

ADILTON JOSÉ DA SILVA

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRÁFEGO URBANO
BASEADO NO IDM (INTELLIGENT DRIVER MODEL)**

RECIFE-PE - AGOSTO/2009.



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRÁFEGO URBANO
BASEADO NO IDM (INTELLIGENT DRIVER MODEL)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada como exigência parcial à obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Desenvolvimento de Métodos Estatísticos Computacionais.

Orientador : Prof. Dr Borko Stösić

Co-orientador : Prof. Dr. Eufrázio de Souza Santos

Co-orientador : Prof. Dr. Wilson Rosa de Oliveira Júnior

RECIFE - PE - AGOSTO/2009

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA**

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRÁFEGO URBANO
BASEADO NO IDM (INTELLIGENT DRIVER MODEL)**

ADILTON JOSÉ DA SILVA

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 27/08/2009 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Borko D. Stösić
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adauto José Ferreira de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Tsang Ing Ren
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Wilson Rosa de Oliveira Junior
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, pois sem Ele, nada seria possível e não estaríamos aqui reunidos, desfrutando, juntos, destes momentos que nos são tão importantes.

Aos meus pais Adson e Edenize, a minha esposa Simone e aos meus filhos Maria Eduarda e Arthur, pela paciência, incentivo, cooperação e apoio.

Agradecimentos

Aos meus pais Adson e Edenize, pela educação, incentivo e apoio.

Ao Professor Dr. Borko Stösić, pela dedicação, orientação, ensinamentos, confiança, amizade e paciência sempre concedida.

A Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Biometria, por ter dado todas as condições necessárias para o desenvolvimento do curso e deste trabalho.

Aos professores Wilson Rosa e Jones Albuquerque, pelo incentivo e apoio para a realização do curso.

Aos Professores Eufrásio de Souza Santos e Tatijana Stösić, pela confiança e incentivo.

A todos os colegas do mestrado pelo apoio, principalmente a Evert, Felipe, Edleide, Andréa, Vanessa, Erinaldo e Alessandro.

Ao Marco Antônio, secretário do PPG, pelo envolvimento com o programa, presteza no atendimento, e principalmente pela amizade construída.

Aos amigos de trabalho da EMPREL-DIER, principalmente a Silvana e Mônica, pelo apoio e estímulo para realização e conclusão do curso.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desta dissertação.

Abstract

The evolution of motor vehicles has elevated transport capabilities to the point where same distances, between regions geographically distant, are nowadays covered by roughly 15 times faster in comparison to the last century. Consequently, large urban centers must be adapted to the rapid advance of the automotive industry and the proliferation of motor vehicles by constructing of fast lane roads, elaborating of traffic norms and legislature, stimulate public transport, establish traffic education policies, and continuously evaluating economic, social and ambient impacts of vehicular urban traffic. On the other hand, vehicular urban traffic represents an extremely complex phenomenon, and in particular if the structure of the underlying grid of multiple lane streets, crossings and semaphores taken into account, not amenable to modeling with analytic treatment. In this context computer simulations represent a fundamental tool for the description of this phenomenon, aiding actions necessary for the improvement of traffic conditions in large urban centers. In this work a microscopic car-following model, known as Intelligent Driver Model, was used to simulate traffic in the district of Afogados, in the city of Recife, Brazil, with the objective to verify whether the complexity of the underlying street grid (with multiple lane streets, crossings, and semaphores) can exhibit the effect of critical density (appearance of a maximum in the vehicle flux versus density curve). Numerical simulations demonstrate that this effect indeed is observed on individual avenues, while phase offset among the avenues results in damping of this effect for the region as a whole.

Key words: simulation, traffic, urban, vehicular, IDM, statistics, probabilistic.

Resumo

O surgimento e evolução dos veículos automotores, permitiram que o deslocamento entre regiões geograficamente distantes, possa ser realizado em torno de 15 vezes mais rápido do que no século passado. Por consequência, os grandes centros urbanos precisaram se adaptar ao rápido avanço da indústria automotiva e a proliferação de veículos nas vias urbanas, construindo vias de tráfego rápido, elaborando normas e legislações de trânsito, estimulando o transporte público coletivo, estabelecendo políticas de educação no trânsito e avaliando constantemente os impactos econômicos, sociais e ambientais provocados pelos fenômenos do fluxo de tráfego urbano. Por outro lado, o tráfego urbano veicular representa um fenômeno altamente complexo, e em particular quando se leva em conta a estrutura da malha viária de uma região urbana (ruas e avenidas com múltiplas faixas, cruzamentos e semáforos), torna-se inviável sua modelagem com tratamento analítico. Simulações computacionais são uma ferramenta fundamental para descrição deste fenômeno, na direção de auxiliar as ações necessárias para a melhoria das condições do tráfego nos grandes centros urbanos. Neste trabalho foi utilizado o modelo microscópico conhecido como "*Intelligent Driver Model*" para simulação de tráfego no bairro de Afogados, Recife, com objetivo de verificar se a complexidade da malha viária urbana, pode causar o efeito de concentração crítica observado em estudos empíricos (aparência de máximo na curva de fluxo em função da densidade dos veículos). Simulações numéricas demonstram que este efeito realmente é observado em avenidas individuais, enquanto a defasagem entre as avenidas, resulta no desaparecimento deste efeito para a região como um todo.

Palavras chaves: simulação, tráfego, urbano, veicular, IDM, estatística, probabilístico.

Sumário

1	Introdução	13
2	A região em estudo	15
3	Teoria de tráfego	17
3.1	Elementos básicos	17
3.1.1	O veículo	17
3.1.2	O motorista	18
3.1.3	A estrada	18
3.2	Fluxo de tráfego	19
3.3	Densidade	21
3.4	Velocidade média	21
3.5	Ocupação	21
3.6	Relação fundamental da teoria de fluxo de tráfego	22
4	Distribuições estatísticas	26
4.1	Distribuição uniforme	26
4.1.1	Geração de números aleatórios uniformemente distribuídos	26
4.2	Distribuição normal	28
4.2.1	Geração de números aleatórios normalmente distribuídos	28
5	Modelos de simulações	31
5.1	Características	31
5.2	Classificação	32
5.3	Modelos <i>car-following</i>	33
5.3.1	Modelos que utilizam distância segura	33
5.3.2	Modelos estímulo-resposta	34

5.3.3 Modelos psico-espacial	34
5.4 A escolha do modelo	34
6 O IDM	36
7 Construção do software	39
7.1 A linguagem de programação	39
7.2 O ambiente de desenvolvimento	39
7.3 Os requisitos de máquina	40
7.3.1 Hardware	40
7.3.2 Software	40
7.4 A codificação	41
7.4.1 As avenidas	41
7.4.2 Os veículos	43
8 Fluxogramas	48
9 A simulação	57
10 Observação e análise dos dados	60
11 Conclusões	65
12 Considerações finais	67

Lista de Tabelas

7.1	Rotas de acordo com as avenidas de entrada na região e destinos possíveis, com suas respectivas probabilidades.	44
7.2	Parâmetros definidores das ações de cada veículo em uma determinada rota para atingir seu destino	45
7.3	Tipos, características e probabilidades de criação dos veículos.	46
9.1	Valores dos parâmetros do modelo.	59

Lista de Figuras

2.1	Destaque geográfico da região em estudo.	16
3.1	Representação de veículos consecutivos em uma mesma faixa do fluxo de tráfego.	20
3.2	Diagrama fundamental relacionando a densidade k ao fluxo q . A capacidade de fluxo q_{cap} é alcançada na densidade crítica k_c	22
3.3	Dados empíricos para fluxo e ocupação de avenida expressa no Canadá.	24
3.4	Representação esquemática para fluxo e ocupação, consistente com investigações empíricas, mostrando formas de transição de tráfego livre para congestionado.	25
4.1	Números pseudo-aleatórios gerados pelo método Box-Muller na forma $N(0, 1)$	30
7.1	Imagem da região de Afogados	42
7.2	Representação esquemática da definição de veículo líder, devido à mudança de avenida.	47
8.1	Lógica global da simulação.	49
8.2	Processamento das avenidas e veículos.	50
8.3	Lógica do deslocamento dos veículos.	52
8.4	Avaliação de mudança de faixa.	53
8.5	Rotina de cálculo do deslocamento para o primeiro veículo (líder) de uma faixa, que não possui nenhum outro veículo na próxima faixa da avenida que ele seguirá.	54
8.6	Rotina de cálculo do deslocamento para o primeiro veículo de uma faixa, com existência de outro veículo na próxima faixa da avenida que ele ingressará.	55

8.7	Rotina de cálculo para veículos não líder.	56
9.1	Imagem estática da interface gráfica do simulador em um determinado instante de tempo do processo de simulação.	57
10.1	Dados da simulação relacionando fluxo e taxa de ocupação para avenida 00.	61
10.2	Dados simulados relacionando velocidade média dos veículos e taxa de ocupação, para avenida 00.	61
10.3	Dados categorizados relacionando fluxo dos veículos e taxa de ocupação, para avenida 00.	62
10.4	Dados categorizados relacionando velocidade média dos veículos e taxa de ocupação para avenida 00.	62
10.5	Regressão polinomial de 3 ^a ordem para os dados da avenida 00.	63
10.6	Dados brutos coletados relacionando fluxo de veículos e taxa de ocupação, para toda a região.	64
10.7	Dados brutos coletados relacionando velocidade média e taxa de ocupação, para toda a região.	64

Capítulo 1

Introdução

A Região Metropolitana do Recife (RMR), possui um sistema de transporte baseado principalmente no meio rodoviário, tendo seus municípios, bairros e regiões essencialmente conectados através de vias rodoviárias urbanas. Neste contexto, o crescimento da indústria automotiva, a inserção do veículo popular e a facilidade de financiamento, permitiram que cada vez mais cidadãos optem pela aquisição e uso do veículo particular de passeio; e como consequência, a malha viária urbana anualmente recebe um incremento significativo da quantidade de veículos em trânsito. Segundo dados do Departamento Estadual de Trânsito do estado de Pernambuco (DETRAN) [1], no ano de 1990, a RMR possuía 251.423 veículos e no ano de 2007 718.881 sendo que destes 423.395 estão na cidade do Recife. Este crescimento violento da densidade veicular, provocou diversos tipos de efeitos que originam engarrafamentos em diversas partes da cidade.

Neste mesmo período, o avanço tecnológico permitiu uma evolução dos computadores, tornando disponível a comunidade científica e a um usuário comum, um poder computacional, que antes era apenas conseguido nos grandes centros científicos computacionais. Shannon [2] descreve que, este fato agregado ao desenvolvimento da computação numérica, das técnicas estatísticas e da computação gráfica; permitiu a criação de simuladores nas mais diversas áreas científicas, com o intuito de identificar, mensurar e analisar o comportamento de sistemas reais dos mais diversos. O estudo de tráfego veicular não foi uma exceção, e encontramos na literatura diversos campos de pesquisas utilizando simulações computacionais.

Uma simulação é essencialmente um experimento controlado, que em conjunto com um modelo matemático, pode-se obter resultados aproxima-

dos sobre problemas complexos, e uma vez utilizando-se recursos computacionais é possível realizar processos, que no tempo real poderia levar meses ou anos, num intervalo de tempo bem menor, até mesmo em dias ou horas. Segundo Drew [3], uma simulação computacional é uma metodologia essencial para a resolução de problemas do mundo real.

O estudo de fluxo de tráfego é um problema complexo, onde temos duas variáveis de estado (tempo e posição) para cada veículo. Desta forma, em um sistema com n veículos teremos que contabilizar as interações de $2 \times n$ variáveis de estado.

Uma revisão histórica elaborada por Brackstone [4], estudos de Maerivoet [5] e Chakroborty [6], relatam diversos modelos de fluxo de tráfego, que podem ser classificados de acordo com os seguintes itens: nível de detalhamento desejado do fenômeno (microscópico, mesoscópico ou macroscópico); baseados em eventos ou no tempo (discreto e/ou estocástico); de fluxo estático ou variável com o tempo (tempo real ou off-line).

Neste trabalho, utilizaremos um modelo microscópico, de tempo contínuo, off-line; baseado no modelo "car-following" "Intelligent Driver Model" (IDM) proposto por Treiber e colaboradores [7, 8]. Este modelo, baseia-se em um sistema de equações diferenciais não-lineares acopladas, associando a cada veículo uma equação diferencial cinemática, cujos parâmetros dependem das posições e velocidades dos veículos adjacentes. A solução deste sistema de equações, com dadas condições de contorno, só é possível através de métodos numéricos. Para tal, desenvolvemos um simulador em linguagem de programação C para ambiente *Windows*, utilizando o "Integrated Development Environment" (IDE) *Microsoft Visual C++ 6.0* com "Graphical User Interface" (GUI), criando uma animação para facilitar a correção de eventuais problemas, visualizar a operação e as interações simultâneas, e ajudar em uma apresentação a dar credibilidade ao modelo; de forma, que interativamente possa-se mudar as variáveis do sistema permitindo maior usabilidade na realização dos experimentos na região.

O objetivo desta dissertação, será de analisar a capacidade do fluxo de tráfego de uma região real urbana (bairro Afogados, Recife, Pernambuco, Brasil) com tráfego misto e interrupto (contempla semáforos). Saliencia-se que esta região se caracteriza, por ser um dos dois corredores viários de transporte coletivo que interliga a região Sul ao Centro da cidade do Recife.

Capítulo 2

A região em estudo

Recife, capital do Estado de Pernambuco, situa-se no litoral nordestino e ocupa uma posição central, a 800 km de outras duas metrópoles regionais, Salvador e Fortaleza, disputando com elas o espaço estratégico de influência na Região. Possui 94 bairros e 6 Regiões Político Administrativas (RPA):

1. RPA 1 - Centro: 11 bairros
2. RPA 2 - Norte: 18 bairros
3. RPA 3 - Noroeste: 29 bairros
4. RPA 4 - Oeste: 12 bairros
5. RPA 5 - Sudoeste: 16 bairros
6. RPA 6 - Sul: 8 bairros

Segundo o censo demográfico de 2000 [9], Recife possui 1.422.905 habitantes, correspondendo a 43% da população da Região Metropolitana do Recife (RMR).

O bairro de Afogados esta localizado na RPA 5, sendo limítrofe com os bairros do Bongi, Cabanga, Ilha do Retiro, Ilha Joana Bezerra, Imbiribeira, Jiquiá, Mangueira, Mustardinha, Prado e São José. Possui um intenso fluxo de veículos e pedestres, possui mercados e feiras livres com forte interesse da população da região, além de possuir duas estações de metrô, onde cada uma delas interliga o bairro a regiões distintas da cidade.

A escolha das avenidas do bairro de Afogados, baseia-se na ocorrência diária de congestionamentos do tráfego de veículos; além disto, suas avenidas são artérias viárias de conexão entre as RPA's 1, 6 e 4; que contabilizando a própria região de Afogados representam 47 dos 94 bairros existentes.

O bairro, apresentado geograficamente, na Figura 2.1, em relação à cidade do Recife com suas avenidas e conexões, caracteriza-se por ser cortado por um dos dois eixos rodoviários, que interligam a região sul da cidade ao centro. É um ponto, de estrangulamento de tráfego durante os horários de maior fluxo de veículos e pedestres, apresenta variações e alternâncias entre os regimes de tráfego.

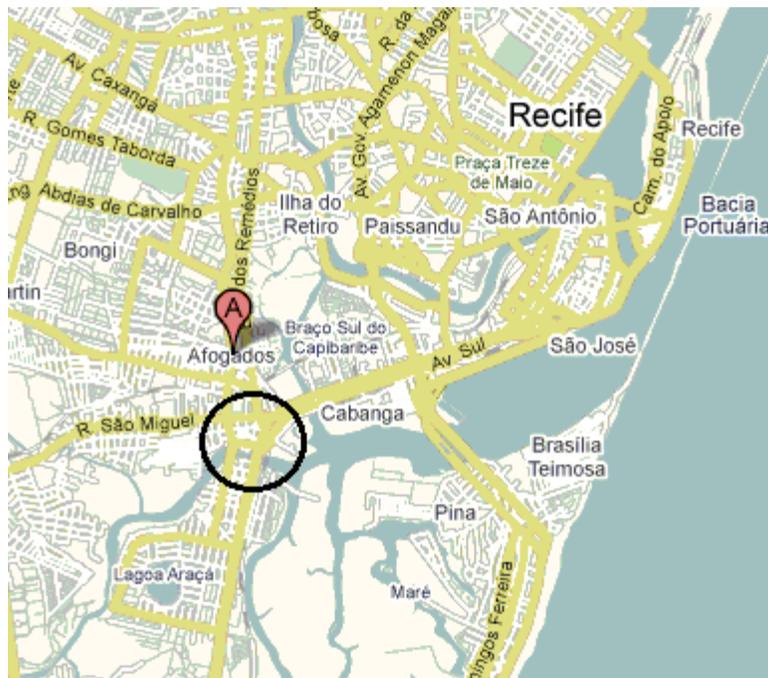


Figura 2.1: Destaque geográfico da região em estudo.

Capítulo 3

Teoria de tráfego

3.1 Elementos básicos

Nas sub-seções seguintes, descreveremos os elementos básicos do tráfego (veículo, motorista e estrada) enfocando as características consideradas essenciais para a elaboração do estudo em questão.

3.1.1 O veículo

A mecânica clássica usualmente é subdividida em três partes: estática, cinemática e dinâmica. As propriedades estáticas do veículo são comprimento e peso. As propriedades cinemáticas, vinculam-se com o movimento do veículo e são por consequência diretamente relacionadas a velocidade e aceleração. As propriedades dinâmicas relacionam-se com as forças que atuam sobre o veículo, como por exemplo no processo de frenagem. Abordaremos especificamente os elementos (estáticos e cinemáticos) que incidirão no processo da simulação.

As dimensões do veículo afetam a largura da faixa e o ângulo de visão do motorista em relação ao carro líder, que segundo Winsum [10], impactam na percepção de distância por parte do motorista. Drew [3], relaciona o peso do veículo, com a habilidade de mudança da velocidade do veículo.

O movimento de cada veículo α do fluxo de tráfego, que esteja em uma determinada faixa e avenida, pode ser descrito através das variáveis quanto: ao tamanho do veículo l_α ; sua posição em relação ao início da faixa em que se encontra x_α , uma velocidade $v_\alpha = dx_\alpha/dt$; e a aceleração $a_\alpha = \frac{dv_\alpha}{dt} = \frac{d^2x_\alpha}{dt^2}$.

As características inerentes próprias do veículo, a avenida e faixa em que ele se encontra, e outros parâmetros relevantes para simulação atual, serão descritos na seção 7.4.

3.1.2 O motorista

Boer [11], Drew [3], e Lieu [12] apresentam a complexidade de modelagem do ato de dirigir, por ser uma tarefa complexa que requer habilidades únicas a cada indivíduo, uma das principais, é a capacidade de reagir a uma determinada situação, e tomar rapidamente uma decisão baseada na mesma.

As características de cada indivíduo, influenciam de forma ímpar na condução do veículo. No estudo de fluxo de tráfego, é indispensável realizar uma análise de tais características, buscando identificar os fatores humanos que impactam no comportamento dos motoristas no trânsito, tais como: mudança de faixas; ultrapassagens; escolha da velocidade; entre outras. Motoristas tendem a percorrer uma rota origem-destino na melhor relação tempo-distância, observando, por exemplo, a segurança e o conforto. Neste estudo, não consideraremos elementos mais complexos, como a fadiga, tédio, instabilidade mental ou emocional.

Segundo Drew [3] a percepção e o tempo de reação do motorista são os elementos chaves para a operação eficiente do veículo; Groeger [13] relacionou estes fatores ao grau de adaptação do condutor ao veículo no contexto fisiológico, e estrutural. Por exemplo, se o veículo possibilita um campo visual melhor ao motorista, torna-o mais apto a perceber o que está acontecendo a sua volta, e assim torna a operação do veículo mais segura.

Na ação de dirigir, o condutor avalia sua posição em relação aos demais veículos do trânsito, e ao ambiente de tráfego presente, num determinado instante de tempo; considerando sempre uma margem de segurança para evitar acidentes, e assim determina sua reação ao volante.

3.1.3 A estrada

Segundo Drew [3], a prática de construir estradas data do período da descoberta da roda a quase 6000 anos atrás. Entre a invenção da roda e o automóvel, o conceito básico da construção de estradas, estava baseado na celeridade de criação. Preocupações, como tipo de pavimento, iluminação e geometria, tornaram-se relevantes a partir do momento, em que o cresci-

mento desordenado das cidades e o uso cada vez mais efetivo do automóvel, começaram a impactar e dificultar a fluidez nas estradas. A geometria da estrada, será o único elemento considerado.

3.2 Fluxo de tráfego

Ashton [14], TRB [15] e Maerivoet [5]; definem o fluxo de tráfego pela equação 3.1, que relaciona a quantidade de veículos N , que passa em um detector durante um determinado período de tempo T_{mp} . No caso de múltiplas faixas, pela equação 3.2, que computa o somatório do quantitativo de veículos nas i faixas.

$$q = \frac{N}{T_{mp}}, \quad (3.1)$$

ou em caso de múltiplas faixas,

$$q = \frac{1}{T_{mp}} \sum_{i=1}^I N_i, \quad (3.2)$$

O fluxo de tráfego é composto por veículos conduzidos por motoristas, onde cada motorista possui características próprias na forma de dirigir, e cada veículo tem características próprias. Assim, cada veículo com motorista pode ser considerado como uma única entidade, cujas características afetam o fluxo de tráfego. Modelos de tráfego que consideram estas entidades, suas características e interações entre elas, são denominados como microscópicos.

Considerando-se dois veículos em um fluxo de tráfego de uma determinada avenida com uma única faixa, sempre existirá uma ordem entre os veículos, devido a impossibilidade de ultrapassagens. Tomando-se dois veículos que se seguem numa certa avenida, conforme Figura 3.1, o primeiro que entra será sempre o primeiro a sair. A distância entre o veículo α e o $\alpha - 1$ imediatamente a frente, é dada pela medida S_α expressando a distância do para-choque traseiro do veículo a frente ao para-choque dianteiro do veículo seguinte, e representada através da equação

$$S_\alpha = x_{\alpha-1} - x_\alpha - l_{\alpha-1}, \quad (3.3)$$

onde $x_{\alpha-1}$ representa a distância relativa do veículo $\alpha - 1$ em relação a origem da avenida e $l_{\alpha-1}$ o seu comprimento.

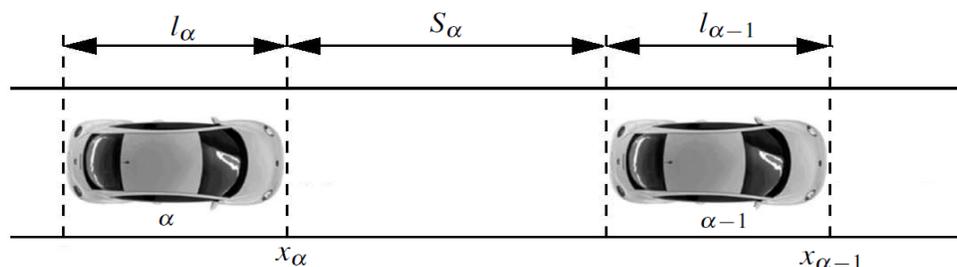


Figura 3.1: Representação de veículos consecutivos em uma mesma faixa do fluxo de tráfego.

O TRB [15], ressalta que o fenômeno do tráfego representa um processo não linear de alta complexidade, diretamente relacionado com as interações entre veículos, com o comportamento dos motoristas, e quantidade de veículos. O fluxo de tráfego pode ser ininterrupto, ou seja, sem elementos externos que interferem no fluxo, tais como semáforos, placas de parada obrigatória ou outros elementos que reduzam significativamente o fluxo veicular; ou interrompido com a presença destes elementos. A análise do fluxo interrompido torna-se mais complexa em virtude de não depender apenas das interações entre veículos, pois também deve se contabilizar o impacto das interrupções.

De acordo com Helbing [16] e Maerivoet [5], o fluxo de tráfego em uma auto-estrada, pode ser caracterizado das seguintes formas:

- Fluxo livre - os veículos podem escolher livremente sua velocidade.
- Fluxo de tráfego sincronizado - esta fase ocorre em um trecho de tráfego ininterrupto, onde os veículos de uma faixa, tendem a manter a mesma velocidade; e quando a avenida tem várias faixas, existe a tendência para ocorrência do mesmo efeito em todas as faixas, refletindo o termo sincronizado, e gerando blocos de deslocamento de veículos, cujas velocidades variam em conjunto.
- "*Wide Moving Jam*" - é um congestionamento que move-se na direção do fluxo, o deslocamento é regido pelo nível de interação entre os veículos.

3.3 Densidade

O TRB [15] define densidade de tráfego, expressando-a em unidades de número de veículos por quilômetros. O conceito de densidade abstrai totalmente as condições do tráfego, e considera apenas a quantidade de veículos no fluxo de tráfego num determinado instante de tempo. Uma forma de computarmos a densidade, é tirando uma fotografia aérea de uma determinada avenida com uma única faixa, e calcula-se o somatório do quantitativo de carros dividido pelo comprimento da faixa,

$$k = \frac{N}{K}, \quad (3.4)$$

com N representando a quantidade de veículos e K o comprimento da faixa. No caso de várias faixas teremos

$$k = \sum_{i=1}^I k_i = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^I N_i \quad (3.5)$$

onde N_i representa a quantidade de veículos nas i faixas e k_i as densidades parciais de cada faixa.

3.4 Velocidade média

Maerivoet [5] apresentou uma abordagem, de tomar a velocidade instantânea de todos os veículos na região em um determinado instante de tempo, e obter a velocidade média, através da média aritmética destes valores.

$$v_s = \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N v_{\alpha}, \quad (3.6)$$

3.5 Ocupação

Maerivoet [5] avalia que a ocupação ρ representa a "densidade real" da estrada, pois relaciona-se com o espaço físico que todos os veículos ocupam na estrada.

$$\rho = \frac{1}{K} \sum_{\alpha=1}^N l_{\alpha} \quad (3.7)$$

onde l_{α} representa o comprimento do α -ésimo veículo e K o comprimento da faixa.

3.6 Relação fundamental da teoria de fluxo de tráfego

Diversos autores [3, 5, 15, 14, 17] apresentam resultados empíricos no estudo de fluxo de tráfego ininterrupto, que indicam uma relação determinística entre densidade, fluxo e velocidade média. Esta relação, é a fundamental da teoria de fluxo de tráfego, sendo expressa através da equação $q = kv_s$ e graficamente representada através da Figura 3.2, conhecendo duas destas grandezas, podemos determinar a outra. Porém, enfatiza-se aqui, que a forma funcional $v = q(k)$ continua desconhecida.

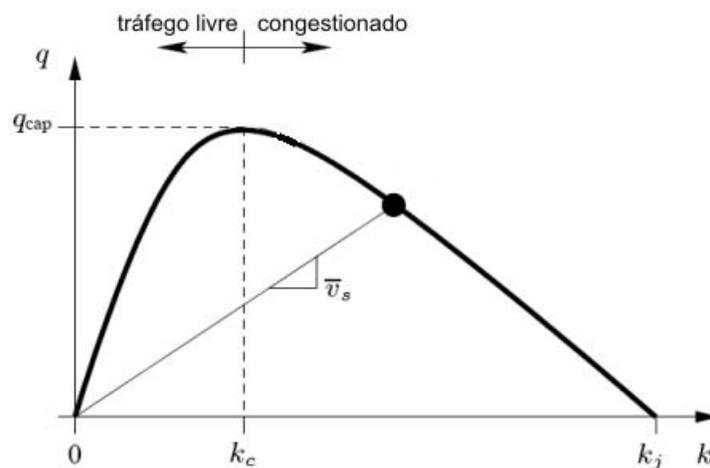


Figura 3.2: Diagrama fundamental relacionando a densidade k ao fluxo q . A capacidade de fluxo q_{cap} é alcançada na densidade crítica k_c .

Verificamos na Figura 3.2, que na região de tráfego livre, o fluxo aumenta praticamente de forma linear com o aumento da densidade. O tráfego congestionado, inicia-se ao atingirmos a capacidade de fluxo, e conseqüentemente

o valor crítico para a densidade. A partir deste ponto, o fluxo começa a decair com o aumento da densidade, iniciando-se o regime de tráfego congestionado.

Maerivoet [5] indica que a velocidade média v_s , pode ser obtida a partir do fluxo e da densidade, contudo duas restrições precisam ser atendidas:

- As variáveis precisam ser contínuas ou termos uma aproximação muito suave delas;
- Caso o tráfego seja composto por sub-fluxos, os mesmos precisam ser homogêneos (mesmo tipo de veículos), e quando a existência de tráfego estacionário em diferentes momentos e localidades, estes precisam se apresentar graficamente parecidos com uma função linear (através de visualização num gráfico cumulativo).

Em diversas partes do mundo, resultados empíricos para fluxo e ocupação, tem sido coletados de forma direta através da utilização de detectores, que contabilizam a quantidade de veículos que passam em um determinado ponto da estrada, com fluxo ininterrupto, durante um determinado período de tempo, e constataam a ocorrência da zona de tráfego livre e o surgimento da densidade crítica.

Chowdhury [18] analisa, que caso a densidade seja suficientemente pequena, a velocidade média dos veículos praticamente independem da interação mútua entre os veículos. Contudo com o aumento da densidade, os veículos começam a mover-se de forma mais lenta, e em virtude do surgimento do efeito da interação entre os veículos, o fluxo tende a incrementar até um valor limite, que é atingido ao alcançarmos uma densidade crítica. A natureza da variação do fluxo com a densidade ainda não esta claramente entendida.

A Figura 3.3, apresentada por Chowdhury [18], traz dados empíricos da avenida expressa *Queen Elizabeth* em Ontário no Canadá relacionando fluxo e ocupação; em ocupações baixas a curva apresenta um crescimento praticamente linear, por outro lado para ocupações altas as flutuações praticamente impedem a avaliação funcional direta da forma da curva. Cada ponto da Figura 3.3, corresponde a uma média de veículos que passam em um detector instalado na avenida, sobre o tempo de 5 minutos.

Em sua análise, Chowdhury [18] verificou, que a utilização da média dos fluxos para uma determinada faixa de densidade, resultaria em uma representação esquemática mais conveniente para a relação fluxo e densidade;

apresentando a Figura 3.4, que traz, um conjunto de possíveis formas funcionais do diagrama fundamental do tráfego, que são consistentes com dados empíricos.

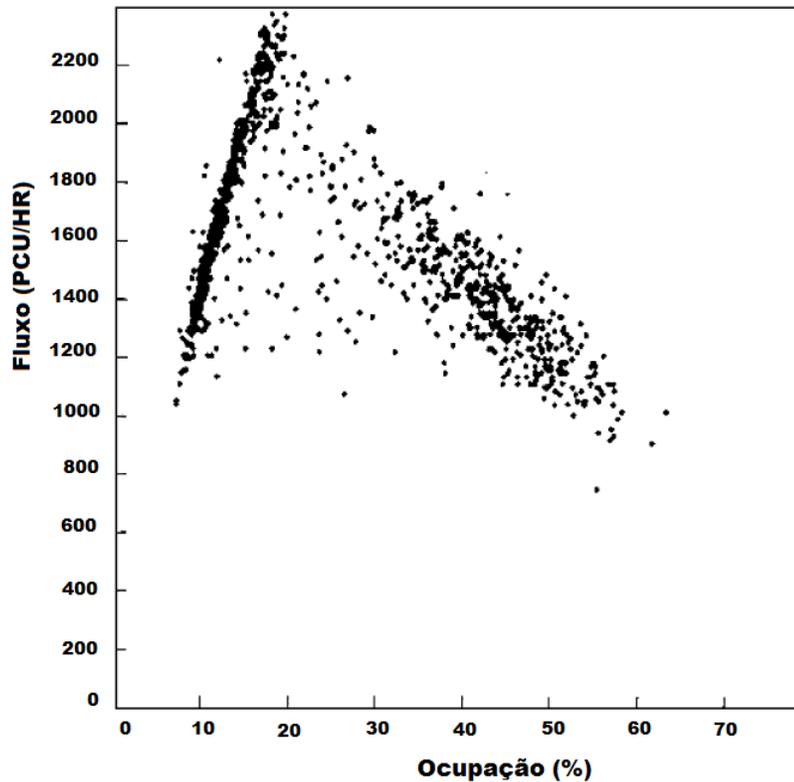


Figura 3.3: Dados empíricos para fluxo e ocupação de avenida expressa no Canadá.

Gilchrist [19] e Chowdhury [18] destacam, que na literatura, não existe um consenso de como deveria ser avaliada a forma funcional da relação fluxo e densidade; diversas abordagens são realizadas encontrando valores distintos para os mesmos conjunto de dados. Algumas técnicas, dividem os dados entre dois grupos e realiza-se uma regressão linear para cada grupo, e o máximo é definido através da intersecção entre as duas retas; outras tratam os dados como sendo linear para um grupo e polinomial para o outro; também propõe-se que o conjunto de dados deve ser tratado como um todo ajustando funções polinomiais ou algumas funções de densidade de probabilidade, sem

no entanto ter como base nenhuma informação a priori.

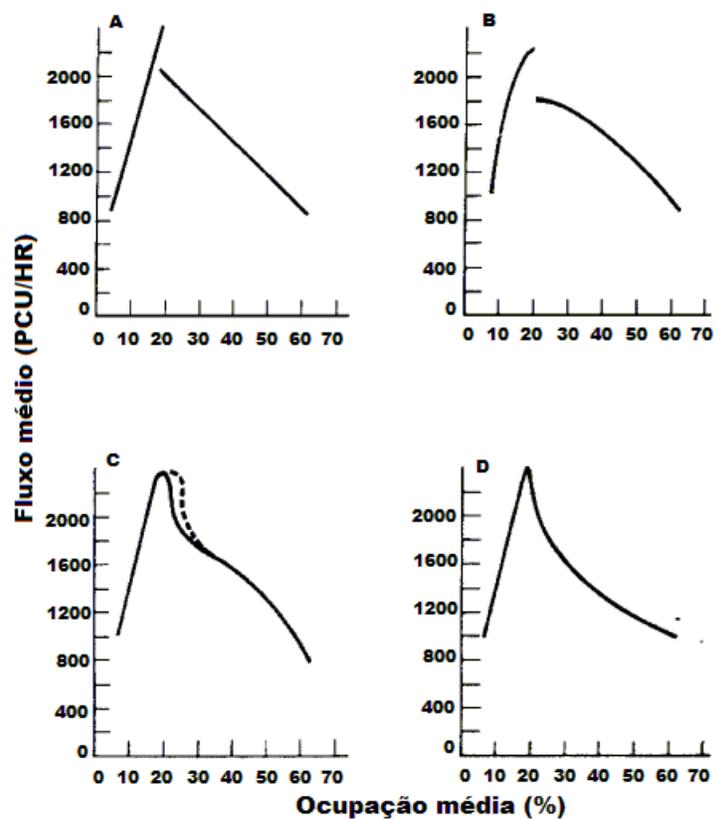


Figura 3.4: Representação esquemática para fluxo e ocupação, consistente com investigações empíricas, mostrando formas de transição de tráfego livre para congestionado.

Capítulo 4

Distribuições estatísticas

4.1 Distribuição uniforme

A distribuição uniforme é constante dentro de um determinado intervalo (a, b) e zero em caso contrário e sua densidade é dada pela equação:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A probabilidade de uma observação em um intervalo $c \leq x \leq d$ dentro de um intervalo (a, b) é igual a $(1/(b-a))$ vezes o tamanho do intervalo ou :

$$P(c \leq x \leq d) = \int_c^d f(x)dx = \frac{d-c}{b-a} \quad (4.1)$$

Neste trabalho, a distribuição uniforme descreve a escolha da faixa de um veículo ao entrar em uma das avenidas de acesso a região; e o comportamento do motorista para uma mudança de faixa comportamental voluntária.

4.1.1 Geração de números aleatórios uniformemente distribuídos

Utilizaremos o gerador de números pseudo-aleatórios uniformes "*Multiple With Carry*" (MWC) proposto por Marsaglia [20, 21, 22], que concatena resultados de dois geradores MWC de 16 bits, para produzir um resultado de 32 bits. Os geradores MWC de 16 bits tem forma: $x_{n+1} = [ax_n + c_n] \text{mod} 2^{16}$,

$y_{n+1} = [by_n + d_n] \bmod 2^{16}$, onde a e b são multiplicadores (Marsaglia [22] indica como uma boa escolha os valores $a = 1800$ e $b = 30903$), c_n e d_n são os correspondentes valores de sobra (*carry*) resultantes das 16 bit multiplicações em nível n , e o símbolo *mod* representa a operação módulo (resto da divisão). O período deste gerador é dado por $(a \times 2^{15} - 1)(b \times 2^{15} - 1)$, aproximadamente acima de $2^{59} 6 \times 10^{17}$ para a escolha $a = 18000$ e $b = 30903$.

O gerador é implementado em linguagem C, utilizando inteiros sem sinal de 32 bits (*unsigned long*), armazenando x_n e y_n em palavras baixas, os valores "*carry*" c_n e d_n em palavras altas, com apenas duas instruções:

```
x=a*(x&0xFFFF) + (x >> 16);
y=b*(y&0xFFFF) + (y >> 16);
```

onde o inteiro sem sinal pseudo-aleatório a ser utilizado é calculado concatenando-se as duas palavras baixas através da instrução

```
(x<<16) + (y&0xFFFF).
```

Finalmente, antes de utilizar o gerador, precisa-se definir dois valores sementes (*seeds*) para x_n e y_n , e dois valores iniciais para *carry* c_n e d_n , respectivamente em palavras baixas e altas. O seguinte código em C,

```
static unsigned long x=1,y=2;
#define xnew (x = (18000*(x&0xFFFF) + (x >> 16)))
#define ynew (y = (30903*(y&0xFFFF) + (y >> 16)))
#define MWC1616 ((xnew << 16) + (ynew&0xFFFF))
```

declara variáveis estáticas inteiras sem sinal x e y , inicializadas com valores 1 e 2 em palavras baixas, e valor inicial zero para "*carry*" em palavras altas, e pode ser utilizado sucessivamente, por exemplo através da linha

```
u=MWC1616;
```

para gerar uma sequência de números pseudo-aleatórios, com valores entre 1 e $2^{32} - 1$.

4.2 Distribuição normal

A distribuição normal é uma das mais utilizadas em estatística aplicada, e segundo Drew [3] ela é utilizada em engenharia de tráfego, como modelo para descrever a distribuição das velocidades instantâneas dos veículos em determinado instante de tempo. Baseado nestes elementos, descreveremos as velocidades instantâneas de entrada de cada veículo na região e as velocidades máximas permitidas adotadas por cada motorista, como sendo normalmente distribuídas em um intervalo de 40 a 80km/h com um desvio padrão de 10km/h.

De fato, a adoção da distribuição normal truncada para as velocidades máximas permitidas (ou, "velocidades máximas desejadas") para cada veículo, não faz parte do modelo IDM original, mas segundo Santos [23], acrescenta um ingrediente ao modelo capaz de induzir congestionamentos mesmo na ausência dos obstáculos. Evidencia-se que o fato de existirem carros com diferentes velocidades máximas desejadas, causa uma competição entre eles, mesmo na estrada sem obstáculos, e o comportamento coletivo torna-se mais realista, ou seja, ao invés de todos os veículos andarem em paralelo com a mesma velocidade, carros mais rápidos tentam ultrapassar os carros mais lentos; como nem sempre isto é possível, resulta-se em congestionamentos.

A densidade da distribuição normal é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}, \quad (4.2)$$

onde μ é o parâmetro de localização (valor médio), e σ é o desvio padrão.

4.2.1 Geração de números aleatórios normalmente distribuídos

Utilizaremos a transformação de Box e Muller [24], para gerar números aleatórios normalmente distribuídos. Uma técnica para geração destes números é descrita por Walck [25], que demonstra a geração de variáveis independentes e que seguem uma distribuição normal padrão, através da transformação de duas variáveis uniformemente distribuídas e independentes v_1 e v_2 . William [26] apresenta o código abaixo, que utilizando duas variáveis uniformes pelo método MWC1616, e com uma transformação de coordenadas, nos permite a geração de aleatórios normalmente distribuídos.

```
#include<math.h>
float gasdev (long*idum);
{
    float ran1(long*idum);
    static int iset=0;
    static float gset;
    float fac,rsq,v1,v2;
    if(*idmu<0)iset=0;
    if(iset==0){
    do{
        v1=MWC1616;
        v2=MWC1616;
        rsq=v1*v1+v2*v2;
        }while(rsq?1.0 ?|| rsq==0.0);
    fac=sqrt(-2.0*log?(rsq)/rsq);
    gset=v1*fac;
    iset=1;
    return v2*fac;
    }
    else{
        iset=0;
        return gset;
    }
}
```

Para visualizar a aplicabilidade do método, geramos 10^6 números normalmente distribuídos, na forma $N(0,1)$, divididos em 200 intervalos de classes, representando-os graficamente conforme a Figura 4.1.

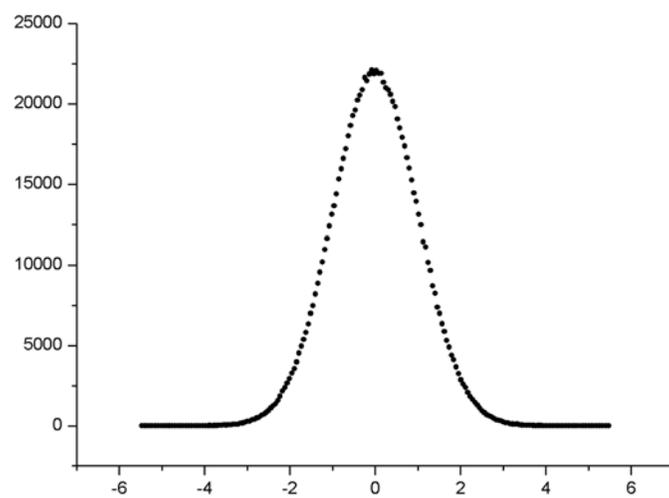


Figura 4.1: Números pseudo-aleatórios gerados pelo método Box-Muller na forma $N(0, 1)$.

Capítulo 5

Modelos de simulações

5.1 Características

Os modelos de simulação computacional para descrição dos fenômenos observados no fluxo de tráfego veicular, normalmente são fundamentados em modelos matemáticos, que descrevem seu comportamento aplicando os princípios das leis da física.

O TRB [15] apresenta uma descrição das principais características dos espectros de modelos de simulação computacional utilizados para descrição do tráfego veicular :

- Variáveis de estado - os modelos devem ter a capacidade de representar o estado do sistema em qualquer instante de tempo, podendo ser do tipo discreto ou contínuo;
- Eventos - devem prever a coleta de dados de todas as mudanças de estado do sistema, como por exemplo: a posição do veículo, uma mudança semafórica, e outras;
- Regra de processamento - define como a variável tempo, muda em um determinado intervalo no qual ocorrerá uma transição de estado do sistema. Duas formas comuns são utilizadas, supondo-se um intervalo de tempo $[t_1, t_2]$, no primeiro caso, avalia-se o estado do sistema diretamente sobre o tempo t_2 (final do intervalo) e no segundo caso, avalia-se uma taxa de mudança $\Delta x(t)$ durante o intervalo de tempo, na forma $\Delta x = \delta x(t)\Delta t$ entre os tempos t e $t + \Delta t$. Outro fator importante, é definir

se os atributos utilizados para as variáveis dos modelos, serão determinísticos ou estocásticos;

- Regra da mudança de estado - o modelo pode avaliar a mudança de estado baseado em eventos (intervalos de tempo variáveis) ou no tempo (intervalos de tempo equidistantes), sendo que os baseados em eventos, avançam de um evento para o outro, sem se preocupar com as interações intermediárias entre cada evento, já os baseados no tempo, levam em consideração explícita o avanço do tempo.

5.2 Classificação

Hoogendoorn [27] agrupou os modelos em relação ao nível de detalhamento, com o qual ele representa o fluxo de tráfego nas seguintes classificações:

- Submicroscópicos - Descrevem as características individuais de cada veículo (velocidade, aceleração máxima, origem-destino), incluindo detalhes do comportamento do motorista (paciente agressivo, desatento, etc), como o veículo é conduzido (mudança de marchas, frenagens, etc);
- Microscópicos - Em analogia com os modelos sub-microscópicos, também descrevem as características individuais de cada veículo, com menos detalhes, e suas interações com o fluxo de tráfego (por exemplo uma mudança de faixa é tratada como um fenômeno estocástico, sem consideração das propriedades individuais de cada motorista);
- Mesoscópico - Não define os caminhos individuais origem-destino (rotas) para os veículos, mas especifica um comportamento probabilístico. O tráfego é representado por um conjunto de pequenas entidades (veículos);
- Macroscópicos - Não distingue as partes constituintes do tráfego, descrevendo-o em alto nível de agregação.

A escolha do modelo a utilizar, depende do nível de detalhamento necessário para expressar os fenômenos de tráfego desejados. Para os objetivos deste trabalho, utilizaremos um modelo microscópico por permitir a coleta

de dados do fluxo de tráfego veicular a partir das informações individuais de cada veículo num determinado instante de tempo, e por refletir uma situação mais próxima da realidade, tendo em vista que os veículos adotam uma rota definida (origem-destino), no entanto sem considerar os hábitos de comportamento e as habilidades do motorista na condução do veículo.

Hoogendoorn [27] e Brackstone [4], apresentam uma grande variedade de modelos microscópicos, mas neste trabalho enfocaremos nos modelos do tipo siga o carro-a-frente ("*car-following models*") que representam um dos principais processos em todos os modelos de simulação microscópicos, bem como na teoria moderna do fluxo de tráfego.

5.3 Modelos *car-following*

Segundo Hoogendoorn [27], desde os anos sessenta, estes modelos representam a base para um grande número de estudos científicos, e foram elencados e categorizados conforme segue:

5.3.1 Modelos que utilizam distância segura

Esta abordagem, ilustrada por Leutzbach [28], considera que o veículo α imediatamente atrás do veículo $\alpha - 1$ deve manter uma distância segura afim de evitar uma colisão, desta forma algumas restrições são impostas:

- tempo de percepção - percepção do motorista que existe um obstáculo;
- tempo de decisão - necessário para o motorista avaliar a situação após identificar o obstáculo;
- tempo de frear - aplicação do freio;
- distância de frenagem - espaço que o veículo percorre até a parada total do veículo.

Assim, a distância S_α deve ser computada baseando-se nas características individuais do motorista, quanto a sua habilidade ao dirigir (percepção, decisão e ação), as do veículo e da estrada (velocidade do veículo, coeficiente de atrito μ , etc) afim de evitar uma colisão na forma,

$$S_{\alpha+1}(v) = S_{\alpha} + Tv + \frac{v^2}{2\mu g} \quad (5.1)$$

onde S_{α} é a distância entre o carro α e o carro $\alpha - 1$ a frente, T é o somatório dos tempos de percepção, decisão e frear, v é a velocidade do veículo e μ o coeficiente de atrito entre o veículo e a estrada.

5.3.2 Modelos estímulo-resposta

Nesta abordagem, o motorista imediatamente atrás reage de acordo com o comportamento do veículo a frente, ou seja, se um acelera ou desacelera o outro reage da mesma forma. Como exemplo temos o modelo de Chandler [29]

$$a_{\alpha}(t + T) = \gamma(v_{\alpha-1}(t) - v_{\alpha}(t)), \quad (5.2)$$

onde $v_{\alpha}(t)$ e $a_{\alpha}(t)$ representam a velocidade e a aceleração do veículo α no instante t e γ representa a sensibilidade do motorista perceber o comportamento do veículo a sua frente.

5.3.3 Modelos psico-espacial

Aperfeiçoa o modelo anterior, inserindo a lógica de que quando o espaço livre S_{α} é muito pequeno ou muito grande, e as velocidades v_{α} e $v_{\alpha-1}$ sofrem pequenas alterações, não ocorrem reações do motorista do veículo α devido a limites de percepção. Este modelo adota duas regras básicas:

- Quando as distâncias forem grandes, as reações não serão influenciadas pela diferença de velocidades;
- Em distâncias muito pequenas, não ocorrerão reações por causa da pequena variação relativa do movimento.

5.4 A escolha do modelo

Na literatura científica mundial, ainda não existe um consenso sobre a relevância dos componentes individuais destes modelos, para a descrição

dos efeitos de maior interesse para o fenômeno de tráfego veicular urbano. Diversos modelos, com escalas diferentes de detalhamento e com diferentes ingredientes, continuam sendo utilizados para modelar diversas situações, por exemplo: uma cidade como um todo; ou um cruzamento de ruas. Novas propostas e observações continuam sendo publicadas.

Dentre os diversos modelos existentes avaliamos e selecionamos o "*Intelligent Driver Model*" (IDM), proposto por Treiber e colaboradores [8, 7], que possui as seguintes características:

- Utiliza as leis da física para definir as posições de cada veículo;
- Aderente as leis e aos fenômenos da teoria de fluxo de tráfego, e livre de acidentes por levar em consideração o movimento relativo;
- Todos os parâmetros do modelo possuem interpretação palpável;
- Testes com dados empíricos foram realizados nas rodovias de tráfego livre da Holanda e da Alemanha;
- Permite uma rápida computação numérica.

Capítulo 6

O IDM

Treiber e Helbing [7] modelaram o IDM, baseado em um sistema de equações diferenciais acopladas, não lineares, que só pode ser resolvido numericamente. Considerando-se dois veículos consecutivos e mantendo-se a notação definida na Figura 3.1, teremos que:

$$\Delta v_{\alpha}(t) = v_{\alpha}(t) - v_{\alpha-1}(t), \quad (6.1)$$

$$S_{\alpha} = x_{\alpha-1} - x_{\alpha} - l_{\alpha-1}, \quad (6.2)$$

Onde x_{α} , v_{α} e l_{α} são respectivamente a posição, velocidade e comprimento do veículo α .

Este modelo, utiliza uma distância de segurança S_0 entre dois veículos consecutivos, em regime estacionário. Estabelece acelerações a_{α} e desacelerações b_{α} máximas permitidas para os veículos; uma velocidade máxima desejada v_0^{α} , aceleração máxima desejada a^{α} e um tempo de reação T (somatório dos tempos de percepção, decisão frenagem) para os motoristas. Além disto, insere um componente exponencial δ , que reflete o quanto um motorista irá acelerar o veículo, para alcançar sua velocidade máxima desejada.

No IDM, o deslocamento de um determinado veículo é definido através de sua aceleração, sendo esta influenciada por dois fatores:

1. pelo desejo do motorista em atingir a sua velocidade máxima e;
2. garantia de que o veículo, sempre estará a uma distância de seguimento do veículo a frente S^* , de forma que, em uma eventual parada brusca

deste, ele tenha tempo de efetuar a frenagem e manter a distância mínima estacionária de segurança.

A distância de seguimento, representada através da equação 6.3, é definida em função da distância de segurança, e incrementada por um valor máximo, que se relaciona com a diferença de velocidade entre os dois veículos, com a velocidade instantânea, com as acelerações e desacelerações máximas do veículo, e com o tempo de reação do motorista.

$$S^*(v, \Delta v) = S_0 + \max\left(Tv_\alpha + \frac{v_\alpha \Delta v_\alpha}{2\sqrt{ab}}, 0\right), \quad (6.3)$$

onde S_0 é a distância mínima permitida entre dois veículos (distância de segurança em regime estacionário), T é o tempo de reação, a_α e b_α são respectivamente a aceleração e a desaceleração máxima do veículo α .

A função da aceleração para cada veículo, é dada pela expressão,

$$\frac{\partial v_\alpha}{\partial t} = a^\alpha \left[1 - \left(\frac{v_\alpha}{v_0^\alpha}\right)^\delta - \left(\frac{S^*(v_\alpha, \Delta v_\alpha)}{S_\alpha}\right)^2 \right], \quad (6.4)$$

onde a^α e v_0^α são respectivamente a aceleração máxima e a velocidade máxima desejada por um determinado veículo α , S^* a distância de segurança ao veículo da frente, e δ relaciona-se com o comportamento do motorista, e indica o quanto a aceleração decresce quando a mesma se aproxima da velocidade desejada.

A equação 6.4, indica uma tendência de aceleração

$$a^\alpha \left[1 - (v_\alpha/v_0^\alpha)^\delta \right], \quad (6.5)$$

quando o veículo α for o líder (não existe outro veículo a sua frente), comporta-se de forma a atingir sua velocidade máxima desejada v_0^α . Por outro lado, quando existir um veículo a frente, o termo $(S^*(v_\alpha, v_{ver})/S_\alpha)^2$ indica uma tendência de desaceleração proporcional a distância S_α entre os dois veículos e a distância mínima desejada S^* . Tais intervalos, variam dinamicamente de acordo com as condições do fluxo de tráfego. O descolamento de cada veículo para cada intervalo de tempo, é determinado através da equação,

$$x_\alpha(t + \Delta t) = x_\alpha(t) + v_\alpha \Delta t + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial t} (\Delta t)^2, \quad (6.6)$$

sendo incrementado em cada intervalo de tempo Δt , de forma a explicitar o fluxo de tráfego veicular.

O IDM original, numa via sem obstáculos tem comportamento trivial (todos os veículos trafegam em paralelo), sem identificação do limite para a capacidade da rua. Santos [23] introduziu uma distribuição gaussiana para velocidades máximas desejadas, e verificou o surgimento de engarrafamentos numa única avenida sem obstáculos, porém, sem observação da densidade crítica.

Capítulo 7

Construção do software

7.1 A linguagem de programação

Simular um ambiente, utilizando técnicas de equações diferenciais não lineares acopladas, onde o tempo é a variável independente e os intervalos discretos tendem a ser mínimos, de forma a representar o mais próximo possível o movimento contínuo dos veículos, englobando os fenômenos de tráfego veicular, tais como: troca de faixas, de avenidas, semáforos, e ultrapassagens; exige técnicas de programação, que permitam o desenvolvimento de um código computacional que utilize o mínimo dos recursos de hardware, de forma a viabilizar a própria elaboração do projeto.

Adotou-se a linguagem C, por permitir o mínimo de abstração computacional, e ao mesmo tempo, a possibilidade de gerenciamento da memória por parte do programador.

7.2 O ambiente de desenvolvimento

O requisito básico definidor do ambiente a ser utilizado, foi a "amigabilidade" na análise e correções de erros de programação. Assim, inicialmente foi utilizado o ambiente *Microsoft Visual C++ 6.0*, para elaboração do esboço e testes de funcionalidade da estrutura do programa. Os testes foram plenamente satisfatórios e a ferramenta adotada como base para o desenvolvimento do programa; entretanto, com a implementação do algoritmo para solução do sistema das equações diferenciais não-lineares acopladas, e aumento do quantitativo de veículos, necessitou-se de maiores funcionalidades

e recursos de análise de erros e falhas de programação; neste ponto a ferramenta deixou de atender o requisito básico necessário para análise de tais problemas, originando a necessidade da utilização de um ambiente mais eficiente, e que ao mesmo tempo fosse amplamente compatível com os códigos já implementados, desta forma, migrou-se o ambiente para o *Microsoft Visual C++ 2005*, que trata-se de uma versão mais atualizada do ambiente inicialmente adotado.

7.3 Os requisitos de máquina

7.3.1 Hardware

Recursos de Hardware utilizados:

- 01 Processador AMD *Sempron* 3500+
- Memória RAM de 512MB
- Placa de video com suporte para resolução de 1280x800 *pixels*
- HD de 60 GB

7.3.2 Software

Recursos de Software utilizados:

- Sistema *Microsoft Windows XP Professional* - sistema operacional;
- *Microsoft Visual C++ 2005* - ambiente de programação;
- *Google Earth* - seleção e busca das imagens geograficas da região em estudo;
- *CorelDraw X3* - ferramenta gráfica para edição, junção, e realce das imagens com enfoque nas vias de tráfego da região;
- *Microsoft Visio 2007* - elaboração dos diagramas de blocos representativos da lógica do programa;
- *Origin 8.0* - consolidação dos dados e elaboração dos gráficos;
- *Adobe Acrobat Reader 7.0* - leitura e verificação do texto da dissertação.

7.4 A codificação

Durante o processo de planejamento para desenvolvimento do software, de simulação do tráfego veicular nesta região, elencou-se três elementos básicos:

- As avenidas - considerando suas dimensões, quantidade de faixas, cruzamentos, e semáforos;
- Os veículos - analisando-se como uma unidade, o conjunto carro e motorista, e de acordo com o tipo de veículo definindo suas características de tamanho, capacidade de aceleração, velocidades máxima e mínima permitida, e estabelecendo-se o trajeto desejado por cada motorista, ou seja, onde ele está e para onde quer ir;
- As regras de tráfego - sentido de fluxo dos veículos em cada avenida e/ou faixa, manobras possíveis de acordo com a sinalização existente, possibilidade de mudanças de faixas e ultrapassagens.

7.4.1 As avenidas

O primeiro passo foi a aquisição de uma imagem da região, através do *Google Earth*; posteriormente com o intuito de criar uma relação de escala entre a imagem adquirida e a região, mediu-se as dimensões de uma estação do metrô. Assim, definiu-se a resolução de 1200x850 *pixels* para apresentar a região desejada. Com uma aplicação gráfica, e uso do *mouse*, identificou-se os pontos centrais do início e fim de cada segmento de reta (armazenada em arquivo texto), que representa vetorialmente (direção, sentido e tamanho) uma avenida na aplicação. A partir destes dados, realiza-se uma única vez, no início do programa, o cálculo para definição das posições de cada faixa e seus respectivos vetores unitários. A quantidade de faixas de cada avenida, com seus respectivos sentidos, e disposição dos semáforos também foram verificados em campo e armazenados em arquivo texto.

Na Figura 7.1, apresentamos a região em estudo, indicando os sentidos de fluxos permitidos, as seis avenidas de entrada (00, 20, 18, 41, 25, 44) e as sete de saída (26, 15, 09, 11, 13, 40, 43), de fluxo de tráfego veicular da região, enumerados de acordo com um identificador único, que representa a primeira ou última avenida de acesso à região. A construção da malha

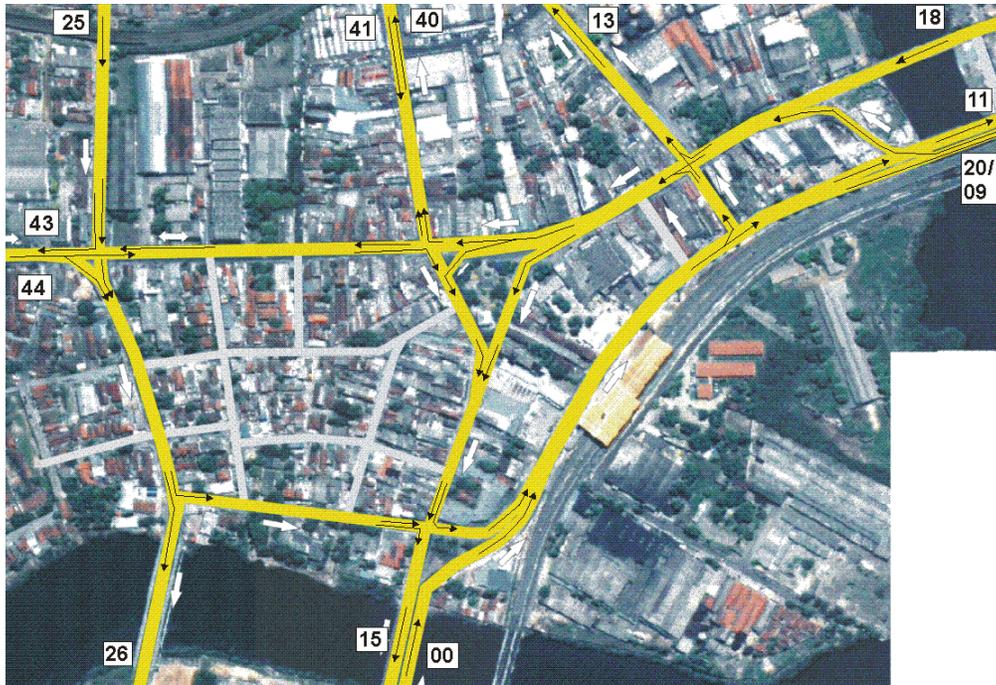


Figura 7.1: Imagem da região de Afogados

viária se deu através das interconexões destes vetores que representam as avenidas. Entretanto, a geometria da estrada apresenta curvas que foram modeladas como estradas de uma única faixa, assim por exemplo: uma curva em uma avenida de 3 faixas foi tratada como diversas avenidas de uma única faixa, permitindo conectar avenidas consecutivas. Desta forma teremos dois tipos de avenidas:

- Avenidas principais - aquelas que possuem mais de uma faixa, normalmente ocupadas por uma grande ou média quantidade de veículos e modeladas matematicamente de forma a permitir a mudança de faixas;
- Avenidas secundárias - possuem uma única faixa, tamanho pequeno, normalmente ocupadas por um ou no máximo dois veículos, e interligam avenidas principais faixa a faixa.

Os cruzamentos das avenidas, foram identificados em campo, de forma a contemplar na modelagem, todas as opções de manobras possíveis para um

veículo, estando em uma determinada avenida e em uma determinada faixa, conseguir manobrar de acordo com as regras de trânsito e as necessidades para atingir um determinado destino.

Os semáforos foram modelados como elementos pertencentes as avenidas, de forma que, um veículo ao entrar nesta, detecta a presença do semáforo e se comporta de acordo com sua indicação (siga ou pare), em caso de pare, reduz gradativamente sua velocidade, do contrário mantém seu comportamento. Salienta-se que não foi contemplado nesta simulação a condição de semáforo em alerta (amarelo). As avenidas possuem, uma estrutura que armazena dinamicamente dados vetoriais dela própria, das suas faixas, indica a existência de semáforos incluindo sua condição, e além disto armazena uma fila de veículos ordenados de acordo com a entrada nesta.

7.4.2 Os veículos

Considerado como uma unidade do conjunto (carro + motorista), cada um deles possui características próprias quanto ao tamanho (caminhão, ônibus, veículo de passeio) e velocidade máxima desejada. Seu deslocamento ocorre seguindo os vetores da avenida e faixa em que se encontra.

Evidentemente cada motorista ao entrar na região em estudo através de uma das avenidas de acesso, já tem pré-definido o local para onde ele deseja seguir, ou seja, seu destino. Assim, ele já delinea uma rota, de acordo com as possibilidades de manobras existentes no seu caminho, analisando de forma antecipada, em qual faixa ele deve permanecer para otimizar um acesso a um determinado cruzamento, e assim realizando mudanças de faixas e ultrapassagens para otimizar e alcançar de forma mais rápida seu destino.

Para representar a escolha do destino, modelamos a Tabela 7.1 que define as possíveis rotas (origem - destino) e as probabilidades de escolha destas por parte dos motoristas, baseados não em todas as combinações das avenidas de entrada e saída, mas apenas naquelas em que as regras de trânsito assim o permitiam. Assim, as seis avenidas de entrada, foram mapeadas para todos os sete destinos possíveis e cada motorista, ao entrar na região, escolhe de forma probabilística o seu destino.

Para cada linha da Tabela 7.1, foi criado um arquivo texto contendo indicações de manobras (mudanças de avenidas e de faixas), para que um determinado veículo permaneça na rota desejada e alcance seu destino. Estas informações não definem um comportamento determinístico, tendo em

Tabela 7.1: Rotas de acordo com as avenidas de entrada na região e destinos possíveis, com suas respectivas probabilidades.

Rota	Entrada	Saída	Probabilidade
0	00	15	0,1
1	00	13	0,2
2	00	11	0,3
3	00	40	0,1
4	00	43	0,2
5	00	09	0,1
6	18	13	0,1
7	18	15	0,5
8	18	40	0,1
9	18	43	0,3
10	25	11	0,2
11	25	13	0,2
12	25	15	0,2
13	25	26	0,3
14	25	43	0,1
15	44	09	0,1
16	44	11	0,4
17	44	13	0,1
18	44	15	0,1
19	44	26	0,2
20	44	40	0,1
21	20	15	0,5
22	20	43	0,5
23	41	09	0,5
24	41	15	0,3
25	41	43	0,2

vista, que um veículo na rota desejada, pode decidir mudar de faixa de forma aleatória, para uma outra faixa da avenida, que também faça parte de sua rota. Caso ao entrar na avenida seguinte, a faixa na qual ingressou não pertença a sua rota, ele tentará mudar de faixa para seguir a rota desejada. Assim destacamos dois tipos de mudança de faixas:

- Mudança obrigatória - é a situação em que o veículo encontra-se em

uma faixa de avenida, de forma que não o permitirá atingir o próximo cruzamento, em uma posição que o permita manobrar para a avenida seguinte a rota desejada, logo o motorista decide deterministicamente pela mudança de faixa;

- Mudança aleatória - o veículo esta em uma faixa que o permite realizar manobras necessárias para atingir a rota desejada, mas uma mudança de faixa a direita e/ou a esquerda ainda o mantém em tais condições, desta vez o motorista pode ou não querer mudar de faixa, e tal decisão vai ser estabelecida através de uma distribuição uniforme com 40% de probabilidade de mudança.

As informações de cada rota são armazenadas em arquivo texto, onde para cada faixa da avenida, existe um parâmetro sinalizador ao veículo para tomada de decisão quanto à mudança de faixa, tais parâmetros são expressos na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Parâmetros definidores das ações de cada veículo em uma determinada rota para atingir seu destino

Parâmetro	Ação
0	Não muda de faixa
1	Muda para faixa a esquerda de forma aleatória (uso futuro)
2	Muda para faixa a direita de forma aleatória (uso futuro)
3	Veículo em rota, muda para faixa a esquerda de forma aleatória
4	Veículo em rota, muda para faixa a direita de forma aleatória
5	Veículo fora de rota, muda para faixa a esquerda de forma obrigatória
6	Veículo fora de rota, muda para faixa a direita de forma obrigatória
7	Veículo em rota pode mudar para faixa da direita ou esquerda

O fluxo de tráfego terá diversos tipos de veículos, existindo em um determinado instante uma proporção entre estes. Nesta modelagem, os tipos e suas

proporções são representados na Tabela 7.3, onde a probabilidade de um veículo ser de um determinado tipo, segue uma distribuição uniformemente distribuída.

Tabela 7.3: Tipos, características e probabilidades de criação dos veículos.

Tipo	Tamanho (m)	Velocidade máxima desejada km/h	Probabilidade de criação (%)
1	3	80	40
2	8	40	20
3	8	50	10
4	3	60	30

Os veículos tipo 1 e 4, possuem velocidades máximas desejadas diferentes, unicamente para expressar um comportamento identificado em dados empíricos descritos por Guan [17], que classifica dois tipos de motoristas em uma zona de tráfego livre: um que tenta atingir a velocidade máxima da via para fluir o mais rápido possível; e o outro que é regido de forma comportamental pela região urbana de tráfego em que se encontra (atentando para pedestres e demais situações externas as interações entre veículos).

Para simplificar o modelo, foram utilizados os mesmos valores de aceleração e desaceleração máxima permitida para todos os veículos, ao criarmos um veículo e tentarmos inseri-lo no ambiente, ele deve atender a tais condições, caso contrário não entrará e será descartado.

As mudanças de avenidas traz a necessidade de redefinir o conceito de veículo líder, incluindo uma distância de seguimento quando a avenida/faixa seguinte que um veículo ingressará já possua veículos, e desta forma evitando colisões, na Figura 7.2 estabelecemos que tal veículo adotará para efeitos do modelo, uma distância $S_\alpha = S_1 + S_2$, compatível com a equação 6.1 na forma

$$S_\alpha = (x_{\alpha-1} - l_{\alpha-1}) + (K_\alpha - x_\alpha) \quad (7.1)$$

onde K_α é o comprimento total da faixa em que se encontra o veículo α .

O tempo é a variável independente do sistema, e a variação definida para avaliar as condições do sistema será a cada 5 centésimos de segundo de forma incremental. O intervalo de tempo inicial para entrada de um veículo em cada faixa das avenidas de entrada, será inicialmente de 8,0 segundos, sendo decrementado a cada 30 minutos (tempo de estabilização do fluxo de

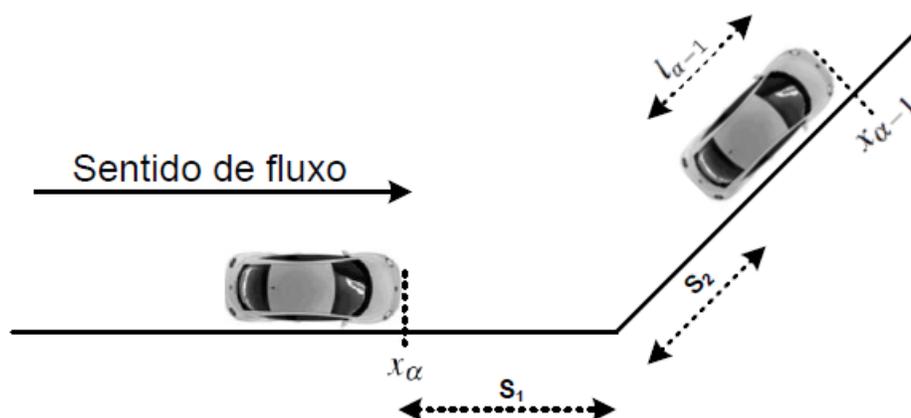


Figura 7.2: Representação esquemática da definição de veículo líder, devido à mudança de avenida.

tráfego) a uma taxa constante de 0,1 segundos, até atingir o valor 0, que é a condição de parada da simulação.

A dinâmica de deslocamento de cada veículo, é estabelecido pelos parâmetros do modelo, e computados individualmente através do método de Euler. Estimado-se um valor para as equações diferenciais utilizando um Δt pequeno, e a partir desse novo valor, recalcula-se o sistema, procedendo-se sucessivamente, até a condição de parada. Desta forma, avaliamos as transições a cada 5 centésimos de segundo, sendo que para efetuar a atualização da tela e visualização do deslocamento dos veículos, adotamos o tempo de 5 décimos de segundos, tempo suficiente para visualizarmos os deslocamentos dos veículos.

Capítulo 8

Fluxogramas

A análise do funcionamento do programa recai inicialmente no entendimento da interação da variável independente no programa, conforme abaixo:

- TG - Tempo global do ambiente de simulação (relógio) em segundos, inicia-se em zero, e varia em intervalos ΔTG de 0,05 segundos, tempo no qual são avaliados e gerados os eventos da simulação;
- TTELA - Tempo acumulativo para apresentação em tela das mudanças de estado da simulação, permitindo visualizar os deslocamentos de forma mais efetiva, inicializado com 0,5 segundos e é incrementado em intervalos de $\Delta TTELA$ de 0,5 segundos;
- TLOG - Tempo de coleta dos dados e registro em memória para futura análise da simulação, inicializado com o valor de 300 segundos e incrementado por $\Delta TTELA$ também em 300 segundos;
- TESTAB - Tempo de estabilização de uma mudança de fluxo de entrada para outra, varia a cada 1800 segundos;
- TFLX(i) - Intervalo de tempo de inserção de um veículo na i-ésima faixa de uma das avenidas de entrada, inicializado com o valor de 8 segundos para todas as faixas das avenidas de entrada, e decrementado em 0,1 segundos após decorrido o tempo de estabilização;
- TSEMAFORO(i) - Tempo de mudança de estado do i-ésimo semáforo, definido em 60 segundos.

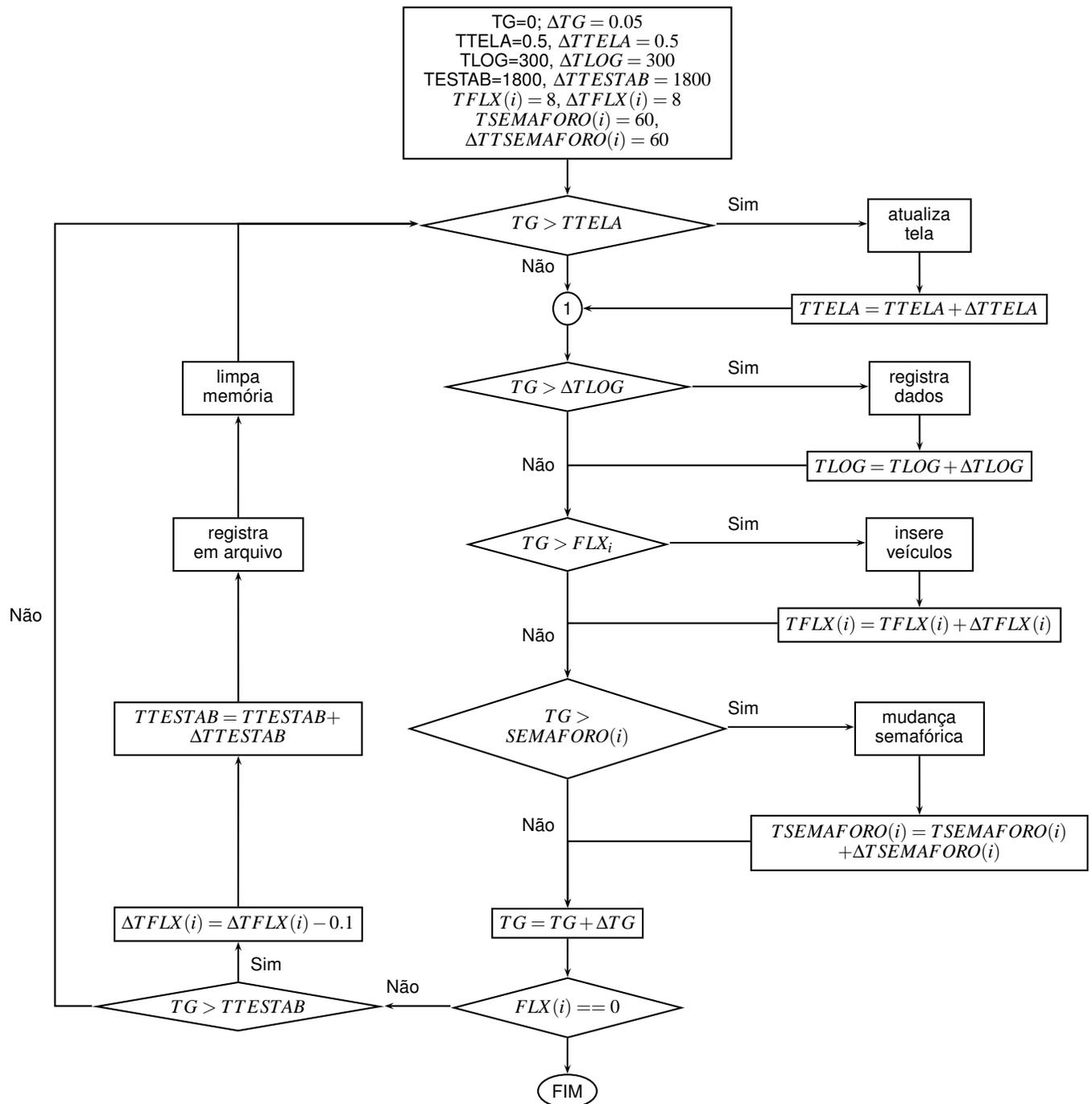


Figura 8.1: Lógica global da simulação.

A Figura 8.1, apresenta a lógica global da simulação em torno da variável independente TG (tempo geral no ambiente da simulação) e as sequências das avaliações e ações de acordo com o decorrer do tempo. Sempre são computadas as mudanças de estado de todos os veículos; até que um intervalo de tempo, de entrada de veículos de 0 segundos, determina a condição de término da simulação.

Os veículos estão localizados nas avenidas, que por sua vez possuem faixas, ao calcularmos, sempre tomamos inicialmente o primeiro veículo (o líder) de cada faixa, e em seguida o imediatamente atrás. Definimos um vetor ordenado de avenidas, iniciando pelas de saída da região até finalmente atingirmos as avenidas de entrada, ou seja, primeiro calculamos os veículos que estão mais próximos a sair da região em estudo, e por último os que estão iniciando a entrada.

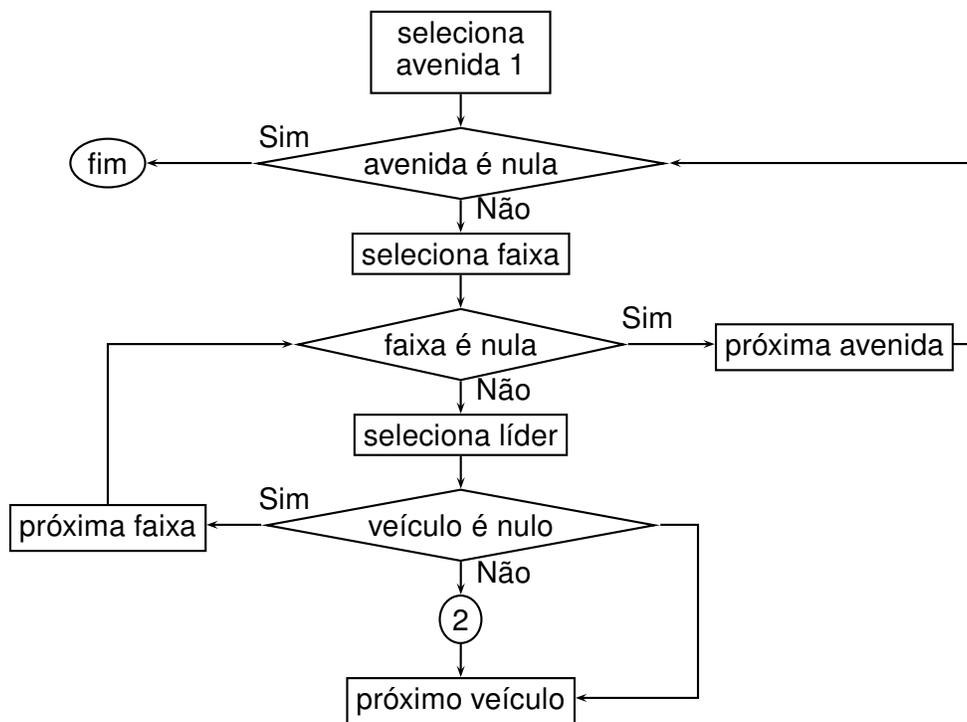


Figura 8.2: Processamento das avenidas e veículos.

Na Figura 8.2 visualizamos a dinâmica de seleção ordenada das avenidas, para avaliar os dados dos veículos presentes nela. Assim, a primeira avenida

do vetor ordenado é selecionada, iniciando-se o cálculo na primeira faixa desta, seleciona-se o veículo líder e segue-se até o último veículo da faixa (calculando seus valores), em seguida toma-se a próxima faixa até atingir a última faixa da avenida, e desta toma-se a próxima avenida do vetor ordenado, seguindo-se sucessivamente até atingir a última posição do vetor.

Cada veículo possui uma estrutura que armazena informações quanto: a distância deste ao início da avenida em que se encontra; o tipo e o tamanho total da avenida em que se encontra.

Na Figura 8.3, verificamos o comportamento do sistema para avaliação da posição do veículo em relação a avenida e faixa em que se encontra, onde a partir do cálculo do seu deslocamento, verifica-se o espaço percorrido, definindo a sua posição em relação ao início da faixa, ao final da avenida e a rota (origem - destino) pré-estabelecida; indicando assim, a necessidade de mudança de faixa ou avenida.

As mudanças de faixas, consideram a necessidade do motorista para atingir o destino desejado (cumprir a rota), conforme a Tabela 7.1; seguindo as definições dos parâmetros de manobras possíveis da Tabela 7.2. Cada rota possui uma vinculação com um arquivo texto, que detalha as manobras possíveis (permissões) para um determinado veículo manter-se ou não na faixa em que se encontra.

A Figura 8.4, traz a lógica das mudanças de faixas, onde o parâmetro permissão (Perm) indica, conforme a Tabela 7.2, as manobras possíveis. As mudanças aleatórias são permitidas com uma probabilidade uniforme de 40% e consolidadas, caso as condições de segurança, que incluem os limites máximos de aceleração e desaceleração dos veículos e a garantia de manutenção das distâncias mínimas de segurança entre os veículos, sejam atendidas. Além disso, caso "Perm=7" a escolha de mudança para a direita ou a esquerda, também ocorrerá de forma uniforme, sendo que desta vez, com 50% de probabilidade para cada faixa.

A avaliação do quanto cada veículo irá se deslocar em um intervalo de tempo ΔTG , dependerá da sua posição em relação aos outros veículos da avenida e faixa em que se encontra, caso ele seja o primeiro da faixa e não exista, de acordo com sua rota, nenhum outro veículo na próxima faixa que ele irá, a aceleração será computada conforme a equação 6.5, caso contrário a avaliaremos de acordo com a equação 6.4, nas Figuras 8.5, 8.6 e 8.7, apresentamos os fluxogramas para estas avaliações.

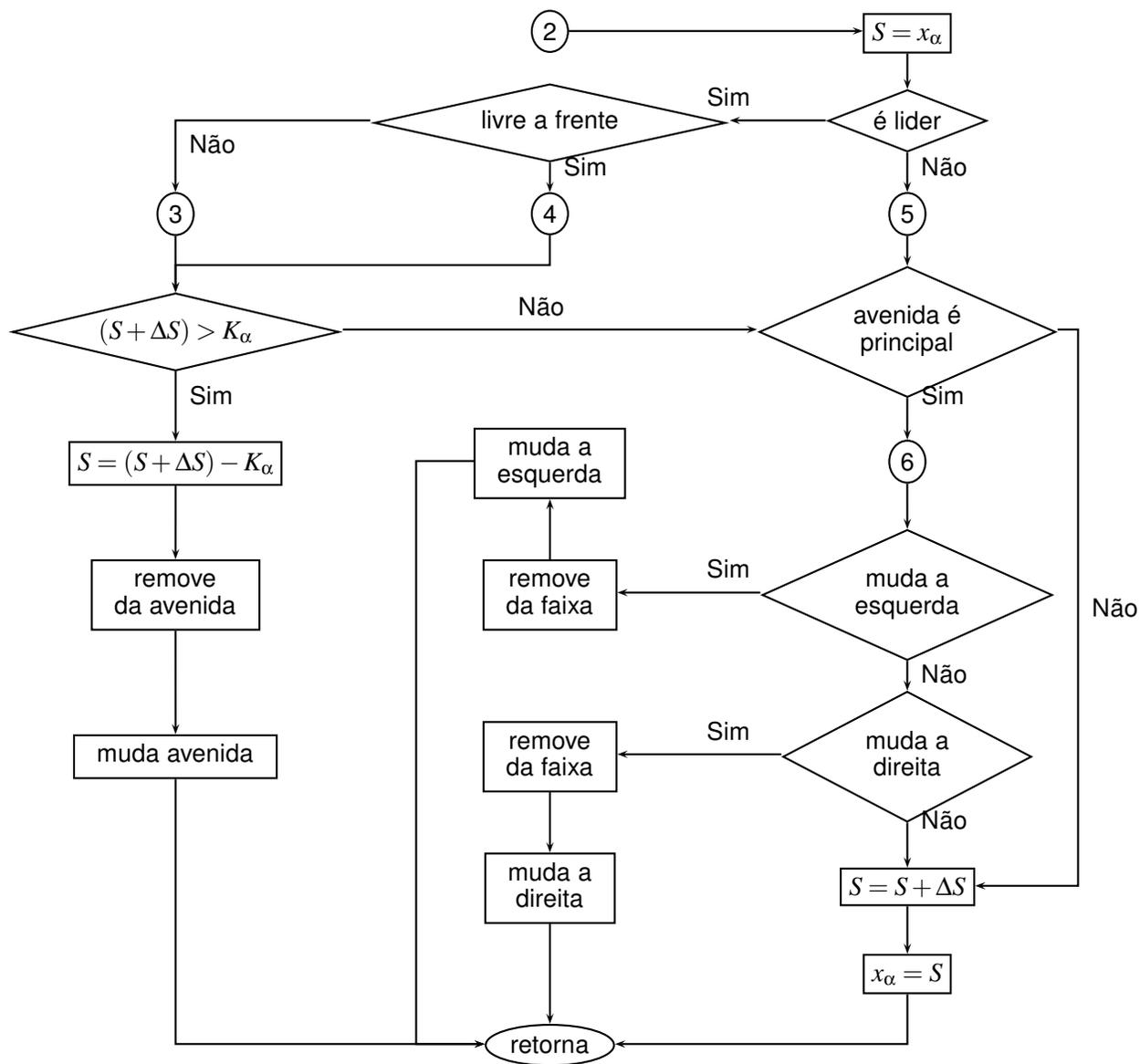


Figura 8.3: Lógica do deslocamento dos veículos.

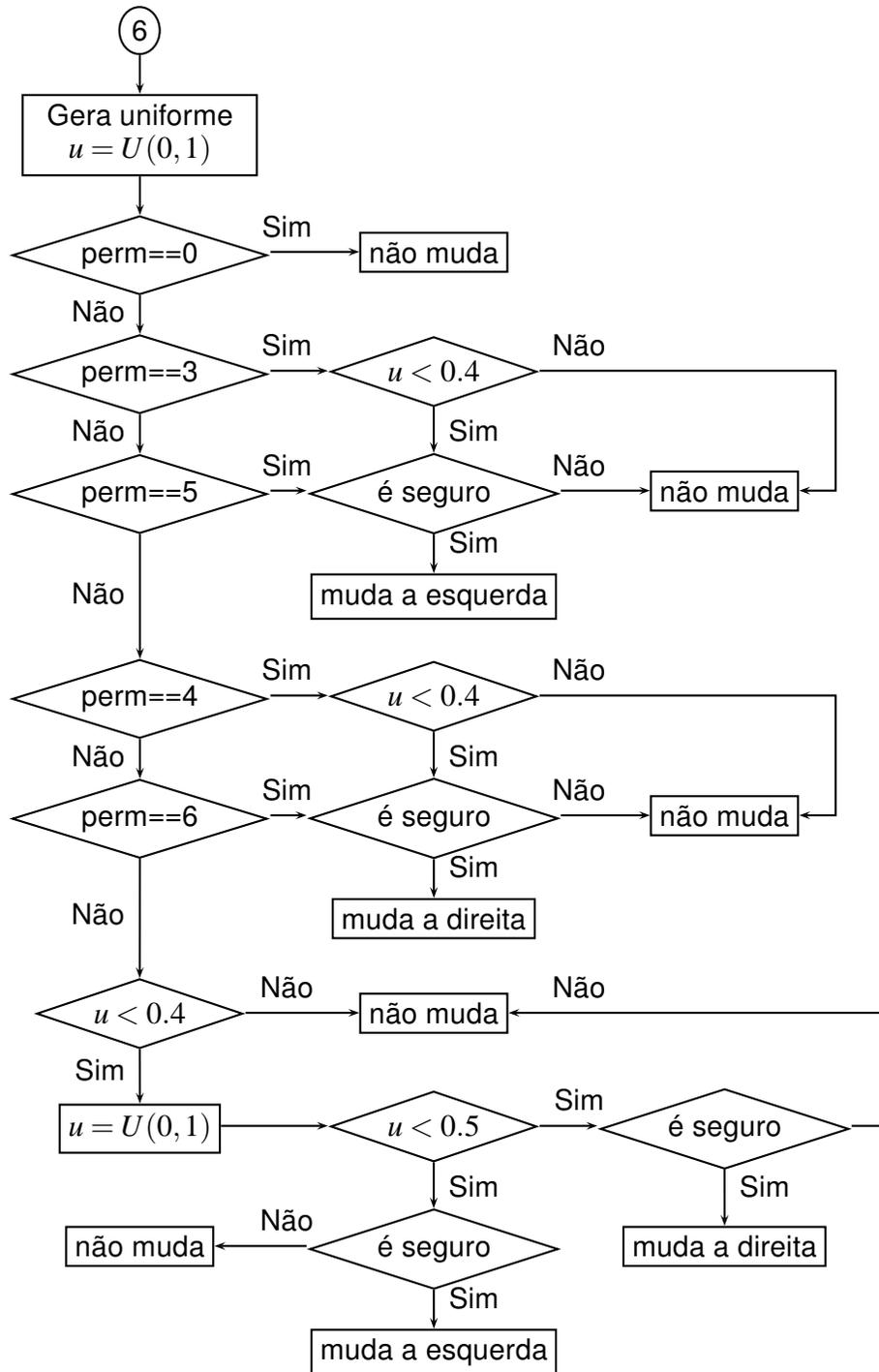


Figura 8.4: Avaliação de mudança de faixa.

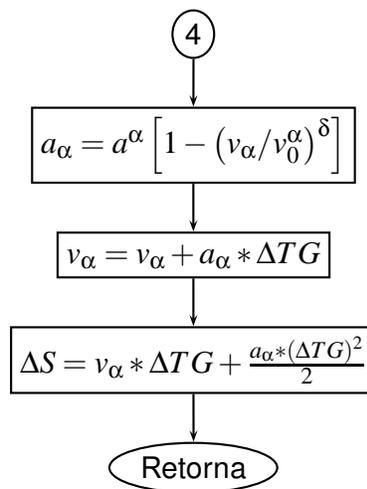


Figura 8.5: Rotina de cálculo do deslocamento para o primeiro veículo (líder) de uma faixa, que não possui nenhum outro veículo na próxima faixa da avenida que ele seguirá.

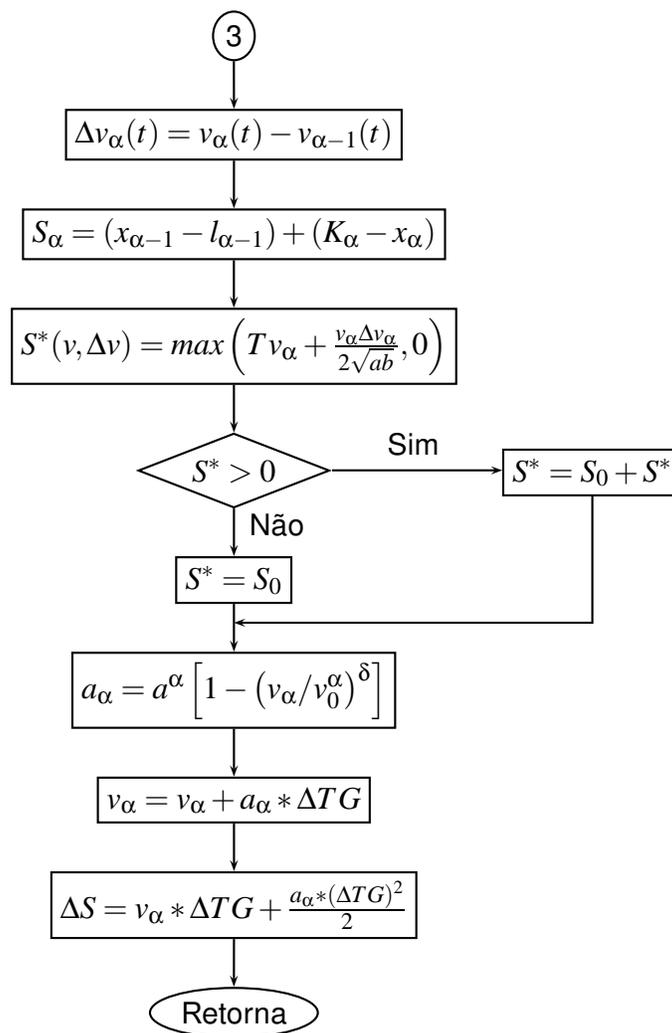


Figura 8.6: Rotina de cálculo do deslocamento para o primeiro veículo de uma faixa, com existência de outro veículo na próxima faixa da avenida que ele ingressará.

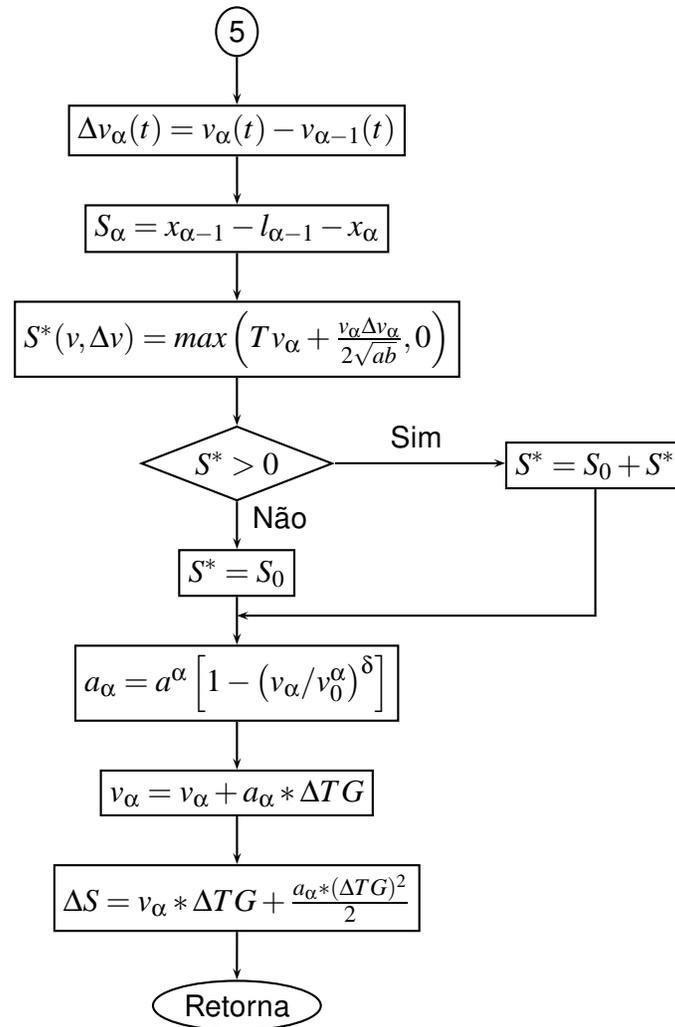


Figura 8.7: Rotina de cálculo para veículos não líder.

Capítulo 9

A simulação

O processo de simulação ocorre sob uma interface gráfica, apresentando a imagem da região de Afogados, Figura 9.1 em uma resolução de 1200x850 *pixels*, visando otimizar a visualização das interações entre os veículos e ao mesmo tempo permitir a representação em escala apropriada dos fenômenos de tráfego.



Figura 9.1: Imagem estática da interface gráfica do simulador em um determinado instante de tempo do processo de simulação.

Toda avenida é composta por faixas paralelas de mesmo tamanho. Visando diminuir a complexidade da simulação, não contemplamos a modelagem das paradas de ônibus, por outro lado, estabelecemos um ciclo semafórico de 120 segundos (60s de pare e 60s de siga) para todos os semáforos de cruzamento de vias e de pedestres.

Antes de inserir um veículo na região, ele é criado de forma a ter suas características únicas bem definidas tais como: rota, velocidade máxima desejada, e tamanho.

Os veículos são inseridos nas avenidas da região, inicialmente a uma taxa dentro da zona de tráfego livre, e em quantidade de acordo com o número de faixas da avenida, ou seja, uma avenida com três faixas recebe simultaneamente três veículos, sendo um em cada faixa; e tendo cada um deles, características próprias individuais. A cada 8s, tenta-se inserir um veículo, rejeitando-o, caso as condições de segurança não sejam atendidas.

Em cada uma das avenidas de acesso a região, foram colocados sensores, para detectar a cada 300s, a quantidade de veículos passantes. Após 1800s (30 minutos), tempo para estabilização do fluxo de tráfego, armazena-se o total de veículos entrantes na região; tira-se uma "fotografia aérea"; contabiliza-se a quantidade de veículos existentes; totaliza-se o somatório das velocidades instantâneas de todos os veículos; e em seguida diminui-se o tempo de inserção de 10s para 9,9s, aumentando-se desta forma o fluxo veicular, este ciclo é mantido recursivamente até atingir o tempo de intervalo de entrada de 0,0s.

Nas primeiras simulações, verificou-se que iniciando-se com o tempo de inserção de 10,0s ou 8,0s, não ocorriam perdas para representar o comportamento do fluxo, tendo em vista que ambos estão amplamente dentro da zona de tráfego livre; por outro lado, a redução do tempo inicial de 10,0s para 8,0s, impacta diretamente no tempo de realização das n repetições, realizadas no processo. Desta forma, realizamos um quantitativo de 10 simulações, iniciando com o tempo de 10,0s e em seguida 100 simulações iniciando-se com um tempo de inserção de 8,0s. Os valores obtidos nas primeiras simulações não foram desprezados, pois também foram utilizados para se obter a média aritmética dos valores de fluxo, ocupação e velocidade média; que representam o extrato (dados brutos) das simulações realizadas.

O fluxo de entrada na região, é definido pela Equação 3.1, que relaciona o somatório das contagens realizadas pelos detectores por unidade de tempo; e a velocidade média na região é obtida pela Equação 3.6, que relaciona as velocidades instantâneas na região com a quantidade de veículos.

As mudanças de faixas, ocorrem de forma a garantir as acelerações e desacelerações máximas permitidas e estabelecer uma distância de segurança estacionária de 2,0 metros, entre o veículo que esta mudando de faixa e os imediatamente a sua frente e atrás após a mudança.

Os parâmetros do modelo seguem os adotados por Santos [23], conforme a Tabela 9.1, que segundo análise do mesmo, "permite uma melhor performance do condutor à atingir sua velocidade desejada, evita possíveis colisões num trânsito intenso ou num processo de mudanças de faixa".

Tabela 9.1: Valores dos parâmetros do modelo.

Parâmetro	Valor
a_{α}	1,5
b_{α}	2,0
T	1,2s
S_0	2,0m
δ	4

Todos os veículos adotam, os mesmos valores de aceleração e desaceleração máximas permitidas, de tempo de reação, de distâncias em regime estacionário, e de comportamento na busca da velocidade desejada, simplificando desta forma a implementação do modelo.

Capítulo 10

Observação e análise dos dados

Os registros dos dados provenientes da simulação computacional, foram tomados levando-se em consideração duas análises distintas: uma das entradas de fluxo de tráfego de forma individual (Figura 10.1 e 10.2), onde o fluxo de tráfego é interrompido (semáforos em cruzamentos de avenidas e passagem de pedestres); e outra de forma a contemplar toda a região em estudo (Figura 10.6 e 10.7). Os dados foram coletados simultaneamente, realizando-se a variação de fluxo de forma gradativa, acompanhando o comportamento da velocidade média na região e a taxa de ocupação das vias de tráfego.

Os dados brutos apresentaram flutuações e ruídos significativos, assim para facilitar a análise, aplicamos mecanismos visando suavizar tais flutuações (categorização dos dados em pequenos intervalos de taxa de ocupação), e ajustar o efeito da concentração de pontos no trecho linear do crescimento do fluxo, permitindo uma visão mais representativa dos efeitos apresentados pela simulação (Figuras 10.3 e 10.4).

Ao analisarmos uma única avenida de entrada, identificamos que a ocupação máxima da via, sobre uma condição semafórica de ciclo constante, acarreta na ocorrência de um quantitativo de pontos elevado, na zona de crescimento linear do fluxo (carros/s), e uma quantidade pequena destes ao atingirmos a saturação da ocupação das vias, relação esta claramente indicada através do decaimento do fluxo de veículos (Figura 10.1) em torno de 40% de ocupação, e do respectivo decréscimo da velocidade média (Figura 10.2) dos veículos desta via.

Realizando uma regressão polinomial de terceira ordem, na forma $y = \beta_0 + \beta_1x^1 + \beta_2x^2 + \beta_3x^3$, onde y é o fluxo e x a taxa de ocupação, sobre os dados brutos, obtemos a relação $y = 0,30666 - 0,0185x + 0,00195x^2 - 2,76654 \times$

$10^{-5}x^3$, indicando uma ocupação crítica de 41,63%, com um fluxo máximo de $0,91998\text{carros/s}$ ou aproximadamente 3312carros/h ; de forma a facilitar a visualização, representamos graficamente na (Figura 10.5) a curva da equação encontrada sobre os dados categorizados.

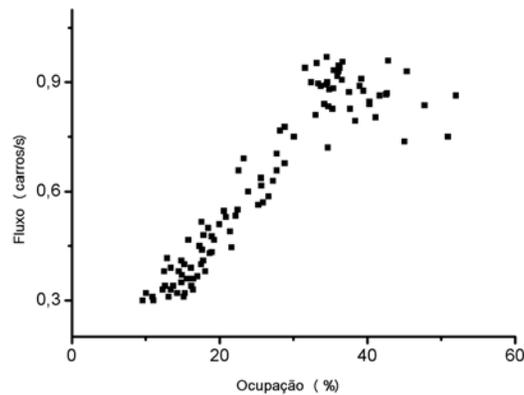


Figura 10.1: Dados da simulação relacionando fluxo e taxa de ocupação para avenida 00.

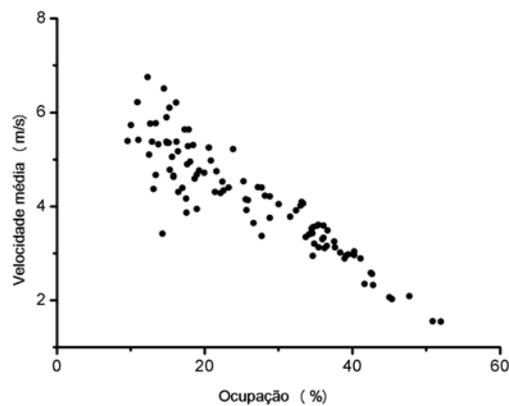


Figura 10.2: Dados simulados relacionando velocidade média dos veículos e taxa de ocupação, para avenida 00.

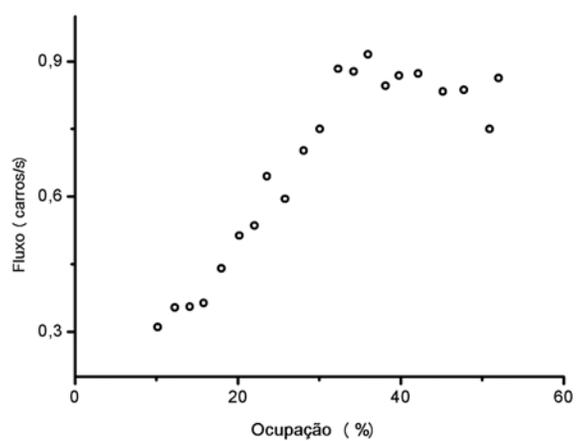


Figura 10.3: Dados categorizados relacionando fluxo dos veículos e taxa de ocupação, para avenida 00.

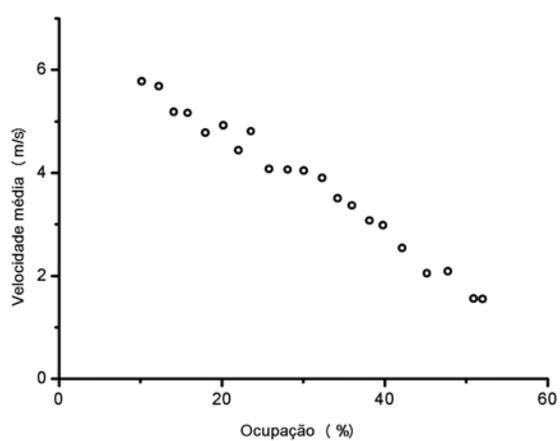


Figura 10.4: Dados categorizados relacionando velocidade média dos veículos e taxa de ocupação para avenida 00.

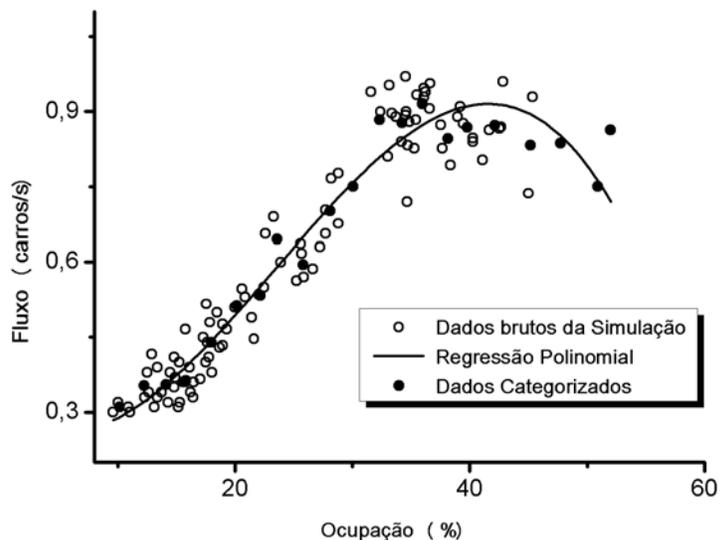


Figura 10.5: Regressão polinomial de 3ª ordem para os dados da avenida 00.

Ao analisarmos a região de forma completa, ou seja, todas as vias de entrada simultaneamente, os dados não atingem a mesma taxa de ocupação máxima apresentada para a entrada individual analisada. A velocidade média, que é um fator que afeta diretamente o tempo de percurso gasto pelos veículos para atravessar a região, continua a indicar um decaimento acentuado, com o aumento da taxa de ocupação (Figura 10.7), no entanto, não ocorre o surgimento da densidade crítica (Figura 10.6) e conseqüentemente, não nos permite inferir sobre o fluxo máximo para a região como um todo. Este fenômeno, relaciona-se com a ocorrência simultânea de diferentes regimes de tráfego nas avenidas existentes na região.

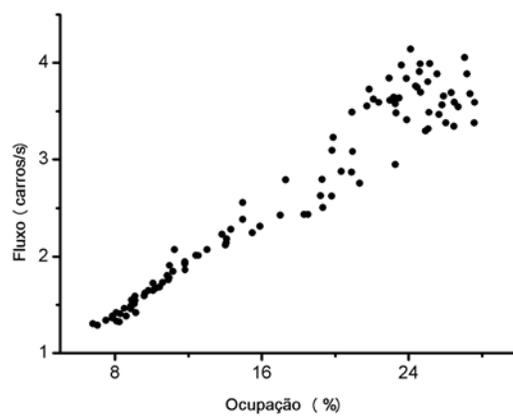


Figura 10.6: Dados brutos coletados relacionando fluxo de veículos e taxa de ocupação, para toda a região.

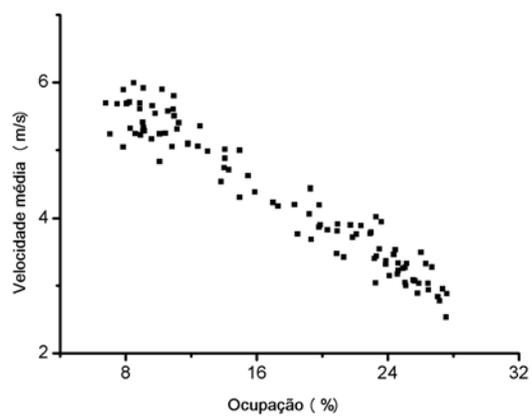


Figura 10.7: Dados brutos coletados relacionando velocidade média e taxa de ocupação, para toda a região.

Capítulo 11

Conclusões

Concluimos que utilizando-se o *Intelligent Driver Model*, através de um processo de simulação computacional, aplicado em uma região urbana, e observando-se uma via (sub-região) de entrada que possua tráfego uniforme, ou seja, não coexistem fases de tráfegos distintos (livre, sincronizado, congestionado), inclusive com incidência semafórica, consegue-se representar de forma significativa, a ocorrência de resultados empíricos na área de tráfego veicular, que relaciona através do seu diagrama fundamental as grandezas fluxo e densidade (taxa de ocupação).

A complexidade da malha urbana, junto com a distribuição gaussiana das velocidades desejadas, exhibe a densidade crítica (máximo da curva fluxo x densidade), tornando-se possível obter uma relação polinomial entre as variáveis fluxo e densidade na forma $y = 0,30666 - 0,0185x + 0,00195x^2 - 2,76654 \times 10^{-5}x^3$, indicando uma ocupação crítica de 41,63%, com um fluxo máximo de 0,91998carros/s ou aproximadamente 3312carros/h.

Definimos a relação fundamental do tráfego, para uma sub-região conforme figura 10.5, que representa de forma satisfatória o comportamento dos dados, nos permitindo inferir o nível de fluidez do tráfego desta entrada, a partir da contagem dos veículos entrantes.

Por outro lado, ao analisar toda a região, não identifica-se a relação fundamental do tráfego, devido a sobreposição de regimes de tráfegos distintos nas diversas avenidas, que provocam variações no comportamento geral do tráfego, ou seja, supondo-se uma região R com um conjunto de sub-regiões $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, que independente de qual regime esteja presente, mas que seja uniforme, ao tomarmos o somatório dos dados em um instante de tempo t que represente todas as regiões, teremos uma sobreposição de dados, em

distintos regimes, culminando em uma situação bem mais complexa que uma região individual.

Obviamente, é extremamente complexo obter-se empiricamente a taxa de ocupação da via, e um valor que indique a velocidade média dos veículos na região, no entanto, a construção de uma matriz de probabilidades de rotas origem-destino, e a contabilização dos veículos de entrada na região, com o estabelecimento de um determinado ciclo semafórico, é factível; tornando-se possível, através de simulação computacional, analisar os fluxos de acesso as sub-regiões, e identificar os segmentos de tráfego com características semelhantes. Desta forma, permitindo estimar a velocidade média para a região, a capacidade de tráfego das sub-regiões e conseguir elementos que permitam reduzir o tempo de percurso dos veículos.

Capítulo 12

Considerações finais

Entendemos, que é necessária uma calibração dos parâmetros do modelo, para refletir o modo de dirigir dos motoristas da região; ajustar o algoritmo de decisão para mudança de faixas, e a matriz de probabilidades de rotas de tráfego desejadas para cada motorista, de forma que tenhamos uma representação mais fidedigna do comportamento de tráfego da região.

Finalmente, salientamos que esta área de estudo é um campo em expansão, e com bastante atividade na produção técnica científica, e estes resultados preliminares, nos aponta a robustez do modelo IDM; estimula a realização de trabalhos futuros, para avançar no sentido de experimentar, avaliar e ajustar o modelo às condições reais da região, de forma a apresentar-se como mais um elemento de apoio as tomadas de decisões por parte dos gestores das vias públicas.

Bibliografia

- [1] DETRAN. Evolução anual da frota de veículos por região. http://www.detran.pe.gov.br/images/stories/estatisticas/HP/1.2_evolucao_anual.pdf, 2008.
- [2] Robert E. Shannon. Introduction to the art and science of simulation. In *WSC '98: Proceedings of the 30th conference on Winter simulation*, pages 7–14, Los Alamitos, CA, USA, 1998. IEEE Computer Society Press.
- [3] Donald R. Drew. *Traffic flow theory and control [by] Donald R. Drew*. McGraw-Hill New York,, 1968.
- [4] Mark Brackstone and Mike McDonald. Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):181 – 196, 1999.
- [5] S Maerivoet and B De Moor. Traffic flow theory. Technical Report physics/0507126. SISTA-IR-2005, Jul 2005.
- [6] Partha Chakroborty. Models of vehicular traffic: An engineering perspective. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 372(1):151 – 161, 2006.
- [7] Martin Treiber and Dirk Helbing. Explanation of observed features of self-organization in traffic flow. [arXiv:cond-mat/9901239v1](https://arxiv.org/abs/cond-mat/9901239v1), 1999.
- [8] Martin Treiber, Ansgar Hennecke, and Dirk Helbing. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Phys. Rev. E*, 62(2):1805–1824, Aug 2000.
- [9] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo demográfico. ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2000, 2000.

- [10] Wim van Winsum. The human element in car following models. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):207 – 211, 1999.
- [11] Erwin R. Boer. Car following from the driver's perspective. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):201 – 206, 1999.
- [12] et al. Henry Lieu. Traffic flow theory: A state-of-the-art report. Technical report, U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration, June 1992. update and expansion of the Transportation Research Board (TRB) Special Report 165, Traffic Flow Theory, published in 1975.
- [13] J. A. Groeger and J. A. Rothengatter. Traffic psychology and behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1(1):1 – 9, 1998.
- [14] Winifred Diana. Ashton. *The theory of road traffic flow / Winifred D. Ashton*. Methuen, London :, 1966.
- [15] National Research Council. *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, 2000.
- [16] Dirk Helbing and Martin Treiber. Critical discussion of synchronized flow. *Cooperative Transport@tion Dyn@mics*, 1:2.1 – 2.24, 2002.
- [17] Wei Guan and Shuyan He. Statistical features of traffic flow on urban free-ways. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 387(4):944 – 954, 2008.
- [18] Debashish Chowdhury, Ludger Santen, and Andreas Schadschneider. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports*, 329(4-6):199 – 329, 2000.
- [19] R S Gilchrist and F L Hall. Three-dimensional relationships among traffic flow theory variables. *Transportation Research Record*, (1225):99 – 108, 1989.
- [20] G. Marsaglia. Keynote address: A current view of random number generators. In *Proc. 16th Symposium on the Interface, Computer Science and Statistics*, Atlanta, March 1985. Elsevier Press.

- [21] G. Marsaglia. Random numbers in c: Some sugestions., January 1999. Posted to electronic bulletin board sci.stat.math.
- [22] G. Marsaglia. The marsaglia random number cdrom, with the diehard battery of tests of randomness. <http://www.stat.fsu.edu/pub/diehard/>, 1996.
- [23] L J R Santos. Generalização do modelo computacional de tráfego veicular idm (intelligent driver model). Master's thesis, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2008.
- [24] G. E. P. Box and Mervin E. Muller. A note on the generation of random normal deviates. *The Annals of Mathematical Statistics*, 29(2):610 – 611, 1958.
- [25] Christian Walck. Hand-book on statistical distributions for experimentalists. Technical Report Internal report SUF-PFY/96-01, Universitet Stockholms, Sept 2007.
- [26] et al. William, H. Press. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. Cambridge University Press, 1992.
- [27] S P Hoogendoorn and P H L Bovy. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 215(4):283 – 303, 2001.
- [28] Wilhelm Leuzbach. *Introduction to the Theory of Traffic Flow*. Methuen, London :, 1988.
- [29] Robert E. Chandler, Robert Herman, and Elliott W. Montroll. Traffic dynamics: Studies in car following. *OPERATIONS RESEARCH*, 6(2):165–184, 1958.