

aux = heap[nmro]

Enquanto (nmro \lfloor N/2 \rfloor) faça

i = nmro + nmro

Se (i < N) e (heap[j] < heap[j+1])

Então

i = i + 1

FimSe

Se (aux ≤ heap[i])

Então

sair do loop

FimSe

heap[nmro] = heap[i]

nmro = i

FimEnquanto

heap[nmro] = aux

FimProcedimento

Procedimento REMOÇÃO_ELEMENTO

Início

Inteiro aux

aux = heap[1]

heap[1] = heap[N]

N = N - 1

REARRANJA_HEAP (1)

Retorne (aux)

FimProcedimento

5.3 AS ROTINAS DO MODELO ORIENTADO A EVENTOS

Passamos, a seguir, à descrição das principais rotinas do modelo orientado a eventos. As rotinas desempenham papel semelhante do modelo passo-a-passo, mas com uma pequena variante: ao invés de realizar uma procura e testes exaustivos, as rotinas já vem com a informação de quais são as entidades envolvidas em cada evento.

5.3.1 O Corpo Principal do Modelo

O simulador, sendo do tipo orientado a eventos, retira o primeiro elemento da lista de eventos futuros para então procurar conflitos e outras incompatibilidades que não permitam a sua realização. Se não houver tais perturbações, o evento é executado, e passamos à programação da próxima ocorrência do mesmo na lista de eventos futuros.

Nesta operação de remoção do primeiro elemento da lista de eventos futuros, o relógio da simulação é atualizado para o instante dado para a realização do evento.

5.3.2 A Mudança de Fase nos Cruzamentos

O procedimento `MUDANÇA_FASE_CRUZAMENTO` tem como objetivo mudar a fase de um cruzamento dado (`no_crz`).

Dentro de um *loop* dos controladores de fase que mudam de estado, a rotina verifica inicialmente qual é o estado de cada controlador (verde ou vermelho). Caso o estado seja verde, executamos a sua mudança para o vermelho; caso contrário, além de mudar o estado para o verde, para cada faixa que depende do controlador, devemos calcular o instante da próxima saída de veículo, sendo que o valor mínimo será igual ao instante corrente de simulação (`hora_cte`) mais o atraso para o início do escoamento da fila (`ATRASO_VERDE`). Finalmente, calculamos o instante da próxima modificação de fase do cruzamento, e fazemos a sua programação na lista de eventos futuros.

5.3.3 A Injeção de Veículos na Rede

O procedimento `INJEÇÃO_VEÍCULO_LEVE_PESADO` é responsável pelas injeções de veículos leves e pesados em uma entrada dada (`no_ent`).

A rotina inicialmente cria a entidade veículo através da lista-lixo de veículos ou da alocação dinâmica de memória do computador. A seguir, passamos à caracterização do veículo através dos seus atributos (*número, semente, coeficiente, tipo de veículo, direção, intervalo de aceitação e instante desejado de chegada ao final da via-entrada*) e o veículo determina a faixa onde ele irá trafegar, onde ele será posicionado na fila virtual. Realizamos, então, a chegada efetiva do veículo à faixa da entrada em questão.

Por fim, determinamos o instante da próxima injeção de veículo leve ou pesado na entrada, utilizando uma lei de distribuição poissoniana com média horária conhecida, fazendo a sua programação na lista de eventos futuros.

O procedimento `INJEÇÃO_ÔNIBUS` é responsável pelas injeções de ônibus de uma linha fornecida (`no_lna`) em uma entrada dada (`no_ent`).

A rotina inicialmente cria a entidade veículo através da lista-lixo de veículos ou da alocação dinâmica de memória do computador. A seguir, passamos à caracterização do veículo através dos seus atributos (*número, semente, coeficiente, tipo de veículo, direção, intervalo de aceitação e instante desejado de chegada ao final da via-entrada*) e da caracterização dos atributos adicionais do ônibus (*número da linha, número de passageiros em seu interior*). O veículo determina a faixa onde ele irá trafegar, onde ele será posicionado na fila virtual. Realizamos, então, a chegada efetiva do veículo à faixa da entrada em questão.

Por fim, determinamos o instante da próxima injeção de ônibus pela linha na entrada, através do *headway* utilizando pela linha e por uma perturbação aleatória, fazendo a programação na lista de eventos futuros.

5.3.4 A Chegada Efetiva de Veículos às Entradas

O procedimento `CHEGADA_EFETIVA_ENTRADA` tem como objetivo realizar a chegada efetiva de um veículo à faixa da entrada dada (`no_fxa`).

Se há lugar na faixa então retiramos o veículo da fila virtual da faixa, calculamos o instante desejado da chegada ao final da via e posicionamos o veículo na fila de veículos da faixa. Se o veículo é o primeiro da fila, então programamos a saída do veículo da faixa na lista de eventos futuros.

Caso não haja lugar na faixa, então programamos a próxima chegada efetiva do veículo na entrada na lista de eventos futuros para o instante dado pelo instante corrente de simulação (`hora_cte`) mais o atraso de congestionamento (`ATRASO_CONGESTIONAMENTO`).

5.3.5 A Chegada Efetiva de Veículos nas Faixas

O procedimento `CHEGADA_EFETIVA_FAIXA` tem como objetivo realizar a entrada de um veículo a uma faixa dada (`no_fxa`).

Retiramos o veículo da fila virtual da faixa, calculamos o instante desejado da chegada ao final da via e posicionamos o veículo na fila de veículos da faixa. Se o veículo é o primeiro da fila, então programamos a saída do veículo da faixa na lista de eventos futuros.

5.3.6 A Saída de Veículos das Faixas

O procedimento `SAÍDA_VEÍCULO_FAIXA` é responsável pela verificação da possibilidade da saída de veículo de uma faixa dada (`no_fxa`).

A rotina verifica se o estado do controlador de fase da faixa está verde. Se for vermelho, calculamos o instante da próxima saída de veículo para o instante dado pela hora corrente de simulação (*hora_cte*) mais o atraso dado para o próximo verde (**ATRASO_VERDE**). Caso seja verde, analisamos a possibilidade de conflitos ou impasses. A transferência propriamente dita ocorrerá na caso de não haver atraso devido a algum conflito ou impasse; caso contrário, este atraso (**ATRASO_CONFLITO**) será incorporado no cálculo do próximo instante de saída do veículo da faixa, e devidamente programado na lista de eventos futuros.

5.3.7 A Transferência de Veículos

O procedimento **TRANSFERIR_VEÍCULO** é responsável pela transferência de um veículo de uma via para outra (*no_via*), ou para uma saída da rede, a partir de uma faixa da via de origem (*no_fxa_org*).

Caso o veículo venha a sair da rede, ele é retirado da fila da faixa-origem e é armazenado na lista-lixo de veículos. A seguir, fazemos o cálculo da próxima saída de veículo da faixa-origem e a sua devida programação na lista de eventos futuros.

Caso a via de destino não se referir a uma saída da rede, determinamos qual será a direção desejada ao final da via-destino, e passamos à escolha da faixa-destino. Se houver lugar na faixa-destino, o veículo é retirado da fila da faixa-origem. Se tal veículo for do tipo ônibus, e este parou em algum ponto da via-origem, realizamos as operações estatísticas de embarque e desembarque de passageiros. Passamos, então, à programação da próxima saída de veículo da faixa-origem na lista de eventos futuros, bem como da chegada efetiva do veículo à faixa-destino. Por fim, posicionamos o veículo na fila virtual da faixa-destino.

Se não houver lugar para o veículo na faixa-destino, atualizamos o instante da próxima saída do veículo da faixa-origem na lista de eventos futuros para o instante dado pela hora corrente de simulação (*hora_cte*) mais o atraso de congestionamento (**ATRASO_CONGESTIONAMENTO**).

5.3.8 O Embarque de Passageiros nos Ônibus

O procedimento **EMBARQUE_USUÁRIOS** é responsável pelo embarque de passageiros de uma linha de um ponto dados (*no_lna_pto*, *no_pto*).

Para todos os elementos da fila que embarcam no ônibus, cada um é retirado da fila de espera do ponto e é depois colocado na lista-lixo de usuário, após a realização dos cálculos estatísticos do desempenho da linha em questão.

5.3.9 A Chegada de Usuários nos Pontos de Ônibus

O procedimento `CHEGADA_USUÁRIO_PONTO` tem como objetivo realizar a chegada de um usuário de uma linha em um ponto dados (`no_lna_pto`, `no_pto`).

A rotina inicialmente cria a entidade usuário através da lista-lixo de usuários ou da alocação dinâmica de memória. A seguir, determinamos os atributos do usuário (*número e instante de chegada*), para assim o colocarmos na fila de espera do ponto, através da política FIFO.

Finalmente, calculamos o instante da próxima chegada de usuário ao ponto, e fazemos sua programação na lista de eventos futuros.

Capítulo 6

RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Como fase final deste trabalho foi feita uma análise de sensibilidade do modelo desenvolvido, com o objetivo de verificar seu comportamento diante de alterações das variáveis envolvidas na operação do sistema simulado e de testar sua eficiência e flexibilidade na reprodução de diferentes situações.

O propósito desta análise é o desenvolvimento de uma série de simulações para diferentes combinações entre todas as variáveis envolvidas, mantendo fixas algumas delas e fazendo variar aquelas de maior influência no desempenho operacional do sistema, para finalmente proceder a uma avaliação dos resultados obtidos.

Como não houve possibilidade de aplicação do modelo a um estudo de caso em decorrência da falta dos dados necessários, não foi possível comparar os resultados das simulações a valores observados no sistema real. Portanto, as informações aqui obtidas foram avaliadas através do bom senso, acompanhando a evolução do sistema e comparando os resultados com valores normalmente verificados na prática. Não realizamos o estudo do intervalo de confiança [PRITSKER, 1986] nos diversos cenários simulados.

Os modelos apresentados foram implementados em linguagem C e os testes foram realizados em uma estação de trabalho SUN, modelo SPARCstation1+.

6.1 DESCRIÇÃO DO EXEMPLO

Para verificar a lógica do modelo, foi feita uma simulação de uma rede viária urbana fictícia composta por 37 vias e 14 cruzamentos, que é ilustrada pela Figura 6.1:

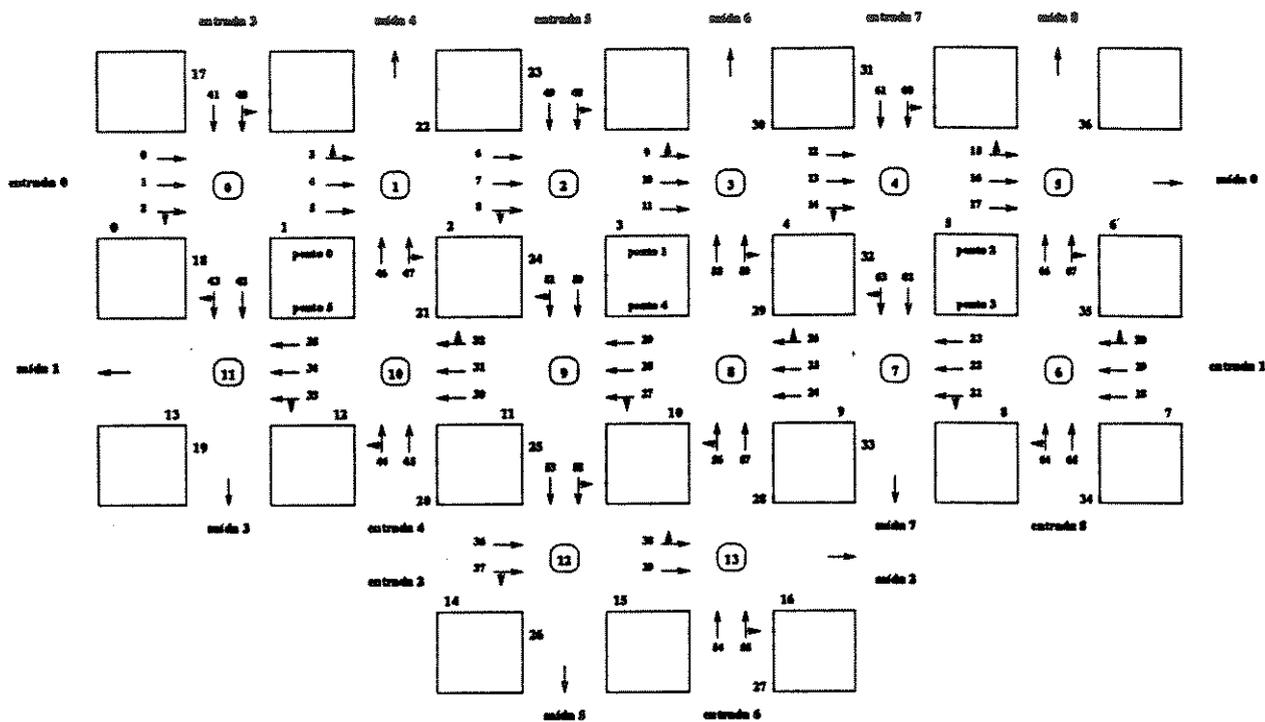


Figura 6.1: a rede viária urbana utilizada para os testes

6.1.1 Os Cruzamentos

Todos os 14 cruzamentos da rede são semaforizados e seguem a mesma política de controle de fases, com ciclo de 100 segundos. O tempo de verde para as vias dos corredores é de 50 segundos e o tempo de verde para as vias das transversais é de 44 segundos. Não existe defasagem inicial da tabela de seqüências.

6.1.2 As Entradas

As entradas dos corredores principais (entradas 0 e 1) possuem uma taxa de injeção de veículos igual a 900 veículos/hora. A entrada 2 possui uma taxa igual a 600 veículos/hora e as demais, uma taxa de injeção igual a 500 veículos/hora. A taxa de composição dos veículos em todas as entradas é de 100% de veículos leves.

6.1.3 As Vias

Todas as vias da rede possuem 100 metros de comprimento e a mesma penalização-extra para a escolha da faixa de circulação, igual a 1,50.

A Tabela 6.1 expressa os valores das velocidades nas vias:

	VELOCIDADE MÉDIA	DESVIO PADRÃO
veículos leves	50 km/h	5 km/h
veículos pesados e ônibus	40 km/h	5 km/h

Tabela 6.1: média e desvio-padrão da velocidades dos veículos nas vias

A Tabela 6.2 mostra os valores assumidos para os tempos de escoamento das filas de veículos:

	INÍCIO DA DESTRUÇÃO DA FILA	DESVIO-PADRÃO (2 VEÍCULOS CONSECUTIVOS)
veículos leves	2 segundos	0.5 segundo
veículos pesados e ônibus	3 segundos	0.5 segundo

Tabela 6.2: tempos de escoamento das filas de veículos das vias

A Tabela 6.3 mostra as taxas de conversões dos veículos leves e pesados nas vias da rede:

VIAS	CONVERSÃO	ESQUERDA	FRENTE	DIREITA
corredores	direita	0%	80%	20%
	esquerda	20%	80%	0%
transversais	direita	0%	50%	50%
	esquerda	50%	50%	0%

Tabela 6.3: taxas percentuais de conversões nas vias

6.1.4 As Faixas

Todas as faixas das vias possuem 3 metros de largura e um fluxo de saturação igual a 1.800 veículos/hora. Não há segregação da circulação de veículos.

6.1.5 As Linhas de Ônibus

Nesta rede trabalhamos com 6 linhas de ônibus, sendo que 3 linhas injetam os veículos pela entrada 0 (linhas 0, 1 e 2) e as demais injetam seus veículos pela entrada 1 (linhas 3, 4 e 5), cada um com carga inicial entre 40 e 50 passageiros. Os ônibus percorrem cada corredor, atendendo todos os seus pontos, que possuem uma taxa de chegada de passageiros igual a 50 passageiros/hora para cada linha. O headway adotado é igual a 10 minutos.

6.1.6 Os Ônibus

Escolhemos um único tipo de ônibus para o estudo da rede, com 10 metros de comprimento, capacidade máxima igual a 100 passageiros e fator de aceleração e desaceleração igual a 10 segundos. O tempo médio de embarque por passageiro é de 3 segundos e o de desembarque é igual a 2 segundos.

6.2 TESTES REALIZADOS

A rede da Figura 6.1 (rede básica) foi implementada e testada inicialmente em duas etapas:

- na simulação passo-a-passo
- na simulação orientada a eventos

Os parâmetros utilizados pelo simulador para os tempos de observação do modelo foram:

- período de aquecimento (enchimento) = 15 minutos
- período efetivo de simulação e coleta de dados = 60 minutos

Para cada teste realizado executamos um total de 5 simulações para tirarmos uma média geral de cada cenário. As sementes iniciais de cada simulação são dadas pela Tabela 6.4:

SIMULAÇÃO	GERAL	USUÁRIOS	VEÍCULOS	LINHAS
1	2.460.099	2.762.613	3.826.097	397.306
2	328.120	327.991	550.046	552.273
3	5.754.990	5.712.391	7.415.270	312.730
4	313.549	521.105	2.018.180	334.849
5	531.138	324.591	7.324.652	89.658

Tabela 6.4: tabela das sementes utilizadas em cada simulação de cada cenário

6.2.1 Resultados da Rede Básica

Com o propósito de comparar o desempenho dos dois modelos desenvolvidos neste trabalho, testes computacionais foram realizados em um mesmo exemplo, o da rede básica. Algumas variáveis que medem o desempenho foram selecionadas, cujos valores podem ser vistos nas Tabelas 6.5 a 6.8.

	EVENTOS	PASSO-A-PASSO	% DIFERENÇA
tempo execução (seg.)	22,66	25,93	+14,43%

Tabela 6.5: tabelas dos tempos médios de execução (eventos x passo-a-passo)

GERAÇÃO MÉDIA	EVENTOS	PASSO-A-PASSO	% DIFERENÇA
usuários	900,60	899,00	-0,18%
veículos leves	5.449,00	5.326,00	-2,26%
ônibus	36,40	36,40	0,00%

Tabela 6.6: tabela da geração média de entidades (eventos x passo-a-passo)

ATRASOS MÉDIOS		EVENTOS	PASSO-A-PASSO	% DIFERENÇA
total veículos (seg.)		275.296,24	271.577,80	-1,35%
veículos leves	total (seg.)	270.641,44	266.884,00	-1,39%
	médio (seg/veíc)	49,73	50,17	+0,88%
ônibus	total (seg.)	4.654,81	4.689,80	+0,75%
	médio (seg/veíc)	129,28	130,24	+0,74%

Tabela 6.7: tabela dos atrasos dos veículos (eventos x passo-a-passo)

TEMPO MÉDIO DE VIAGEM (SEG/VEÍC)	ENTRADA	SAÍDA	EVENTOS	PASSO-A-PASSO	% DIFERENÇA
veículos leves	0	0	116,55	120,93	+3,76
	1	1	119,19	122,77	+3,00
	2	2	39,62	39,85	+0,58
	3	3	48,90	49,54	+1,31
	4	4	43,60	44,88	+2,93
	5	5	62,33	67,10	+7,65
	6	6	63,28	67,11	+6,05
	7	7	44,29	45,00	+1,60
	8	8	48,01	48,33	+0,67
ônibus	0	0	305,05	304,68	-0,12
	1	1	303,14	307,12	+1,31

Tabela 6.8: tabela dos tempos médios de viagens (eventos x passo-a-passo)

Como anteriormente previsto no Capítulo 4, o modelo passo-a-passo foi mais lento do que o modelo orientado a eventos. Isto se deve ao fato que a cada iteração do modelo passo-a-passo são

realizados testes em cada entidade envolvida para verificar se é ou não instante de ocorrer um determinado evento.

Quanto à qualidade das soluções obtidas, verificamos que, para o exemplo em questão, o modelo passo-a-passo apresentou um desempenho semelhante ao modelo orientado a eventos. Como o modelo passo-a-passo trabalha em pontos discretos do tempo, é de se esperar que o número de entidades temporárias geradas seja menor que o modelo orientado a eventos, como observado na Tabela 6.8. Se o fluxo de entrada das entidades for muito grande, esta diferença pode ser sensível, caso a revisão dos eventos seja feita a intervalos grandes. Com o intuito de amenizar tal efeito, adotamos neste modelo um intervalo igual a 0,25 segundo.

6.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Esta seção está dedicada a uma análise de sensibilidade do modelo orientado a eventos em relação a alguns parâmetros. Será analisado o comportamento dos valores das variáveis mais significantes em cada caso. Seis cenários foram selecionados para esta análise de sensibilidade. Suas características são descritas logo abaixo.

Cenário 1

Aumento na taxa de injeção de veículos nas entradas dos corredores principais.

- Caso A: 1.350 veículos/hora (+50%)
- Caso B: 1.575 veículos/hora (+75%)
- Caso C: 1.800 veículos/hora (+100%)

Cenário 2

Alteração na taxa de composição de veículos nas entradas.

- Caso A: 80% veículos leves, 20% veículos pesados
- Caso B: 90% veículos leves, 10% veículos pesados
- Caso C: 95% veículos leves, 5% veículos pesados

Cenário 3

Operação com faixas exclusivas para ônibus nas vias dos corredores principais, com aumento na taxa de injeção de veículos nas entradas dos mesmos.

- Caso A: 900 veículos/hora (+0%)
- Caso B: 1.350 veículos/hora (+50%)
- Caso C: 1.575 veículos/hora (+75%)
- Caso D: 1.800 veículos/hora (+100%)

Cenário 4

Alteração na demanda de passageiros nos pontos de ônibus.

- Caso A: 40 passageiros/hora (-20%)
- Caso B: 60 passageiros/hora (+20%)
- Caso C: 80 passageiros/hora (+60%)
- Caso D: 100 passageiros/hora (+100%)

Cenário 5

Alteração do *headway* das linhas de ônibus 0 e 3.

- Caso A: 5 minutos (-50%)
- Caso B: 20 minutos (+100%)
- Caso C: 30 minutos (+200%)

Cenário 6

Alteração na política dos semáforos: repartição dos tempos de verde segundo o fluxo de veículos. Assim, mantendo o mesmo ciclo (100 segundos) e o mesmo período de entre-verdes (6 segundos), temos que o tempo de verde para as vias dos corredores principais é de 61 segundos e para as vias do corredor secundário é de 51 segundos.

- Caso A: sem defasagem inicial

- Caso B: com onda verde no corredor central (com defasagens correspondentes ao intervalo de tempo de percurso de um cruzamento para outro)
- Caso C: com política errada no corredor central (com impedimentos variados)

6.3.1 Resultados Obtidos

Os Tempos de Simulação

Notamos dos cenários propostos que o modelo levou maior tempo de execução nos casos em que há uma maior taxa de injeção de veículos (cenários 1 e 3), e que para os demais, o tempo se manteve constante. A sensibilidade ao maior número de veículos na rede tem como explicação o maior número de execução de testes e armazenamento de informações na lista de eventos futuros. A Tabela 6.9 mostra os tempos médios de execução obtidos para cada cenário e a Tabela 6.10 mostra o percentual com relação ao tempo médio obtido pela rede básica.

Os Atrasos dos Veículos

As Tabelas 6.11 e 6.12 mostram os atrasos sofridos pelos veículos em cada cenário proposto. Notamos que há uma sensível redução dos tempos de atraso quando uma adequada política de semaforização é colocada em prática, através do cálculo de repartição dos tempos de verde e vermelho para cada fase dos cruzamentos.

Os Tempos de Percurso nos Corredores

As Tabelas 6.13 e 6.14 mostram o desempenho dos veículos nos corredores principais da rede. Como na análise dos tempos de atraso, melhor performance foi obtida nos casos em que há uma apropriada distribuição dos tempos de verde para cada fase dos cruzamentos (ver análise do cenário 6). Além disso, pode-se melhorar ou piorar os tempos de deslocamento de veículos em um determinado corredor aplicando-se defasagens para o início de verde em cada cruzamento. Um outro importante fator que altera substancialmente os tempos de viagens é o número de faixas de circulação de veículos. Nos casos em que houve a segregação de faixas para a circulação de ônibus, tirando uma faixa de cada via dos corredores, as faixas restantes ficaram mais carregadas.

Das análises realizadas sobre o deslocamento dos ônibus nos corredores, podemos constatar que dois motivos adicionais contribuem para a diminuição dos tempos de percurso. O primeiro deles (cenário 5, caso A) é a diminuição do *headway* adotado por cada linha. Assim, os ônibus gastam menos tempo parados nos pontos para o embarque e desembarque de passageiros, dado o aumento da oferta (ver análise da situação 5). Um segundo motivo é a diminuição da demanda nos pontos de parada (cenário 4, caso A).

CENÁRIO		TEMPO DE EXECUÇÃO (SEGUNDOS)
rede básica		22,66
1	caso a	26,59
	caso b	28,77
	caso c	30,93
2	caso a	22,16
	caso b	22,67
	caso c	23,09
3	caso a	21,76
	caso b	26,00
	caso c	28,03
	caso d	30,09
4	caso a	22,32
	caso b	22,82
	caso c	22,89
	caso d	23,03
5	caso a	22,53
	caso b	22,34
	caso c	22,53
6	caso a	22,45
	caso b	22,54
	caso c	22,51

Tabela 6.9: tabela dos tempos médios de simulação do programa

CENÁRIO		% DIFERENÇA
rede básica		0,00
1	caso a	+17,34
	caso b	+26,96
	caso c	+36,50
2	caso a	-2,21
	caso b	+0,04
	caso c	+1,90
3	caso a	-3,97
	caso b	+14,74
	caso c	+23,70
	caso d	+32,79
4	caso a	-1,50
	caso b	+0,71
	caso c	+1,01
	caso d	+1,63
5	caso a	-0,57
	caso b	-1,41
	caso c	-0,57
6	caso a	-0,93
	caso b	-0,53
	caso c	-0,66

Tabela 6.10: tabela percentual comparativa dos tempos médios de simulação dos testes

ATRASOS (SEGUNDOS)	TOTAL	VEÍCULOS LEVES		VEÍCULOS PESADOS		ÔNIBUS		
		TOTAL	MÉDIO	TOTAL	MÉDIO	TOTAL	MÉDIO	
rede básica	275.296,24	270.641,44	49,73	-	-	4.654,81	129,28	
1	caso a	343.635,25	338.848,58	53,09	-	-	4.786,66	132,23
	caso b	379.052,54	374.195,26	54,74	-	-	4.857,28	133,46
	caso c	417.210,03	412.320,83	56,63	-	-	4.889,19	135,81
2	caso a	280.495,28	219.580,58	50,51	56.223,36	51,32	4.691,34	130,30
	caso b	278.482,98	245.280,41	50,16	28.501,20	51,46	4.701,37	130,56
	caso c	276.902,86	257.969,41	49,96	14.210,00	50,97	4.723,46	131,20
3	caso a	284.168,94	279.438,67	51,34	-	-	4.730,27	131,33
	caso b	363.606,23	358.848,36	56,21	-	-	4.757,87	132,09
	caso c	407.679,00	402.756,11	59,19	-	-	4.922,89	135,80
	caso d	476.762,81	471.872,62	65,22	-	-	4.890,20	134,89
4	caso a	274.902,57	270.471,64	53,09	-	-	4.430,93	132,23
	caso b	275.224,90	270.799,68	49,76	-	-	4.425,22	122,87
	caso c	274.119,74	270.608,43	49,72	-	-	3.511,31	96,99
	caso d	272.998,06	270.504,33	49,71	-	-	2.493,74	68,88
5	caso a	276.780,67	271.074,67	49,80	-	-	5.705,99	117,40
	caso b	273.784,94	270.316,88	49,67	-	-	3.468,07	114,83
	caso c	273.787,09	270.429,63	49,69	-	-	3.357,46	118,21
6	caso a	256.005,97	253.537,79	46,57	-	-	2.468,18	67,81
	caso b	290.251,71	288.125,76	52,89	-	-	2.125,95	58,36
	caso c	358.744,36	355.892,70	65,34	-	-	2.851,66	79,62

Tabela 6.11: tabela dos tempos de atrasos dos veículos nos testes efetuados

ATRASOS (% DIFERENÇA)		TOTAL	VEÍCULOS LEVES		ÔNIBUS	
			TOTAL	MÉDIO	TOTAL	MÉDIO
rede básica		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	caso a	+24,82	+25,20	+6,76	+2,83	+2,28
	caso b	+37,69	+38,26	+10,07	+4,35	+3,23
	caso c	+51,55	+52,35	+13,87	+5,03	+5,05
2	caso a	+1,89	-18,87	+1,57	+0,78	+0,79
	caso b	+1,16	-9,37	+0,86	+1,00	+0,99
	caso c	+0,58	-4,68	+0,46	+1,47	+1,48
3	caso a	+3,22	+3,25	+3,24	+1,62	+1,58
	caso b	+32,08	+32,59	+13,03	+2,21	+2,17
	caso c	+48,09	+48,81	+19,02	+5,76	+5,04
	caso d	+73,18	+74,35	+31,15	+5,06	+4,34
4	caso a	-0,14	-0,06	+6,76	-4,81	+2,28
	caso b	-0,02	+0,06	+0,06	-4,93	-4,96
	caso c	-0,43	-0,01	-0,02	-24,56	-24,98
	caso d	-0,83	-0,05	-0,04	-46,43	-46,72
5	caso a	+0,54	+0,16	+0,14	+22,58	-9,19
	caso b	-0,55	-0,12	-0,12	-25,49	-11,18
	caso c	-0,55	-0,08	-0,08	-27,87	-8,56
6	caso a	-7,01	-6,32	-6,76	-46,97	-47,55
	caso b	+5,43	+6,46	+6,35	-54,33	-54,86
	caso c	+30,31	+31,50	+31,39	-38,74	-38,41

Tabela 6.12: tabela percentual comparativa dos tempos de atraso

TEMPO VIAGEM CORREDORES (SEGUNDOS)		VEÍCULOS LEVES		VEÍCULOS PESADOS		ÔNIBUS	
		1	2	1	2	1	2
rede básica		116,55	119,19	-	-	305,05	303,14
1	caso a	121,71	123,66	-	-	305,68	308,89
	caso b	123,57	125,05	-	-	307,01	310,80
	caso c	126,29	126,80	-	-	306,66	315,65
2	caso a	116,90	120,41	145,66	145,46	304,62	305,72
	caso b	116,65	120,39	147,61	145,31	305,85	304,46
	caso c	115,99	119,78	148,84	148,25	305,20	306,36
3	caso a	120,75	123,30	-	-	306,00	305,58
	caso b	127,66	129,99	-	-	306,11	306,91
	caso c	132,10	134,46	-	-	307,77	311,43
	caso d	142,61	144,24	-	-	306,96	311,00
4	caso a	116,22	119,47	-	-	281,08	283,24
	caso b	116,63	119,52	-	-	312,15	311,47
	caso c	116,74	119,35	-	-	315,45	311,84
	caso d	116,94	119,16	-	-	320,29	316,56
5	caso a	117,11	119,53	-	-	275,90	271,96
	caso b	116,44	118,75	-	-	304,46	306,09
	caso c	116,87	119,14	-	-	309,36	306,15
6	caso a	84,43	87,43	-	-	248,58	238,46
	caso b	84,90	76,47	-	-	248,51	219,28
	caso c	83,99	246,07	-	-	248,38	258,91

Tabela 6.13: tabela dos tempos médios de viagem nos corredores

TEMPO VIAGEM (% DIFERENÇA)		VEÍCULOS LEVES		ÔNIBUS	
		1	2	1	2
rede básica		0,00	0,00	0,00	0,00
1	caso a	+4,43	+3,75	+0,21	+1,90
	caso b	+6,02	+4,92	+0,64	+2,53
	caso c	+8,36	+6,38	+0,53	+4,13
2	caso a	+0,30	+1,02	-0,14	+0,85
	caso b	+0,08	+1,01	+0,26	+0,43
	caso c	-0,48	+0,49	+0,49	+1,06
3	caso a	+3,60	+3,45	+0,31	+0,80
	caso b	+9,53	+9,06	+0,35	+1,24
	caso c	+13,34	+12,81	+0,89	+2,73
	caso d	+22,36	+21,02	+0,63	+2,59
4	caso a	-0,28	+0,23	-7,86	-6,56
	caso b	+0,07	+0,28	+2,33	+2,75
	caso c	+0,16	+0,13	+3,41	+2,87
	caso d	+0,33	-0,02	+4,99	+4,43
5	caso a	+0,48	+0,28	-9,55	-10,28
	caso b	-0,09	-0,37	-0,19	+0,97
	caso c	+0,27	-0,04	+1,41	+0,99
6	caso a	-27,56	-26,65	-18,51	-21,34
	caso b	-27,15	-35,84	-18,53	-27,66
	caso c	-27,94	+106,45	-18,58	-14,59

Tabela 6.14: tabela percentual comparativa dos tempos médios de viagem nos corredores

Comentários sobre o Cenário 1

O cenário 1 foi criado com o propósito de avaliar o comportamento do modelo diante o aumento das taxas de injeções de veículos nas entradas dos corredores principais (entradas 0 e 1).

A principal característica deste cenário foi o aumento do tempo médio de execução do modelo (Tabelas 6.9 e 6.10). O mesmo fato ocorreu no cenário 3, nos casos B, C e D, mas com taxas pouco inferiores, devido à particularidade de segregação de faixas, pois menos testes são analisados.

O aumento do número de veículos na rede com o aumento das taxas de injeções de veículos nas entradas dos corredores principais pode ser visualizada pela Tabela 6.15:

REDE BÁSICA	CENÁRIO 1 CASO A		CENÁRIO 1 CASO B		CENÁRIO 1 CASO C	
	VALOR	% DIFERENÇA	VALOR	% DIFERENÇA	VALOR	% DIFERENÇA
5.449,0	6.390,40	+17,28	6.839,60	+25,52	7.291,60	+33,81

Tabela 6.15: tabela comparativa do número médio de injeções de veículos na rede

Comentários sobre o Cenário 2

O cenário 2 foi construído tendo como objetivo avaliar o comportamento das variáveis do modelo frente à alteração das taxas de composição de veículos nas entradas da rede.

Comentários sobre o Cenário 3

O cenário 3 tem como objetivo analisar a viabilidade da implantação de faixas exclusivas para ônibus nas vias dos corredores principais.

É importante observar que nestas faixas não são permitidas ultrapassagens de veículos. É permitida apenas a circulação de ônibus de transporte coletivo e de outros veículos com conversão à esquerda ou à direita.

Notamos que os atrasos dos veículos leves foram muito sensíveis quanto à implantação de tais faixas, como mostrado nas Tabelas 6.16 e 6.17. A eliminação de uma faixa de circulação dos veículos leves foi um fator determinante para tal situação.

No entanto, o mesmo não aconteceu para os ônibus. Poderíamos, à princípio, imaginar que a presença de faixas exclusivas para a circulação de ônibus deveria levar a melhores desempenhos. Há uma série de fatores que levaram a um fraco desempenho de tal segregação:

- a impossibilidade de ultrapassagens nestas faixas
- a pequena dimensão do corredor simulado
- o pequeno número de ônibus em circulação

Para a implantação eficiente de corredores para os ônibus, sugere-se a presença de baias, que são utilizadas para a ultrapassagens de ônibus nos pontos de parada. Além disso, é recomendada a presença de um número suficiente de faixas para a circulação apropriada dos veículos não-priorizados.

Nos testes efetuados para o caso C e D, utilizando o segundo conjunto de sementes, tivemos o caso de falta de memória do computador. Isto pode ser justificado pelo congestionamento da faixas 21 e 22 (para o Caso C) e das faixas 18, 19, 21 e 22 (para o Caso D), informações obtidas pela execução do modelo passo-a-passo. Para efeito de comparação com o caso da não-segregação de faixas, somente os outros quatro resultados foram levados em consideração. Este fato é um alerta na qual os casos C e D estão sujeitos a possíveis congestionamentos.

ATRASOS: % DIFERENÇA COM E SEM SEGREGAÇÃO		900 VEÍC/H	1.350 VEÍC/H	1.575 VEÍC/H	1.800 VEÍC/H
total		+3,22	+5,81	+8,32	+15,62
veículos leves	total	+3,25	+5,90	+8,07	+15,83
	médio	+3,24	+5,88	+8,41	+15,72
ônibus	total	+1,62	-4,40	-0,24	-1,06
	médio	+1,58	-1,06	+0,41	-1,75

Tabela 6.16 : tabela percentual comparativa dos atrasos de veículos

TEMPOS VIAGEM %DIFERENÇACOM E SEM SEGREGAÇÃO		900 VEÍC/H	1.350 VEÍC/H	1.575 VEÍC/H	1.800 VEÍC/H
veículos leves	corredor 1	+3,60	+4,89	+7,19	+13,25
	corredor 2	+3,45	+5,12	+7,06	+13,69
ônibus	corredor 1	+0,31	+0,14	+0,15	+0,28
	corredor 2	+0,80	-0,64	-0,37	-1,99

Tabela 6.17: tabela percentual comparativa dos tempos de viagem nos corredores principais

Comentários sobre o Cenário 4

O cenário 4 tem como objetivo analisar o desempenho dos ônibus quando as demandas nos pontos de parada são alteradas.

Pelos dados das Tabelas 6.13 e 6.14, notamos que a menor demanda nos pontos melhorou os tempos de percurso dos ônibus nos corredores. Por outro lado, na medida que a demanda foi crescendo, maior foi o tempo de deslocamento, pois maior foi o tempo parado nos pontos de ônibus. Com a variação da demanda em todos os pontos de parada, o volume de passageiros transportados também variou proporcionalmente. A Tabela 6.18 mostra os resultados obtidos para a carga de passageiros transportada. Nos casos C e D foi também observada uma demanda não-atendida (demanda recusada).

ÍNDICE DAS LINHAS	REDE BÁSICA	CENÁRIO 4 CASO A		CENÁRIO 4 CASO B		CENÁRIO 4 CASO C		CENÁRIO 4 CASO D	
		VALOR	% DIFE- RENÇA						
0	157,60	125,40	-20,43	185,00	+17,38	236,20	+49,87	297,60	+88,83
1	157,00	123,60	-21,27	183,40	+16,81	247,40	+57,58	315,60	+101,02
2	153,40	121,80	-20,60	181,00	+17,99	240,00	+56,45	301,80	+96,74
3	148,60	124,60	-16,15	180,60	+21,53	237,40	+59,76	300,40	+102,15
4	155,40	125,40	-19,30	188,00	+20,98	250,20	+61,00	309,80	+99,36
5	155,00	125,60	-18,97	182,40	+17,68	242,80	+56,64	306,80	+97,93

Tabela 6.18: tabela comparativa do número de passageiros transportados pelas linhas

Comentários sobre o Cenário 5

O cenário 5 foi construído para avaliar o desempenho das linhas quando a oferta de ônibus é alterada.

Pelos dados das Tabelas 6.19 e 6.20 podemos verificar que quanto maior a oferta de ônibus, menores são os tempos de espera nos pontos de parada, e vice-versa. Para o caso C foi detectada uma demanda não atendida (recusada) nos pontos. O número médio de usuários recusados ficou em 45,20 para a linha 0 e 42,20 para a linha 3, para uma oferta de dois ônibus por hora para cada linha. Além disso, o número de usuários atendidos foi cerca de 17% menor que aquele atendido pela rede básica.

Os tempos médios de viagem dos ônibus nos corredores variam de acordo com a oferta. Quanto menor o *headway* (maior a oferta), menores são os tempos médios de percurso nos corredores, pois menos tempo é gasto nos pontos de parada.

ÍNDICE DA LINHA	NÚMERO DO PONTO	REDE BÁSICA	CENÁRIO 5 CASO A		CENÁRIO 5 CASO B		CENÁRIO 5 CASO C	
			VALOR	% DIFERENÇA	VALOR	% DIFERENÇA	VALOR	% DIFERENÇA
0	0	463,47	252,67	-45,48	762,25	+64,46	1.080,56	+133,14
	1	434,71	250,97	-42,27	772,06	+77,60	1.102,90	+153,71
	2	465,93	249,96	-46,35	737,40	+58,26	1.955,94	+319,79
3	3	429,05	238,46	-44,42	760,50	+77,25	1.086,30	+153,19
	4	450,69	238,16	-47,16	780,46	+73,17	1.128,72	+150,44
	5	442,65	250,57	-43,39	771,41	+74,27	2.290,38	+417,42

Tabela 6.19: tabela dos dados comparativa dos tempos de espera das linhas 0 e 3

ÍNDICE DA LINHA	NÚMERO DO PONTO	REDE BÁSICA	CENÁRIO 5 CASO A		CENÁRIO 5 CASO B		CENÁRIO 5 CASO C	
			VALOR	% DIFERENÇA	VALOR	% DIFERENÇA	VALOR	% DIFERENÇA
0	0	5,67	3,39	-40,21	9,96	+75,66	14,10	+133,14
	1	5,30	3,20	-39,62	9,86	+86,04	14,18	+167,55
	2	5,31	3,25	-38,79	9,24	+74,01	24,33	+358,19
3	3	5,35	3,08	-42,43	9,49	+77,38	13,96	+160,93
	4	5,26	2,93	-44,30	9,23	+75,47	14,59	+177,38
	5	5,26	3,18	-39,54	9,47	+80,04	25,26	+380,23

Tabela 6.20: tabela dos dados comparativa dos tamanhos médios das filas de espera

Comentários sobre o Cenário 6

Para analisarmos o comportamento do modelo quando a política semafórica da rede é alterada, fizemos um estudo na qual, mantendo o mesmo ciclo de 100 segundos e o mesmo período de entre-verdes, o tempo de verde para cada aproximação é proporcional ao seu fluxo de veículos. Desta forma, nas vias dos corredores principais, o tempo de verde ficou estabelecido em 61 segundos, e nas vias do corredor secundário, o tempo de verde ficou em 51 segundos.

Com os testes efetuados, observamos que há uma sensível melhora nos tempos de viagens dos veículos e um menor tempo de atraso individual, resultados que podem ser consultados nas tabelas anteriores. Com o melhor desempenho do movimento dos veículos, os tempos de espera médio dos passageiros nos pontos também expressou melhores resultados que aqueles obtidos pela rede básica inicial. A tabela abaixo ilustra tal performance:

ÍNDICE DO PONTO	NÚMERO DA LINHA	REDE BÁSICA	CENÁRIO 6 CASO A	% DIFERENÇA
0	0	463,47	442,26	-4,58
	1	433,03	403,71	-6,77
	2	439,55	404,52	-7,97
1	0	434,71	421,89	-2,95
	1	440,69	405,36	-8,02
	2	428,36	413,54	-3,46
2	0	465,93	451,73	-3,05
	1	468,62	434,60	-7,26
	2	432,42	416,98	-3,57
3	3	429,05	403,46	-5,96
	4	406,42	377,15	-7,20
	5	422,03	398,82	-5,50
4	3	450,69	419,90	-6,83
	4	407,16	377,33	-7,33
	5	417,90	393,85	-5,75
5	3	442,65	412,53	-6,80
	4	441,91	409,29	-7,38
	5	436,11	396,70	-9,04

Tabela 6.21: tempos médios de espera dos passageiros nos pontos

Para melhorar o escoamento de veículos na rede, realizamos o estudo da implementação da sincronização dos semáforos. Tal estudo teve como prioridade melhorar o fluxo de veículos nos corredores principais da rede simulada. No entanto, técnicas para a chamada “onda verde” em uma malha são muito complexas, e possuem uma variedade de restrições. Passou-se, então, a trabalhar no sentido de melhorar somente o desempenho operacional do corredor central, com uma defasagem entre o início de verde em 9 segundos entre cada cruzamento. Da mesma forma, analisamos uma “política burra”, onde as defasagens

visam prejudicar o escoamento dos veículos. Os resultados obtidos são mostrados pelas tabelas abaixo:

ATRASOS (SEGUNDOS)		CENÁRIO 6 CASO B		CENÁRIO 6 CASO C	
		VALOR	% DIFERENÇA CASO A	VALOR	% DIFERENÇA CASO A
total		290.251,71	+13,38	358.744,36	+40,13
veículos leves	total	288.125,76	+13,64	355.892,70	+40,37
	médio	52,89	+13,57	65,34	+40,30
ônibus	total	2.125,95	-13,86	2.851,66	+15,54
	médio	58,36	-13,93	79,62	+17,52

Tabela 6.22: atrasos dos veículos na rede

TEMPO DE PERCURSO CORREDOR CENTRAL (SEGUNDOS)	CENÁRIO 6 CASO B		CENÁRIO 6 CASO C	
	VALOR	% DIFERENÇA CASO A	VALOR	% DIFERENÇA CASO A
veículos leves	76,47	-12,53	246,07	+181,45
ônibus	219,28	-8,04	258,91	+8,57

Tabela 6.23: tempos de viagem no corredor central

Pelos resultados, vemos que os atrasos globais dos veículos pioram para os casos B e C, com relação ao caso A. No entanto, quando implementamos uma “onda verde” no corredor central, vemos que o desempenho do corredor melhora substancialmente. Por outro lado, quando implementamos a “política burra”, os resultados foram bem piores. A implementação de uma “onda verde” contribui para o melhor deslocamento dos veículos no corredor, em detrimento das demais vias da rede. Esta política de sincronização semafórica é importante quando queremos priorizar a melhor circulação de veículos, e conseqüentemente dos usuários do sistema de tráfego urbano, em um determinado corredor, onde tal movimento é intenso. Entretanto, para tal aplicação, é necessário obter primeiramente os tempos ótimos dos semáforos da rede, distribuindo adequadamente os tempos de verde para cada fase, caso contrário, os resíduos das filas de veículos prejudicarão a performance da sincronização.

CONCLUSÃO

Desenvolver um instrumento essencialmente prático, que pudesse ser utilizado nos processos de resolução dos problemas envolvidos nos sistemas de transporte e tráfego de pessoas e mercadorias foi o objetivo central que norteou a elaboração deste trabalho.

O modelo construído reproduz a operação de veículos nas vias urbanas, fornecendo como resultado algumas medidas da eficiência operacional do sistema simulado. Assim, o modelo tem potencialidades para prever o desempenho de políticas de circulação de veículos e das linhas de ônibus em fase de planejamento ou projeto, dispensando sua implementação por um período experimental, reduzindo custos e riscos na aplicação de investimentos. Além disso, representa um instrumento de controle de sistemas já em funcionamento, permitindo um prognóstico de seu comportamento diante de alterações nos níveis de demanda e oferta de serviços.

Embora não constitua uma técnica de otimização, o modelo proposto pode ser utilizado para determinar, a partir de diversas simulações e com diferentes combinações entre as variáveis do modelo, a política que melhor se ajusta à circulação dos veículos na rede em estudo.

Inicialmente foi trabalhado o modelo passo-a-passo, cujos resultados obtidos foram animadores, mas o esforço computacional dispendido era muito grande. Passamos, então, a trabalhar no sentido de melhorar o desempenho do simulador. Para isto foram modificadas algumas rotinas e estruturas de dados especiais foram incluídas para a construção do modelo orientado a eventos.

Com isto obtivemos a flexibilidade que faltava, pois o incremento do tempo é automaticamente ajustado nos períodos de baixa e alta atividade, evitando, assim, exames desnecessários do sistema. Assim, novos testes constataram que o modelo orientado a eventos ficou mais poderoso, reduzindo o tempo gasto na execução da simulação. Em contrapartida, para alguns problemas onde há muito congestionamento, o modelo não conseguiu chegar ao seu final, por falta de memória.

Não foram observadas incoerências nos resultados obtidos pelos modelos propostos. Pode-se dizer que, mesmo com poucas experiências computacionais realizadas, o simulador delinea um instrumento poderoso na análise de diversos parâmetros do tráfego.

É preciso lembrar que os tempos de CPU podem ser reduzidos através de uma codificação mais eficiente de certas rotinas. Não se investiu o suficiente em eficiência computacional, tendo sido aproveitadas várias rotinas construídas para uso didático.

A análise global de cada cenário é realizada pelo modelo através do número de entidades temporárias geradas durante o período de simulação (usuários, veículos leves, pesados e ônibus) e dos atrasos total e médio dos veículos (por categoria).

Em cada via da rede são computados o número de veículos que entraram e saíram e os atrasos total e médio dos veículos. Em cada entrada é calculado o número de veículos que foram injetados, e em cada saída é calculado o número de veículos que saíram do sistema. É importante frisar que em todas estas análises é levada em consideração a natureza do veículo.

A coleta de dados para cada faixa da rede inclui a obtenção do número máximo de veículos observado na fila e o instante de observação deste máximo. É também calculado para cada faixa o número de vezes que a fila esteve com a capacidade máxima de ocupação. Além disso, obtemos o número de veículos que entraram e saíram de cada faixa (por categoria), e é feita uma análise dos atrasos dos veículos bem como do tamanho da fila.

Para os pontos de ônibus são calculados o número de chegadas, embarques e desembarques de passageiros. Para cada fila de cada ponto são realizadas análises sobre os tempos de espera dos passageiros e sobre o tamanho da fila de espera.

Em cada linha de ônibus são obtidos o número de injeções de veículos e as cargas totais atendida e recusada. Para a análise do desempenho de cada linha em cada ponto de parada são calculados o número de chegadas, embarques e desembarques de passageiros, bem como a demanda não atendida. Para a análise de cada ônibus injetado por cada linha, é realizado um estudo em cada ponto de parada na qual são calculados o número de embarques, desembarques e a demanda não atendida.

Por fim, para cada tipo de veículo considerado pelo modelo, é realizado um levantamento dos tempos de percurso de percurso dos veículos de cada entrada para cada saída da rede.

Com estes dados é possível analisar as mais diversas situações do tráfego real, dentre as quais podemos destacar:

- o estudo de corredores e de redes de estrutura geométrica qualquer;
- a obstrução de uma via ou de uma faixa, por existir obras em sua extensão;
- a falha de um semáforo, transformando o cruzamento no do tipo sem preferenciais;
- diferentes políticas de circulação (mãos de direção e conversões);
- regulação de semáforos (ondas verdes, etc.);

- faixas exclusivas ou reservadas para a circulação de ônibus, inclusive com modelos de diferentes capacidades.

É necessário, ainda, justificar algumas simplificações realizadas no modelo.

- ele não admite estacionamentos junto ao meio-fio onde estão alocados os pontos de ônibus. Esta restrição já se tornou comum na maioria das cidades brasileiras.
- não consideramos a circulação de táxis na rede estudada. São veículos que param em meio ao tráfego para atender uma demanda de difícil previsão, impossibilitando uma avaliação do tempo de permanência em cada parada.
- ao longo de qualquer rede viária urbana existem edifícios-garagem, casas ou prédios de apartamentos, cujas saídas de veículos afetam a circulação do tráfego. Esta situação foi desconsiderada pelo modelo porque é difícil prever o grau de influência que estas saídas exercem no tráfego de veículos.

Deve ser ressaltado que nenhum destes aspectos passou despercebido durante a elaboração do trabalho, embora a inexistência de informações mais detalhadas tenha justificado todas estas simplificações. Para compensar esta deficiência, procuramos desenvolver um modelo cuja estrutura permita posteriores ajustes.

Fica como sugestão para futuros estudos a elaboração de pesquisas no sentido de levantar os dados necessários para refinar o modelo proposto, através da eliminação das restrições impostas, favorecendo sua maior diversificação de uso.

Embora os resultados obtidos para as situações fictícias simuladas tenham sido considerados satisfatórios, a carência de dados impossibilitou a aplicação do modelo a um estudo de caso. Desta forma, sua validação será deixada a cargo de trabalhos posteriores.

Para complementação do trabalho desenvolvido, sugerimos a implementação de rotinas gráficas que possibilitem o acompanhamento do comportamento da simulação através de ícones animados. Além disso, estudos sobre a determinação da frequência ótima de serviço das linhas de ônibus e a aplicação de tempos semaforicos ótimos podem ser também implementados com o auxílio de algoritmos de sistemas especialistas em simulação, que podem melhorar substancialmente o desempenho geral do modelo.

Apêndice I

OS PSEUDO-CÓDIGOS

I.1 A SIMULAÇÃO PASSO-A-PASSO

Procedimento ITERAÇÃO

Início

MODIFICAÇÃO_FASE_CRUZAMENTO
CHEGADA_USUÁRIO_PONTO
INJEÇÃO_VEÍCULO_LEVE_PESADO
INJEÇÃO_ÔNIBUS
CHEGADA_EFETIVA_ENTRADA
CHEGADA_EFETIVA_FAIXA
SAÍDA_VEÍCULO_FAIXA

FimProcedimento

Procedimento SIMULAÇÃO

Início

Inicializar Variável

relógio = 0.0: relógio da simulação

Inicializar Estatísticas

Enquanto (relógio \leq prdo_aquecimento) *faça*
ITERAÇÃO

relógio = relógio + delta_relógio

FimEnquanto

Reinicializar Estatísticas

Enquanto (relógio \leq prdo_simulação) *faça*
ITERAÇÃO

relógio = relógio + delta_relógio

FimEnquanto

Finalizar Estatísticas

Imprimir Resultados

FimProcedimento

Procedimento MODIFICAÇÃO_FASE_CRUZAMENTO

Início

Inicializar variáveis

$i = 1$: contador do número de cruzamento
 no_crz : número de cruzamentos no sistema

Verificar todos os cruzamentos do sistema

Repetir até que $i = no_crz$

Se é instante de modificação de fase do cruzamento i

Se $hmfc(i) = hora_simulação$

Então

Inicializar variáveis

$j = 1$: contador do número de controladores de fase que mudam de estado
 no_cfme : número de controladores de fase que mudam de estado

Verificar todos os controladores de fase que mudam de estado

Repetir até que $j = no_cfme$

Se o estado do controlador é verde

Se $estado_controlador(j) = verde$

Então

Mudar para vermelho

$estado_controlador(j) = vermelho$

Senão

Inicializar variáveis

$k = 1$: contador do número de faixas que dependem do controlador
 no_fdcf : número de faixas que dependem do controlador de fase

Mudar para verde

$estado_controlador(j) = verde$

Verificar todas as faixas que dependem do controlador de fase

Repetir até que $k = no_fdcf$

Atualizar o instante da próxima saída de veículo (atraso-verde)

$hpspv(k) = hpspv(k) + ATRASO_VERDE$

Incrementar o contador das faixas

$k = k + 1$

FimRepetir { k }

FimSe { $estado_controlador(j) = verde$ }

Incrementar o contador dos controladores de fase

$j = j + 1$

FimRepetir { j }

Determinar o próximo instante de modificação de fase do cruzamento

$hmfc(i) = hmfc(i) + duração_mudança$

FimSe { $hmfc(i) = hora_simulação$ }

Incrementar o contador dos cruzamentos

$i = i + 1$

FimRepetir { i }

FimProcedimento

Procedimento INJEÇÃO_VEÍCULO_LEVE_PESADO

Início

Inicializar variáveis

$i = 1$: contador do número de entrada

no_ent : número de entradas no sistema

Verificar todas as entradas do sistema

Repetir até que $i = no_ent$

Se é instante de injeção de veículo leve ou pesado na entrada i

Se $hpivlp(i) = hora_simulação$

Então

Criar a entidade veículo da lista-lixo ou da alocação de memória

Determinar os atributos do veículo

Escolher a faixa de destino

Escolher $faixa_destino$

Posicionar o veículo na fila virtual da faixa destino

Se o veículo é o primeiro da fila

Se $primeiro_fila(faixa_destino) = veículo$

Então

Atualizar o instante da entrada efetiva de veículo na faixa-destino

$hpee(faixa_destino) = hora_simulação$

FimSe $\{primeiro_fila(faixa_destino) = veículo\}$

Determinar o próximo instante da injeção de veículo leve ou pesado na entrada

$hpivlp(i) = hpivlp(i) + NEG_EXP(média_injeção(i))$

FimSe $\{hpivlp(i) = hora_simulação\}$

Incrementar o contador das entradas

$i = i + 1$

FimRepetir $\{i\}$

FimProcedimento

Procedimento INJEÇÃO_ÔNIBUS

Início

Inicializar variáveis

$i = 1$: contador do número de entrada
 no_ent : número de entradas no sistema

Verificar todas as entradas do sistema

Repetir até que $i = no_ent$

Inicializar variáveis

$j = 1$: contador do número de linhas que entram pela entrada i
 no_lna_ent : número de linhas que entram pela entrada i

Verificar todas as linhas de ônibus que entram pela entrada i

Repetir até que $j \geq no_lna_ent$

Se é instante de injeção de ônibus da linha j na entrada i

Se $hpio(j) = hora_simulação$

Então

Criar a entidade veículo da lista-lixo ou da alocação de memória

Determinar os atributos do veículo

Determinar os atributos adicionais do ônibus

Escolher a faixa-destino

Escolher $faixa_destino$

Posicionar o ônibus na fila virtual da faixa-destino

Se o veículo é o primeiro da fila

Se $primeiro_fila(faixa_destino) = veículo$

Então

Atualizar o instante da entrada efetiva de veículo na entrada

$hpee(faixa_destino) = hora_simulação$

FimSe $\{primeiro_fila(faixa_destino) = veículo\}$

Determinar o próximo instante da injeção de ônibus pela linha j na entrada i

$hpio(j) = hpio(j) + headway(j) + perturbação(j)$

FimSe $\{hpio(j) = hora_simulação\}$

Incrementar o contador das linhas da entrada

$j = j + 1$

FimRepetir $\{j\}$

Incrementar o contador das entradas

$i = i + 1$

FimRepetir $\{i\}$

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_EFETIVA_ENTRADA

Início

Inicializar variáveis

$i = 1$: contador do número de entradas
 no_ent : número de entradas no sistema

Verificar todas as entradas do sistema

Repetir até que $i = no_ent$

Inicializar variáveis

$j = 1$: contador do número de faixas da entrada i
 no_fxa_ent : número de faixas da entrada i

Verificar todas as faixas da entrada i

Repetir até que $j = no_fxa_ent$

Se for instante da chegada efetiva de veículo à faixa j

Se $hceve(j) = hora_simulação$

Então

Se há lugar na faixa j

Então

Retirar o veículo da fila virtual da faixa j

Calcular o instante desejado da chegada ao final da via
Calcular $hdcfv(veículo)$

Posicionar o veículo na fila da faixa j

Se o veículo é o primeiro da fila

Se $primeiro_fila(j) = veículo$

Então

Atualizar o instante da saída de veículo da faixa j

$hpspvf(j) = hdcfv(veículo)$

FimSe $\{primeiro_fila(j) = veículo\}$

Determinar o próximo instante de chegada efetiva de veículo à faixa j

Calcular próximo $hceve(j)$

Senão

Atualizar o próximo instante de chegada efetiva do veículo à faixa j (atraso-congestionamento)

$hceve(j) = hceve(j) + ATRASO_CONGESTIONAMENTO$

FimSe $\{há lugar na faixa j\}$

FimSe $\{hceve(j) = hora_simulação\}$

Incrementar o contador das faixas

$j = j + 1$

FimRepetir $\{j\}$

Incrementar o contador das entradas

$i = i + 1$

FimRepetir $\{i\}$

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_EFETIVA_FAIXA

Início

Inicializar variáveis

$i = 1$: contador do número de faixas
 no_fa : número de faixas no sistema

Verificar todos as faixas do sistema

Repetir até que $i = no_fa$

Se é instante de chegada efetiva de veículo à faixa i

Se $hcev(i) = hora_simulação$

Então

Retirar o veículo da fila virtual da faixa i

Calcular o instante desejado da chegada ao final da via

Calcular $hdcfv(veículo)$

Posicionar o veículo na fila da faixa

Se o veículo é o primeiro da faixa

Se $primeiro_fila(i) = veículo$

Então

Atualizar o instante da próxima saída de veículo da faixa

$hpspv(i) = hdcfv(veículo)$

Senão

Determinar o próximo instante de chegada efetiva de veículo à faixa

Calcular próximo $hcev(i)$

FimSe $\{primeiro_fila(i) = veículo\}$

FimSe $\{hcev(i) = hora_simulação\}$

Incrementar o contador das faixas

$i = i + 1$

FimRepetir $\{i\}$

FimProcedimento

Procedimento SAÍDA_VEÍCULO_FAIXA

Início

Inicializar variáveis

$i = 1$: contador do número de faixa
 no_fxa : número de faixas no sistema

Verificar todas as faixas do sistema

Repetir até que $i = no_fxa$

Se é instante de saída de veículo da faixa i

Se $hpspv(i) = hora_simulação$

Então

Verificar o estado do controlador da fase da faixa

Se $estado_controlador_fase(i) = verde$

Então

Verificar se há conflitos ou impasses

Se há conflitos ou impasses

Então

Verificar se o veículo atrasou por causa do conflito ou do impasse

Se há atraso na saída do veículo

Então

Atualizar o instante da saída do veículo da faixa (atraso-conflito)

$hpspv(i) = hpspv(i) + ATRASO_CONFLITO$

Senão

TRANSFERIR O VEÍCULO

FimSe {atraso saída veículo}

Senão

TRANSFERIR O VEÍCULO

FimSe {conflitos ou impasses}

Senão

Atualizar o instante da saída do veículo da faixa (atraso-verde)

$hpspv(i) = hpspv(i) + ATRASO_VERDE$

FimSe {estado do controlador}

FimSe { $hpspv(i) = hora_simulação$ }

Incrementar o contador das faixas

$i = i + 1$

FimRepetir {i}

FimProcedimento

Procedimento TRANSFERIR_VEÍCULO

Início

Se a via-destino é uma saída da rede

Então

Retirar o veículo da fila da faixa-origem

Determinar o instante da próxima saída de veículo da faixa-origem

Determinar hpspv(faixa_origem)

Colocar o veículo na lista-lixo

Senão

Escolher a direção a ser tomada ao final da via-destino

Escolher a faixa-destino

Escolher faixa_destino

Se há lugar na faixa-destino

Então

Retirar o veículo da fila da faixa-origem

Se o veículo é um ônibus

Então

Se o ônibus parou em um ponto da via-origem

Então

Realizar as operações de EMBARQUE e desembarque de passageiros

FimSe {o ônibus parou em um ponto}

FimSe {o veículo é um ônibus}

Determinar o instante da próxima saída de veículo da faixa-origem

Determinar hpspv(faixa-origem)

Determinar o instante da chegada do veículo à faixa-destino

Determinar hdcfv(veículo)

Posicionar o veículo na fila virtual da faixa-destino

Senão

Atualizar o instante da saída do veículo da faixa-origem (atraso-congestionamento)

hpspv(faixa_origem) = hpspv(faixa_origem) + ATRASO_CONGESTIONAMENTO

FimSe {há lugar na faixa-destino}

FimSe {a via-destino é uma saída da rede}

FimProcedimento

Procedimento EMBARQUE_USUÁRIO

Início

Inicializar variáveis

i = 1: contador do número de usuários que embarcam no ônibus

no_emb: número de usuários que embarcam no ônibus

Verificar todos os usuários que embarcam no ônibus

Repetir até que i = no_emb

Retirar o usuário da fila de espera do ponto

Atualizar estatísticas

Colocar o usuário na lista-lixo

FimRepetir {i}

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_USUÁRIO_PONTO

Início

Inicializar variáveis

$i = 1$: contador do número de pontos de ônibus
 $j = 1$: contador do número de linhas do ponto i
 no_ent : número de entradas no sistema
 no_lna_pto : número de linhas do ponto i

Verificar todas os pontos de ônibus do sistema

Repetir até que $i = no_pto$

Verificar todas as linhas de ônibus do ponto i

Repetir até que $j = no_lna_pto$

Se é instante de chegada de usuário ao ponto i

Se $hcup(i) = hora_simulação$

Então

Criar a entidade usuário da lista-lixo ou da alocação de memória

Determinar os atributos do usuário

Posicionar o usuário na fila de espera do ponto i

Determinar o próximo instante de chegada de usuário ao ponto i

$hcup(i) = hcup(i) + NEG_EXP(média_chegada(i)(j))$

FimSe $\{hcup(i) = hora_simulação\}$

Incrementar o contador das linhas

$j = j + 1$

FimRepetir $\{j\}$

Incrementar o contador dos pontos de ônibus

$i = i + 1$

FimRepetir $\{i\}$

FimProcedimento

I.2 A SIMULAÇÃO ORIENTADA A EVENTOS

Procedimento ITERAÇÃO

Início

Retirar o Primeiro Elemento da Lista de Eventos Futuros

Incrementar o Relógio

Realizar as Atividades do Evento

FimProcedimento

Procedimento SIMULAÇÃO

Início

Inicializar Variável

relógio = 0.0: relógio da simulação

Inicializar Estatísticas

Enquanto (relógio \leq prdo_aquecimento) *faça*

ITERAÇÃO

Reinicializar Estatísticas

Enquanto (relógio \leq prdo_simulação) *faça*

ITERAÇÃO

Finalizar Estatísticas

Imprimir Resultados

FimProcedimento

Procedimento MUDANÇA_FASE_CRUZAMENTO (no_crz)

Inteiro

no_crz: número do cruzamento

Início

Inicializar variáveis

i = 1: contador do número de controladores de fase que mudam de estado

no_cfme: número de controladores de fase que mudam de estado

Verificar todos os controladores de fase que mudam de estado

Repetir até que i = no_cfme

Se o estado do controlador é verde

Se estado_controlador(i) = verde

Então

Mudar para vermelho

estado_controlador(i) = vermelho

Senão

Inicializar variáveis

j = 1: contador do número de faixas que dependem do controlador de fase

no_fdcf: número de faixas que dependem do controlador de fase

Mudar para verde

estado_controlador(i) = verde

Verificar todas as faixas que dependem do controlador de fase

Repetir até que j = no_fdcf

Atualizar o instante da próxima saída de veículo (atraso-verde)

hpspv(j) = hpspv(j) + ATRASO_VERDE

Incrementar o contador das faixas

j = j + 1

FimRepetir {j}

FimSe {estado_controlador(i) = verde}

Incrementar o contador dos controladores de fase

i = i + 1

FimRepetir {i}

Programar a próxima modificação de fase do cruzamento na lista de eventos futuros

Instante dado por: hora = hora_simulação + duração_mudança

FimProcedimento

Procedimento INJEÇÃO_VEÍCULO_LEVE_PESADO (no_ent)

Inteiro

no_ent: número da entrada

Início

Criar a entidade veículo da lista-lixo ou da alocação de memória

Determinar os atributos do veículo

Escolher a faixa de destino

Escolher faixa_destino

Posicionar o veículo na fila virtual da faixa destino

Realizar a CHEGADA EFETIVA do veículo na faixa destino

Programar a próxima injeção de veículo leve ou pesado na entrada na lista de eventos futuros

Instante dado por: hora = hora_simulação + NEG_EXP(média_injeção)

FimProcedimento

Procedimento INJEÇÃO_ÔNIBUS (no_ent, no_lna)

Inteiro

no_ent: número da entrada
no_lna: número da linha

Início

Criar a entidade veículo da lista-lixo ou da alocação de memória

Determinar os atributos do veículo

Determinar os atributos adicionais do ônibus

Escolher a faixa de destino

Escolher faixa_destino

Posicionar o veículo na fila virtual da faixa destino

Realizar a CHEGADA EFETIVA do veículo na faixa destino

Programar a próxima injeção de ônibus pela linha na lista de eventos futuros

Instante dado por: hora = hora_simulação + headway(no_lna) + perturbação

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_EFETIVA_ENTRADA (no_fxa)

Inteiro

no_fxa: número da faixa-destino

Início

Se há lugar na faixa-destino

Então

Retirar o veículo da fila virtual da faixa-destino

Calcular o instante desejado da chegada ao final da via

Calcular $hdcfv(\text{veículo})$

Posicionar o veículo na fila da faixa-destino

Se o veículo é o primeiro da fila

Se primeiro_fila(no_fxa) = veículo

Então

Programar a saída de veículo da faixa-destino na lista de eventos futuros

Instante dado por: hora = $hdcfv(\text{veículo})$

FimSe {primeiro_fila(no_fxa) = veículo}

Senão

Programar a próxima chegada efetiva do veículo à entrada na lista de eventos futuros (atraso-congestionamento)

Instante dado por: hora = hora_simulação + ATRASO_CONGESTIONAMENTO

FimSe {há lugar na faixa_destino}

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_EFETIVA_FAIXA (no_fxa)

Inteiro

no_fxa: número da faixa

Início

Retirar o veículo da fila virtual da faixa

Calcular o instante desejado da chegada ao final da via

Calcular $hdcfv(\text{veículo})$

Posicionar o veículo na fila da faixa

Se o veículo é o primeiro da faixa

Se $\text{primeiro_fila}(\text{no_fxa}) = \text{veículo}$

Então

Programar a saída de veículo da faixa na lista de eventos futuros

Instante dado por: $\text{hora} = hdcfv(\text{veículo})$

FimSe $\{\text{primeiro_fila}(\text{no_fxa}) = \text{veículo}\}$

FimProcedimento

Procedimento SAÍDA_VEÍCULO_FAIXA (no_fxa)

Inteiro

no_fxa: número da faixa

Início

Verificar o estado do controlador da fase da faixa

Se estado_controlador_fase(no_fxa) = verde

Então

Verificar se há conflitos ou impasses

Se há conflitos ou impasses

Então

Verificar se o veículo atrasou por causa do conflito ou do impasse

Se há atraso na saída do veículo

Então

Programar a saída do veículo da faixa na lista de eventos futuros (atraso-conflito)

Instante dado por: hora = hora_simulação + ATRASO_CONFLITO

Senão

TRANSFERIR O VEÍCULO

FimSe {atraso saída veículo}

Senão

TRANSFERIR O VEÍCULO

FimSe {conflitos ou impasses}

Senão

Programar a saída do veículo da faixa na lista de eventos futuros (atraso-verde)

Instante dado por: hora = hora_simulação + ATRASO_VERDE

FimSe {estado do controlador}

FimProcedimento

Procedimento TRANSFERIR_VEÍCULO (no_via, no_fxa_org)

Inteiros

no_via: número da via-destino
no_fxa_org: número da faixa-origem

Início

Se a via-destino é uma saída da rede

Então

Retirar o veículo da fila da faixa-origem

Programar a próxima saída de veículo da faixa-origem na lista de eventos futuros

Instante dado por: hora = hpspv(no_fxa_org)

Colocar o veículo na lista-lixo

Senão

Escolher a direção a ser tomada ao final da via-destino

Escolher a faixa-destino

Escolher faixa_destino

Se há lugar na faixa-destino

Então

Retirar o veículo da fila da faixa-origem

Se o veículo é um ônibus

Então

Se o ônibus parou em um ponto da via-origem

Então

Realizar as operações de EMBARQUE e desembarque de passageiros

FimSe {o ônibus parou em um ponto}

FimSe {o veículo é um ônibus}

Programar a próxima saída de veículo da faixa-origem na lista de eventos futuros

Instante dado por: hora = hpspv(no_fxa_org)

Determinar o instante da chegada do veículo à faixa-destino

Determinar hdcfv(veículo)

Posicionar o veículo na fila virtual da faixa-destino

Programar a chegada efetiva do veículo na faixa-destino na lista de eventos futuros

Senão

Programar a saída do veículo da faixa-origem na lista de eventos futuros

(atraso-congestionamento)

Instante dado por: hora = hora_simulação + ATRASO_CONGESTIONAMENTO

FimSe {há lugar na faixa-destino}

FimSe {a via-destino é uma saída da rede}

FimProcedimento

Procedimento EMBARQUE_USUÁRIOS (no_pto, no_lna_pto)

Inteiros

no_pto: número do ponto
no_lna_pto: número da linha no ponto

Início

Inicializar variáveis

i = 1: contador do número de usuários que embarcam no ônibus
no_emb: número de usuários que embarcam no ônibus

Verificar todos os usuários que embarcam no ônibus

Repetir até que $i = no_emb$

Retirar o usuário da fila de espera do ponto

Atualizar estatísticas

Colocar o usuário na lista-lixo

FimRepetir {i}

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_USUÁRIO_PONTO (no_pto, no_lna_pto)

Inteiros

no_pto: número do ponto
no_lna_pto: número da linha do ponto

Início

Criar a entidade usuário da lista-lixo ou da alocação de memória

Determinar os atributos do usuário

Posicionar o usuário na fila de espera do ponto

Programar a próxima chegada de usuário ao ponto na lista de eventos futuros

Instante dado por: $hora = hora_simulação + NEG_EXP(média_chegada)$

FimProcedimento

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] ABOURS, S.; ARON, M.; COTTINET, M.; DANECH-PAJOUH, M.; DAVEE, M.; DEFRE, T.; FORASTE, B.; LESORT, J.; MORIN, J.; SAINT-HILAIRE, F.B.; *Les Modèles INRETS de Simulation*; Synthèse INRETS nº12; Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité; Juillet; 1988.
- [02] BAPTISTELLA, L.F.B.; DELAZARO, W.; *Modelos de Simulação para Regulação de Transportes Coletivos*; Tese de Mestrado; FEE/UNICAMP; Campinas; Novembro; 1976.
- [03] BARCELÓ, J.; FERRER, J.L.; MONTERO, L.; *Artificial Intelligence and Simulation: an Application to Urban Traffic Simulation*; Pesquisa Operacional; vol.9; nº2; pp.1-17; Dezembro; 1989.
- [04] BLY, P.H.; *Use of Computer Simulation to Examine the Working of a Bus Lane*; TRRL Report LR 609; Transport and Road Research Laboratory; Crowthorne; Berkshire; 1973.
- [05] DEBAILLE, S.; ARON, M.; *La Simulation Fine du Traffic dans un Réseau Urbain*; Rapport I.R.T. nº35; Institut de Recherche des Transports; Octobre; 1978.
- [06] DREW, D.R.; *Traffic Flow Theory and Control*; McGraw-Hill; 1968.
- [07] ESTEVES, L.M.B.; *Um Modelo de Simulação da Operação de Ônibus em Faixas Exclusivas em Vias Arteriais*; Tese de Mestrado; COPPE/UFRJ; Rio de Janeiro; Setembro; 1982.
- [08] HOROWITZ, E.; SAHNI, S.; *Fundamentals of Computer Algorithms*; Computer Science Press; 1978.
- [09] IUNES, F.; WILLUMSEN, L.; *The Computer-Assisted Design of With-Flow Bus Lanes with BLISS*; Traffic Engineering and Control; vol.29; no.7-8; pp. 384-391; July/August; 1988.
- [10] LOURENÇO, M.H.D.T.; *Simulação de Operações Preferenciais de Ônibus Urbanos em Vias Arteriais*; Tese de Mestrado; COPPE/UFRJ; Rio de Janeiro; Fevereiro; 1982.

- [11] NEELAMKAVIL, F.; *Computer Simulation and Modelling*; John Wiley & Sons; 1988.
- [12] PAUL, R.J.; *Recent Developments in Simulation Modelling*; Journal of the Operational Research Society; vol.42; no.3; pp.217-226; 1991.
- [13] PEIRCE, J.R.; WOOD, K.; *BUS TRANSYT - A User's Guide*; Supplementary Report 266; Transport and Road Research Laboratory; Crowthorne, Berkshire; 1977.
- [14] PERIN FILHO, C.; *Introdução à Simulação de Sistemas*; Notas de Aulas; IMECC/UNICAMP; Campinas; Agosto; 1990.
- [15] PIDD, M.; *Computer Simulation in Management Science*; Second Edition; John Wiley & Sons; 1988.
- [16] PRITSKER, A.A.B.; *Introduction to Simulation and SLAM II*; Third Edition; John Wiley & Sons; 1986.
- [17] RATHI, A.K.; SANTIAGO, A.J.; *The New NETSIM Simulation Program*; Traffic Engineering and Control; vol.31; no.5; pp.317-320; May; 1990.
- [18] RATHI, A.K.; SANTIAGO, A.J.; *Identical Traffic Streams in the TRAF-NETSIM Simulation Program*; Traffic Engineering and Control; vol.31; no.6; pp.351-355; June; 1990.
- [19] RATHI, A.K.; *The Use of Common Random Numbers to Reduce the Variance in Network Simulation of Traffic*; Transportation Research B; vol.26B; no.5; pp.357-363; 1992.
- [20] SOARES, L.F.G.; *Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas*; VII Escola de Computação; IME-USP; São Paulo; 1990.
- [21] SOARES FILHO, S.; *Um Simulador de Tráfego Urbano*; Tese de Mestrado; FEE/UNICAMP; Setembro; 1974.
- [22] VINCENT, R.A.; MITCHELL, A.I.; ROBERTSON, D.I.; *User Guide to TRANSYT Version 8*; TRRL Laboratory Report 888; Transport and Road Research Laboratory; Crowthorne; Berkshire; 1980.
- [23] WOHL, M.; MARTIN, B.V.; *Traffic System Analysis for Engineers and Planners*; McGraw-Hill; 1967.
- [24] WONG, S.; *TRAF-NETSIM: How It Works, What It Does*; ITE Journal; vol.60; no.4; pp.22-27; April; 1990.

BIBLIOGRAFIA

- [01] AKÇELIK, R.; *SIDRA 4.0 Software Status*; Traffic Engineering and Control; vol.32; no.12; pp.585-589; December; 1991.
- [02] ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos; *Sugestões para a Formulação da Política de Transporte de Passageiros no Brasil - Ônibus Urbano*; Revista dos Transportes Públicos - ANTP; ano 13; no.51; Março; 1991.
- [03] BALASSIANO, M.; *Um Modelo de Simulação para Avaliar a Implantação de Medidas Prioritárias para Ônibus*; Tese de Mestrado; COPPE/UFRJ; Rio de Janeiro; Dezembro; 1979.
- [04] CET - Companhia de Engenharia de Tráfego; *Guia de Usuário: Transyt 9 Versão 1.1*; Março; 1991.
- [05] CMTc - Companhia Municipal de Transportes Coletivos; *Terminais de Transferência de Passageiros*; Cadernos Técnicos CMTc; no.3; Dezembro; 1985.
- [06] DAIBERT, R.M.; *Avaliação do Desempenho de Transporte Coletivo por Ônibus*; Série Teses; EBTU; Brasília; 1984.
- [07] DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito; *Manual de Semáforos*; Coleção Serviços de Engenharia; Ministério da Justiça; Brasília; 1984.
- [08] DOUKIDIS, G.I.; *An Anthology on the Homology of Simulation with Artificial Intelligence*; J. Opt. Res. Soc.; vol.38; no.8; pp.701-711; 1987.
- [09] FAVILLA JUNIOR, J.R.; PRUDENCIO, E.E.; *Controlador de Semáforo Utilizando Lógica Nebulosa*; Notas de Aulas; IA333 - Lógica Nebulosa; FEE/UNICAMP.

- [10] FERNANDES, J.F.R.; FRANÇA, P.M.; ALBUQUERQUE, R.H.P.L.; SOARES FILHO, S.; TAVARES, H.M.F.; BURIAN JUNIOR, Y.; *Conceitos Básicos em Tráfego Urbano*; Publicação Interna; Publicação FEC 06/74; UNICAMP; Maio; 1974.
- [11] FISHMAN, G.S.; *Principles of Discrete Event Simulation*; John Wiley & Sons; 1978.
- [12] FREITAS, L.H.W; *Análise e Dimensionamento da Oferta de Transporte por Ônibus - Metodologia*; Série Boletim Técnico da CET nº35; CET; São Paulo; Dezembro; 1985.
- [13] GAULT, H.E.; *An On-Line Measure of Delay in Road Traffic Computer-Controlled Systems*; Traffic Engineering and Control; pp.384-389; July; 1981.
- [14] GIBSON, J.; BAEZA, I.; *Bus-Stops, Congestion and Congested Bus-Stops*; Traffic Engineering and Control; vol.30; no.6; pp.291-302; June; 1989.
- [15] HULTQUIST, P.; *A Good Random Number Generator for Microcomputers*; Simulation; vol.57; no.4; pp.258-259; 1991.
- [16] KNUTH, D.E.; *The Art of Computer Programming Volume 2 Seminumerical Algorithms*; Addison-Wesley Publishing Company; Second Edition; 1981.
- [17] LESORT, J.B.; SELLAM, S.; *Le Traitement Statistique des Données de Trafic en Réseau Urbain - Première Partie: Le Redressement des Données, L'Analyse des Phénomènes*; Rapport INRETS nº27; Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité; Février; 1987.
- [18] LESORT, J.B.; SELLAM, S.; *Le Traitement Statistique des Données de Trafic en Réseau Urbain - Deuxième Partie: La Sélection des Points de Mesures, la Classification en Périodes Homogènes*; Rapport INRETS nº151; Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité; Février; 1992.
- [19] MERCEDES-BENZ DO BRASIL S.A.; *Sistema de Transporte Coletivo Urbano por Ônibus - Planejamento e Operação*; Junho; 1987.
- [20] NISHI, M.; FERNANDES, J.F.R.; *SIMTRAF: Um Simulador de Redes Viárias Urbanas com Transporte Coletivo*; Anais do VI ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes; Rio de Janeiro; Novembro; 1992..
- [21] NISHI, M.; FERNANDES, J.F.R.; *SIMTRAF-OPERBUS: Um Simulador de Tráfego Urbano com Transporte Coletivo*; VII Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano; Buenos Aires; Argentina; Novembro; 1994 (submetido).

- [22] PEREIRA, A.J.F.; ANDRADE, J.P.; *Aspectos da Caracterização Básica do Tráfego Rodoviário Urbano - A Experiência Portuguesa e Brasileira*; Revista de Transporte e Tecnologia; ano IV; no.8; pp.38-55; Janeiro; 1992.
- [23] PORTUGAL, L.S.; MAIOLINO, C.E.G.; *Sistemas Especialistas para Gerência do Tráfego*; Revista dos Transportes Públicos - ANTP; ano 12; no.48; pp.119-132; Junho; 1990.
- [24] ROBERTSON, G.D.; *BLAMP - An Interactive Bus Lane Model*; Traffic Engineering and Control; vol.26; no.7/8; pp.366-369; July/August; 1985.
- [25] ROTHEN, M.L.; *Avaliação da Sinalização Semafórica Exclusiva para Pedestres, de Ciclo Fixo, na Cidade do Rio de Janeiro e Propostas Alternativas*; Tese de Mestrado; COPPE/UFRJ; Rio de Janeiro; Julho; 1985.
- [26] SADEGH, A.; RADWAN, A.E.; MATTHIAS, J.S.; *A Comparison of Arterial and Network Software Programs*; ITE Journal; vol.57; no.8; pp.35-39; August; 1987.
- [27] SAGLIER, F.; *Contribution a L'Étude des Procédures de Régulation Automatique de Lignes D'Autobus*; Tese de Doutorado; Université Paul Sabatier de Toulouse; Novembre; 1975.
- [28] SAMPAIO FILHO, L.A.; *Modelo para Alocação Ótima de Ônibus às Linhas de uma Empresa*; Série Teses; EBTU; Brasília; 1984.
- [29] SCHILDT, H.; *C Completo e Total*; Makron, McGraw-Hill; 1990.
- [30] SEDGEWICK, R.; *Algorithms in C*; Addison-Wesley; 1990.
- [31] ULYSSÉA NETO, I.; *Um Modelo de Simulação do Fluxo de Tráfego sobre uma Via, com uma Saída de Veículos*; COPPE/UFRJ; Rio de Janeiro; Julho; 1980.
- [32] WEBSTER, F.V.; *Traffic Signal Settings*; Road Research Technical Paper no.39; Road Research Laboratory; 1958.
- [33] WEBSTER, F.V.; COBBE, B.M.; *Traffic Signals*; Road Research Technical Paper no.56; Road Research Laboratory; 1966.