

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

MARCELO PANARO DE MORAES ZAMITH

**Um Modelo de Autômato Celular Aplicado ao
Tráfego Viário com Múltiplos Perfis de Condutores**

NITERÓI

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

MARCELO PANARO DE MORAES ZAMITH

Um Modelo de Autômato Celular Aplicado ao Tráfego Viário com Múltiplos Perfis de Condutores

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de Concentração: Modelagem Matemática.

Orientadora:
Regina Célia P. Leal - Toledo

NITERÓI

2013

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

Z24 Zamith, Marcelo Panaro de Moraes
Um modelo de autômato celular aplicado ao tráfego viário com múltiplos perfis de condutores / Marcelo Panaro de Moraes Zamith.
– Niterói, RJ : [s.n.], 2013.
130 f.

Tese (Doutorado em Computação) - Universidade Federal Fluminense, 2013.
Orientadora: Regina Célia P. Leal Toledo.

1. Ciência da Computação. 2. Autômato. 3. Tráfego urbano. 4. Modelo probabilístico. 5. Condutor; aspecto comportamental. I. Título.

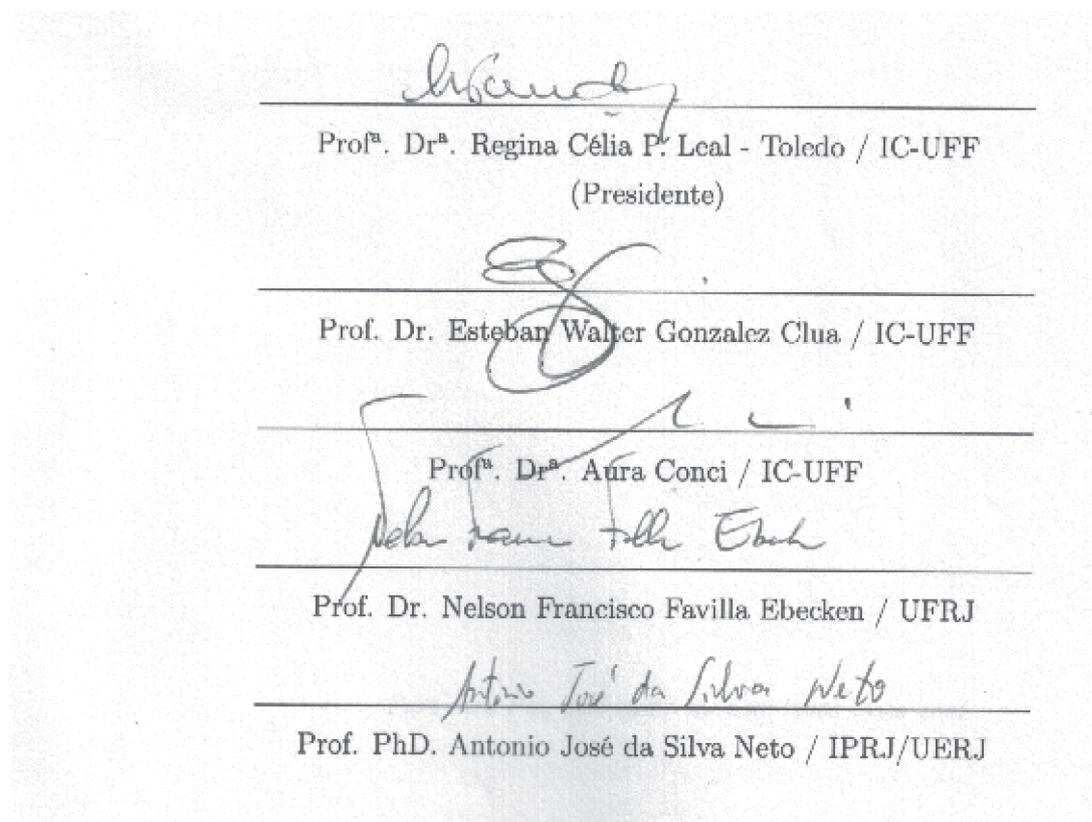
CDD 005.73

Um Modelo de Autômato Celular Aplicado ao Tráfego Viário com Múltiplos Perfis de Condutores

Marcelo Panaro de Moraes Zamith

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor. Área de Concentração: Modelagem Matemática.

Aprovada por:



Niterói, 13 de março de 2013.

Para meu Pai, pelo apoio durante todos esses anos.

Agradecimentos

À minha orientadora, Regina, pelos votos de confiança ao longo dos últimos anos; à Juliana pela paciência e apoio; e aos amigos do Media Lab da UFF.

Agradeço ao CAPES pela bolsa concedida durante dois anos, que possibilitou a aquisição do material necessário para a pesquisa.

Agradeço à FAPERJ, pela bolsa do programa Bolsa Nota 10, concedida nos dois últimos anos da Tese.

Resumo

A saturação da malha viária, devido ao aumento do tráfego urbano e rodoviário, tem se tornado um grande problema para sociedade, implicando diretamente na diminuição da qualidade de vida da população. Vários estudos têm sido realizados com intuito de avaliar cenários que possam minimizar os problemas decorrentes desse aumento de veículos nas vias. Neste contexto a simulação computacional surge como uma ferramenta eficiente e de baixo custo, que permite avaliar a influência da adoção dessas diversas políticas e auxiliar na tomada de decisões. Dentre os modelos utilizados para simular o tráfego viário, os modelos microscópicos baseados em Autômatos Celulares têm se destacado como objeto de pesquisa nos últimos anos. Neste trabalho propõe-se um modelo de Autômato Celular, modelo T-UFF, capaz de reproduzir a dinâmica do tráfego, tanto em vias de faixa única quanto de múltiplas faixas, considerar veículos de diferentes tamanhos e características, e também reproduzir comportamentos diferenciados de motoristas. O modelo proposto é um modelo probabilístico, de antecipação, que parte do princípio de que todos os veículos vão acelerar até atingirem a velocidade máxima da via ou permitida pelo fluxo, permitindo que essa aceleração aconteça mais rapidamente ou lentamente, e para isto propões uma política de antecipação composta de duas etapas: a primeira que percebe a distância que ele terá para movimentar-se e a outra onde ajusta sua velocidade. A incerteza no comportamento do motorista é considerado tanto na etapa da percepção da distância quanto no ajuste do valor da velocidade. Na etapa da percepção da distância, considera-se que o motorista que está à frente continuará movimentando-se podendo, inclusive, acelerar de diferentes formas, caso não esteja na velocidade máxima. Considera-se também nessa etapa, se os dois veículos estão muito próximos e se o veículo está mais veloz do que aquele que está à sua frente. Na etapa de ajuste de velocidade, a aleatoriedade no comportamento do motorista permite que ele mantenha sua velocidade ou que acelere mais rapidamente ou lentamente. Essa aleatoriedade do comportamento do motorista é considerada através da Função de Densidade de Probabilidade (FDP) *Beta*, que permite privilegiar uma tendência de comportamento nos motoristas, ou seja, permite que um determinado motorista tenha maior tendência para acelerar mais rapidamente e andar próximo do veículo à sua frente, como pode ter tendência para acelerar mais lentamente e permanecer mais distante de seu vizinho, dependendo dos parâmetros da FDP *Beta*. Deste modo, o modelo T-UFF possibilita também a configuração de diferentes perfis de motoristas, que foram definidos utilizando-se os conceitos apresentados no desenvolvimento de um sistema de direção automática chamado de controle adaptativo de cruzeiro (*adaptive cruise control*). O perfil do motorista influi também na definição das regras de ultrapassagem, no caso de múltiplas vias. Com isso, o modelo, como proposto, reproduz as três fases da dinâmica do tráfego, incluindo o fluxo sincronizado, apresenta uma boa relação fluxo-densidade, quando comparado com dados empíricos e reais, e permite considerar diferentes comportamentos dos motoristas tanto em vias de faixa única como em vias com múltiplas faixas.

Abstract

The saturation of the road network due to the increasing of traffic and urban road has become a great problem for society, affect directly quality of life. Several studies have been carried out to study scenarios that can minimize the problems arising from this increase of vehicles on roads. In this context, the simulation emerges as a powerful, low cost, which allows to evaluate the influence of the adoption of these various policies and assist in decision. Among the models used to simulate the road traffic, the microscopic models based on Cellular Automata have been highlighted as a research subject in recent years. In this work is proposed a Cellular Automata model, so-called T-UFF model, capable of reproducing the dynamics of traffic, both on roads with one and multi-lanes, considering vehicles with different sizes and characteristics, and also mimic different behaviors of drivers. The proposed model is a probabilistic model and anticipation, which assumes that all vehicles will accelerate up to the maximum speed allowed on the road or flow, allowing this acceleration occurs quickly or slowly, and it proposes an anticipation policy composed by two stages: the first stage considers how far the analyzed vehicle has to move, i.e., the distance between two vehicles, and the second stage adjusts the analyzed vehicle's speed takes into account this distance. The driver's behavior uncertainty is considered in both the stages, in perception of distance and in adjusting the value of speed. In perception of the distance stage, it is considered that the driver ahead continues moving and may even accelerate in different ways if he is not in the maximum speed. It is also considered in stage if the two vehicles are very close and if the vehicle is faster than what lies ahead. In stage of speed adjustment, the randomness in the driver's behavior allows it to keep his speed or accelerate quickly or slowly. This randomness of the driver's behavior is considered by Probability Density Function (PDF) *Beta*, which allows emphasis a trend behavior in drivers, it allows a particular driver has a higher tendency to accelerate more quickly and close to the ahead vehicle as may tend to accelerate more slowly and stay farther away from its neighbor, depending on the parameters of the PDF *Beta*. Thus, the T-UFF model configuration also enables different profiles of drivers who have been defined using the concepts presented in developing an automatic steering system called adaptive cruise control. The profile of the driver also influences the definition of the change lane rules in the case of multilane. With this model, as proposed, reproduces the three stages of dynamic traffic, including the synchronized flow, will provide a good flow-density relation, compared with empirical data, and enables different drivers' behaviors on the roads with one and multilane.

Palavras-chave

1. Autômato Celular
2. Dinâmica do tráfego de veículos
3. Modelo de antecipação
4. Modelo probabilístico
5. Comportamento do condutor

Glossário

AC	:	Autômato Celular
ACC	:	<i>Adaptive Cruise Control</i>
CPU	:	<i>Central Processing Unit</i>
CP	:	Carro de Passeio
CTB	:	Código de Trânsito Brasileiro
FFS	:	<i>Free-Flow Speed</i>
GPU	:	<i>Graphics Processing Unit</i>
HCM	:	<i>Highway Capacity Manual</i>
ICC	:	<i>Intelligent Cruise Control</i>
NHTSA	:	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
PC	:	<i>Passenger Car</i>
UMTRI	:	<i>The University of Michigan Transportation Research Institute</i>
TAC	:	Tráfego em Autômato Celular
VDR	:	<i>Velocity Dependent Randomization</i>

Sumário

Lista de Figuras	12
Lista de Tabelas	16
1 Introdução	17
2 Autômatos Celulares e Teoria do Fluxo Veicular	21
2.1 Autômatos Celulares	21
2.2 Autômato Celular Aplicado ao Tráfego Veicular	24
2.3 Conceitos da Teoria do Fluxo de Tráfego	27
2.3.1 Estado Estacionário	28
2.3.2 Fases do Fluxo do Tráfego	30
2.4 Aquisição das Medições	38
3 Trabalhos Relacionados	39
4 Resultados Preliminares	49
4.1 TAC-UFF: Modelo de Antecipação com Ajuste de Fluxo	50
4.1.1 Escolha do α - Técnica da rejeição	53
4.2 Primeiras Investigações	55
4.3 TAC-UFF-M: Modelo de Antecipação com Percepção da Distância	56
4.4 Resultados do modelo TAC-UFF-M	59
5 Modelo T-UFF	62

5.1	Função de Distribuição de Probabilidade Beta	63
5.2	Modelo T-UFF	64
5.2.1	Percepção da Distância	65
5.2.2	Ajuste de Velocidade	67
5.3	Algoritmo T-UFF	67
5.4	Discretização utilizada	68
5.5	Testes de Validação	69
5.6	Conclusão	79
6	Modelo T-UFF Aplicado em Múltiplas Faixas	81
6.1	Autômato Celular e Regras de Mudança de Faixa	81
6.1.1	Inversão do uso da faixa	85
6.1.2	Efeito <i>ping-pong</i>	86
6.2	Regras de mudança de faixa no modelo T-UFF	86
6.2.1	Regras de motivação	87
6.2.2	Regras de segurança	88
6.3	Testes de Validação Com Regras de Mudança de Faixa	89
6.4	Conclusão	101
7	O Comportamento do Motorista e o Modelo T-UFF	102
7.1	Identificação e Classificação dos Comportamentos	103
7.1.1	Tipos de Comportamentos	106
7.2	Modelo T-UFF e o Comportamento do Motorista	106
7.2.1	Motorista <i>Ousado</i>	108
7.2.2	Motorista <i>Conservador</i>	110
7.2.3	Motorista <i>Estrategista</i>	112
7.2.4	Motorista <i>Extremista</i> e Motorista <i>Padrão</i>	114

Sumário	11
7.3 Teste: Simulação com os comportamentos	115
7.4 Conclusão	121
8 Conclusão	122
Referências	125

Lista de Figuras

2.1	Exemplos de dimensões de um AC.	23
2.2	Exemplos de topologias de um AC.	23
2.3	Tipos de vizinhança mais comuns em ACs bidimensionais.	24
2.4	Condições de contorno mais comuns.	24
2.5	A célula $i + 1$ no tempo $t - 1$ está ocupada, e a célula i assume o valor 0 em t (célula branca).	25
2.6	Configuração gráfica da regra 184 (célula preta, ocupada e branca, vazia).	25
2.7	Representação gráfica de um Autômato Celular aplicado ao tráfego.	26
2.8	Espaço (s) entre dois veículos.	28
2.9	intervalo de tempo médio	29
2.10	Espaçamento entre os veículos.	29
2.11	Exemplo de um diagrama espaço-tempo.	31
2.12	Modelo teórico do diagrama fluxo-densidade.	31
2.13	Diagrama velocidade-fluxo - modelo teórico	33
2.14	Diagrama velocidade-densidade - modelo teórico	33
2.15	Distância de segurança.	34
2.16	Relação do fluxo com a densidade e a velocidade.	35
2.17	Diagrama velocidade-fluxo teórico do HCM.	36
2.18	Diagrama fundamental - dado real.	37
3.1	Diagrama fluxo-densidade para diferentes valores de p_m - Modelo NaSch.	40
3.2	Diagrama fluxo-densidade do modelo TT com $p_0 = 0,75$ e $p_m = 0,01$	41
3.3	Diagrama fundamentais - modelo VDR versus modelo NasSch.	43

3.4	Diagrama fluxo-densidade.	43
3.5	Diagrama fundamental do modelo Nishinari.	45
3.6	Diagrama fundamental do modelo Nishinari versus modelo Kokubo.	46
3.7	Diagrama fundamental do modelo Luz de Freio.	47
4.1	Distribuição com as regiões S_1 , S_2 e S_3	51
4.2	Distribuições e diagramas da relação fluxo-densidade das três FDP adotadas.	54
4.3	Diagrama velocidade-fluxo com diferentes valores de média.	56
4.4	Diagrama velocidade-fluxo com diferentes valores de desvio padrão.	56
4.5	FDP Normal com diferentes valores para média e $\sigma = 0,10$	60
4.6	FDP Normal com $\mu = 0,50$ e diferentes valores de desvio padrão.	61
4.7	FDP normal com $\mu = 0,5$ e diferentes valores σ	61
5.1	FDP <i>Beta</i> com diferentes valores de a e b	64
5.2	Três diferentes FDPs usadas nos testes.	71
5.3	Diagrama fluxo-densidade com diferentes valores de h e $d_{s_{min}}$ e FDP <i>Beta</i> ($a = 1, b = 5$).	72
5.4	Diagrama fluxo-densidade com diferentes valores de h e $d_{s_{min}}$ e FDP <i>Beta</i> ($a = 4, b = 8$).	72
5.5	Diagrama fluxo-densidade com diferentes valores de h e $d_{s_{min}}$ e FDP <i>Beta</i> ($a = 8, b = 4$).	73
5.6	Histograma de frequência relativa de $h \times \alpha$ e $d_{s_{min}} \times \alpha$ para FDP <i>Beta</i> ($a = 1, b = 5$).	73
5.7	Histograma de frequência relativa de $h \times \alpha$ e $d_{s_{min}} \times \alpha$ para FDP <i>Beta</i> ($a = 4, b = 8$).	74
5.8	Histograma de frequência relativa de $h \times \alpha$ e $d_{s_{min}} \times \alpha$ para FDP <i>Beta</i> ($a = 8, b = 4$).	74
5.9	Diagrama velocidade-fluxo as três FDPs <i>Beta</i>	75
5.10	Diagrama velocidade-densidade com as três FDPs <i>Beta</i>	75
5.11	Diagrama velocidade-fluxo com as três FDPs <i>Beta</i>	76

5.12	Diagrama fluxo-densidade para FDP $Beta(a = 1, b = 1)$	76
5.13	Diagrama velocidade-fluxo com diferentes velocidades.	77
5.14	Diagrama velocidade-densidade com diferentes velocidades.	78
5.15	Diagrama fluxo-densidade com diferentes velocidades.	79
5.16	Diagrama fluxo-densidade modelo Luz de Freio versus T-UFF.	80
6.1	Diagrama do uso da faixa.	86
6.2	Regra de segurança (troca da direita para esquerda).	89
6.3	Frequência e troca de faixas com diferentes probabilidades (p_{muda}).	90
6.4	Diagrama fluxo-densidade - FDP $Beta(a = 4, b = 8)$ - regra assimétrica. . .	91
6.5	FDP $Beta(a = 4, b = 8)$ - regra assimétrica.	92
6.6	Relação fluxo densidade com duas faixas e FDP $Beta(a = 4, b = 8)$	93
6.7	Inversão do uso da faixa com FDP $Beta(a = 4, b = 8)$	94
6.8	Relação fluxo densidade com diferentes valores para FDP $Beta$	95
6.9	Inversão do uso da faixa para diferentes FPDs Beta.	96
6.10	Disposição da via em função do fluxo.	96
6.11	Diagrama fluxo-densidade das quatro faixas.	97
6.12	Diagrama espaço tempo das quatro faixas.	97
6.13	Diagrama fluxo-densidade com 10% e 40%.	98
6.14	Diagrama velocidade-fluxo com 10% de ônibus.	98
6.15	Diagrama velocidade-fluxo com 40% de ônibus.	99
6.16	Esquema da faixa da direita interditada.	100
6.17	Faixa interditada com ($\rho = 11$ veículos/km) e ($V_{max} = 108$ km/h).	101
7.1	Diagrama alcance-versus-taxa-alcance <i>range-versus-range-rate</i>	104
7.2	Modelo para classificação do comportamento do motorista.	105
7.3	Curva do Comportamento do Motorista <i>Ousado</i>	109
7.4	Diagrama distância versus velocidade do Motorista <i>Ousado</i>	109

7.5	Fluxo, densidade e velocidade média do Motorista <i>Ousado</i>	110
7.6	Curva do Motorista Conservador.	111
7.7	Diagrama distância versus velocidade do Motorista <i>Conservador</i>	111
7.8	Fluxo, densidade e velocidade média do Motorista <i>Conservador</i>	112
7.9	Curva do Motorista Estrategista.	113
7.10	Diagrama distância versus velocidade do Motorista <i>Estrategista</i>	113
7.11	Fluxo, densidade e velocidade média do Motorista <i>Estrategista</i>	114
7.12	Diagrama distância versus velocidade esperado.	115
7.13	Diagrama distância versus velocidade do Motorista <i>Extremista</i> e Motorista <i>Padrão</i>	115
7.14	Curva do Motorista Extremista.	116
7.15	Curva do Motorista <i>Padrão</i>	116
7.16	Motorista Extremista.	117
7.17	Motorista <i>Padrão</i>	117
7.18	Espaço tempo de três comportamentos.	118
7.19	Espaço tempo de três comportamentos em $t = 30s$	119
7.20	Espaço tempo de três comportamentos em $t = 60s$	119
7.21	Diagrama fluxo-densidade dos quatro comportamentos.	120
7.22	Diagrama espaço-tempo em duas faixas e com os quatro comportamentos.	120

Lista de Tabelas

2.1	Síntese das equações	30
6.1	Resumo das regras assimétricas.	85
7.1	Distribuição e configuração dos comportamentos	119

Capítulo 1

Introdução

O aumento do fluxo do tráfego de veículos afeta diretamente a qualidade de vida da sociedade moderna. Os grandes centros urbanos sofrem com o estresse causado pelo trânsito congestionado. O cidadão que vive em um desses centros sofre por perder muito tempo com seu deslocamento, seja em veículo próprio ou no transporte público, além de sofrer com a poluição sonora e do ar.

No Brasil anualmente são inseridos, principalmente nos grandes centros urbanos, uma quantidade de veículos maior do que suporta a expansão das vias [1], ocasionando registros de grandes congestionamentos. Na cidade de São Paulo, por exemplo, os congestionamentos alcançam mais de duzentos de quilômetros [2]. Um sistema de transporte eficiente, que minimize esse transtorno causado pelo excesso de veículos, é fundamental, considerando que haverá um aumento do fluídos de pessoas e de veículos nos próximos anos. Sendo assim, vários estudos têm sido realizados com intuito de melhorar o fluxo do trânsito ocasionado pelo excesso de veículos. Esses estudos podem colaborar de diferentes formas: *i*) na concepção de novas vias, com a avaliação de tratamentos alternativos na gestão e controle do tráfego; *ii*) na avaliação das consequências da adoção de diversos tipos de transporte viário; *iii*) em sistemas educacionais, que têm por objetivo mostrar os efeitos que determinados comportamentos podem causar ao fluxo do tráfego em geral; e *iv*) em jogos realísticos, envolvendo movimentação de veículos, entre outras aplicações. Normalmente estes estudos utilizam modelos matemáticos para simular o fluxo e avaliar o comportamento das vias.

Diversos modelos matemáticos vêm sendo investigados. De forma geral, estes modelos podem ser classificados em macroscópicos e microscópicos [3]. Modelos macroscópicos descrevem o comportamento das correntes de tráfego, assumindo que estas são meios contínuos e geralmente têm seu comportamento descrito através de equações diferenciais.

Por suas características e considerações, os modelos macroscópicos aplicam-se com sucesso ao estudo de tráfego com grandes densidades, mas não são adequados às situações de tráfego rarefeito [4]. Por outro lado, os modelos microscópicos são baseados na descrição matemática da interação entre veículos consecutivos numa corrente de tráfego, e simulam o comportamento global da via, quando aplicado a todos os veículos [5]. Dentre os modelos microscópicos, os modelos baseados em Autômatos Celulares (AC) têm sido amplamente empregados em razão dos bons resultados alcançados e pela simplicidade inerente à este tipo de modelagem.

Os AC utilizam um conjunto de regras simples, aplicadas localmente em função de sua vizinhança. Assim, um modelo de AC pode ser utilizado para simular diferentes situações para possibilitar uma tomada de decisão ou pode ser utilizado para analisar a situação do tráfego em vias expressas e os possíveis pontos de congestionamento. Com isso, pode-se avaliar diferentes cenários, com também pode auxiliar ao motorista planejar sua rota ou o horário que vai passar por uma determinada via. Um exemplo prático deste tipo de serviço de previsão *online* é realizado na Alemanha e chamado de *Verkehrsinformationssystem autobahn.NRW* [6]. Neste serviço são realizadas simulações, utilizando o modelo AC, a partir de dados obtidos por sensores localizados na rede de estradas do país.

Diversos modelos de AC têm surgido na literatura para simular o tráfego viário tanto em vias expressas quanto em meios urbanos. Apesar de diversos modelos propostos na literatura apresentarem bons resultados, muito ainda há que ser feito para que esses modelos possam representar quantitativamente e qualitativamente os dados reais possibilitar a simulação de diferentes situações.

Neste trabalho é proposto um modelo de Autômato Celular para simular o tráfego em uma via com uma ou mais faixas¹. Propõe-se um modelo de antecipação composto por duas etapas: percepção do quanto os veículos movimentam-se no instante de tempo atual e ajuste de velocidade, tendo em vista esta percepção. Para tornar essa política de antecipação mais realista considera-se, na velocidade projetada para os veículos no momento atual, a possibilidade deste acelerar, caso seja possível, uma vez que também considera a velocidade relativa entre os veículos em questão e se estes estão muito próximos um do outro. Além disso, o conjunto de regras do modelo proposto emprega de forma diferente a aleatoriedade do comportamento do motorista. Em geral, os modelos de AC aplicados ao tráfego viário utilizam a incerteza do comportamento do motorista para determinar se um veículo vai ou não acelerar uma quantidade fixa de células. Além

¹O projeto desta tese e as instâncias estão disponíveis em: <https://code.google.com/p/modelo-tuff/>

disso o modelo proposto aplica a incerteza do comportamento do motorista na política de antecipação, para definir uma quantidade de células que ele pode acelerar e, desta forma, permite uma flutuação no valor da aceleração, que melhor reproduz a incerteza do comportamento do motorista. Esta incerteza é também considerada tanto no cálculo da percepção da distância quanto no ajuste de velocidade. Ademais, o modelo também utiliza uma função de densidade contínua, mas que pode não ser constante, para simular uma tendência do comportamento do motorista ao dirigir. Essa função de densidade será utilizada também para definir as regras de mudanças de faixas, quando vias de múltiplas faixas estão sendo analisadas.

As regras do modelo, as duas etapas da política de antecipação combinadas e a função de densidade de probabilidade fazem o modelo proposto representar qualitativamente e quantitativamente a dinâmica do tráfego viário. A definição dessa política de antecipação permitiu que o modelo proposto, utilizando por base um trabalho que definiu diferentes perfis de motoristas no desenvolvimento de um sistema de controle adaptativo de cruzeiro (*adaptive cruise control*), conseguisse representar qualitativamente diversos perfis de comportamento no trânsito. Esses perfis foram identificados através da descrição de uma função de densidade de probabilidade adequada que foi utilizada, em conjunto com a política de antecipação, permitindo avaliar a influência desses perfis da dinâmica do tráfego. Além disso, da forma como construído, o modelo também permite que esses diversos perfis sejam analisados em conjunto, permitindo descrever diferentes cenários de uma via. Com isso, o modelo proposto torna-se flexível e robusto, uma vez que permite avaliar, com qualidade, diferentes perfis de motoristas em uma mesma simulação, inclusive com a influência destes perfis nas regras de mudança de faixas, que, neste trabalho, são consideradas assimétricas para atender ao Código de Trânsito Brasileiro.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 descreve sucintamente os princípios básicos dos Autômatos Celulares e as características do fluxo de trânsito viário. Também descreve-se neste capítulo, a forma para a obtenção dos dados realizada através da simulação de um sensor de movimento. O Capítulo 3 apresenta os trabalhos relacionados ao tema desta tese, encontrados na literatura. Em seguida, no Capítulo 4, apresenta um modelo de antecipação chamado TAC-UFF e as primeiras investigações que deram origem a esta tese. No Capítulo 5 são descritos, com detalhes, o modelo de antecipação proposto e em seguida são mostrados os seus resultados. O Capítulo 6 expõe a extensão do modelo proposto para vias com multifaixas, apresentando as regras necessárias para mudança de faixas e a simulação de alguns estudos de casos. Apresenta-se também resultados da simulação de vias com carros e ônibus, sendo estes mais lentos e maiores

que um carro, e também a simulação de uma via que tem faixa interditada. O Capítulo 7 apresenta a metodologia para classificar comportamentos de motoristas, bem como as configurações necessárias para reproduzir estes comportamentos no modelo proposto. Finalmente, no Capítulo 8 são apresentados comentários e conclusões do presente trabalho.

Capítulo 2

Autômatos Celulares e Teoria do Fluxo Veicular

O comportamento do tráfego veicular vem sendo muito estudado nas últimas décadas, por várias áreas do conhecimento, como por exemplo, a engenharia, a matemática, a física entre outras. Para modelar o tráfego veicular é necessário ter o entendimento da teoria básica que envolve tanto a técnica de modelagem a ser utilizada quanto a teoria que descreve o fluxo veicular de forma macroscópica.

Neste trabalho utilizamos uma modelagem microscópica via Autômatos Celulares, que vêm ganhando a atenção de pesquisadores para modelar o trânsito tanto em rodovias como em vias urbanas, principalmente a partir da década de 90 [7, 8, 9, 10]. Para apresentar as ideias básicas da técnica de modelagem microscópica utilizada, bem como da teoria do fluxo veicular, necessários ao desenvolvimento do presente trabalho, este Capítulo apresenta na Seção 2.1, a teoria básica de Autômatos Celulares (AC). Em seguida, a utilização de AC na simulação do tráfego veicular é exposta na Seção 2.2. A Seção 2.3 apresenta os conceitos básicos da teoria do fluxo e, finalmente, a Seção 2.4 apresenta um modelo para simular um sensor de movimento capaz de registrar os resultados de uma simulação para compará-los com resultados reais.

2.1 Autômatos Celulares

O Autômato Celular (AC) é uma técnica capaz de simular sistemas dinâmicos e complexos, onde o domínio espacial de definição do problema é discretizado em uma grade regular de células, onde o valor da variável que se deseja calcular evolui a cada passo de tempo discreto, e tem seu valor determinado pelos valores das variáveis nas células

vizinhas. As variáveis em cada célula são, de forma geral, atualizadas simultaneamente com base nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo anterior e de acordo com um conjunto de regras locais. O conceito básico dos Autômatos Celulares, também chamados de máquina de estados finitos, foi proposto no início da década de 50 pelo matemático alemão Stanislaw Ulam e pelo matemático húngaro Jonh Von Neumann, que trabalhavam no desenvolvimento de um sistema que fosse capaz de se auto-replicar e reproduzir mecanismos auto-reprodutivos.

Ulam estudava a evolução de construções geométricas em relação à formação de cristais, e utilizava para isso, uma malha de células com características geradas por regras locais simples e sugeriu a Jonh von Neumann que utilizasse esses mesmos princípios para simulação biológica. A malha utilizada por Ulam era um espaço bidimensional dividido em células que podiam estar em um dos dois estados: ligado ou desligado, e que dada uma condição inicial ao sistema, a evolução era baseada em regras de vizinhança, ou seja, o estado de cada célula em um determinado instante de tempo dependia tanto do estado da célula quanto de sua vizinhança no instante de tempo anterior. Ulam observou que esse mecanismo criava estruturas complexas e em algumas ocasiões auto-similares. Utilizando esses princípios Von Neumann verificou que esse mecanismo simples era capaz de gerar estruturas de grande complexidade.

O AC pode ser visto como uma máquina com um número finito de estados. O domínio considerado é discretizado em um conjunto de células, formando uma grade regular. A mudança de estado de cada uma das células é feita conforme seu estado atual, o estado de sua vizinhança e através da definição de uma função de transição. Assim, o AC é definido por um conjunto $(L, S, N$ e $f)$, onde:

- L , representa a discretização em uma grade regular, formada por células (c) de dimensão espacial D ;
- S é o conjunto finito de estados que a célula pode assumir;
- N é a vizinhança adotada, tal que $c \in L \Rightarrow N(c) \in L$, e,
- $f : (S, N) \rightarrow S$ é a função de transição.

Em um AC, a grade regular de células é definida como uma discretização do domínio de dimensão D , onde seus elementos, as células, preenchem o domínio por inteiro e com a translação da grade em d direções independentes, obtém-se a mesma grade. O domínio

pode ser de diferentes dimensões ($1D$, $2D$ e $3D$), conforme ilustrado na Figura 2.1. Diferentes topologias para a discretização também podem ser adotadas para o formato das células, como mostra a Figura 2.2.

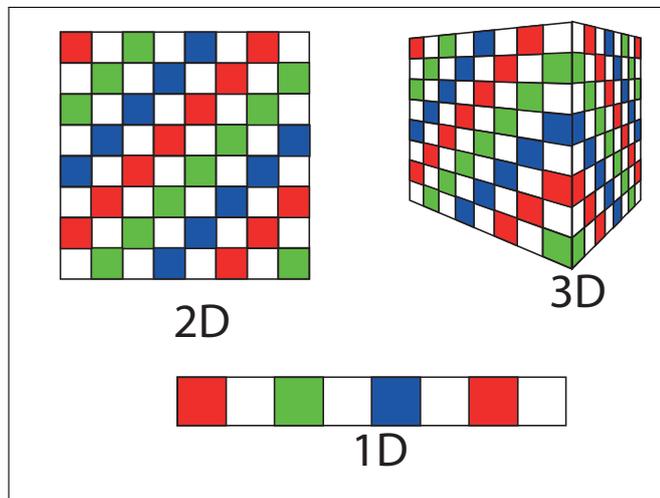


Figura 2.1: Exemplos de dimensões de um AC.

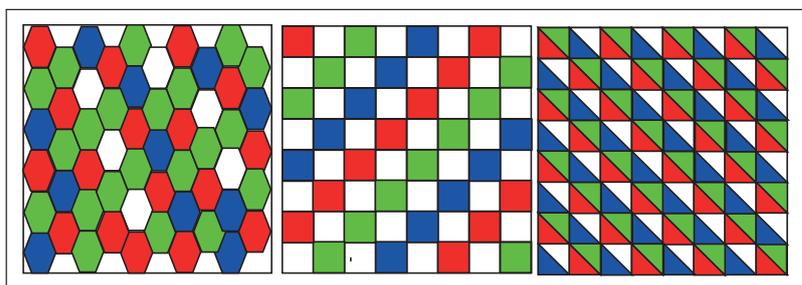


Figura 2.2: Exemplos de topologias de um AC.

A definição de vizinhança é dependente do problema modelado, considerando a representação mais adequada. Assim, a Figura 2.3 mostra os tipos mais usuais de vizinhança para modelos $2D$ de AC, com diferentes áreas de influência, definidas pelo raio. Logo, dado uma célula c e um raio r , o conjunto de vizinhos é definido como:

$$N(c) = \{r \in L; (c + r) \in L\} \quad (2.1)$$

As células que estão nas fronteiras do domínio necessitam de alguma política de vizinhança para mudar de estado, ou seja, uma condição de contorno. As principais condições de contorno aplicadas aos modelos de AC são: condições de contorno periódicas, reflexivas e constantes. A Figura 2.4 ilustra essas condições de contorno para um problema $1D$. Além disso, como o estado de cada célula é função de seu estado e de seus vizinhos no

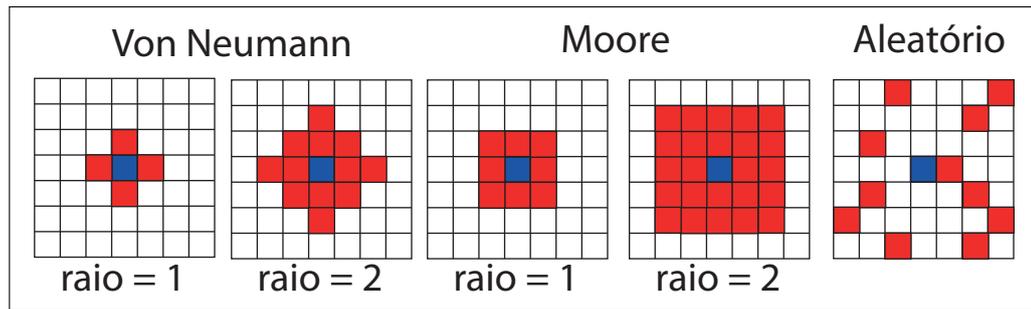


Figura 2.3: Tipos de vizinhança mais comuns em ACs bidimensionais.

tempo anterior, para iniciar o processo é necessário fornecer o estado de cada célula no instante de tempo inicial, ou seja, é necessário fornecer a condição inicial do problema, para que ele possa iniciar sua evolução no tempo, utilizando as regras de transição.

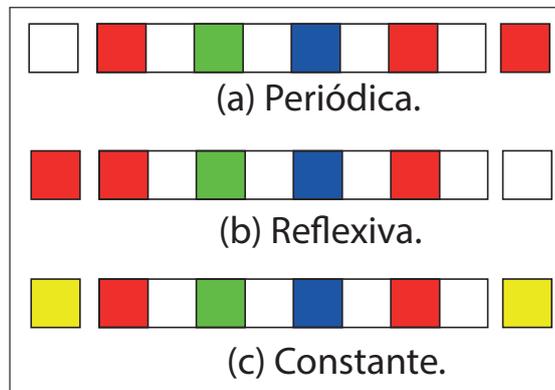


Figura 2.4: Condições de contorno mais comuns.

2.2 Autômato Celular Aplicado ao Tráfego Veicular

Os modelos microscópicos aplicados ao problema do tráfego viário vêm sendo amplamente utilizados, particularmente, os modelos baseados em AC devido a sua robustez, versatilidade e simplicidade, conseguindo representar a dinâmica do tráfego veicular como fluxo livre ou congestionado.

Na modelagem do tráfego por Autômatos Celulares (TAC), a via é discretizada em células e a posição de um veículo i é dado por x_i e a velocidade por v_i . Estas variáveis, bem como o tempo t , são tratadas como variáveis discretas. Ademais, a velocidade é definida no intervalo $v \in [0, v_{max}]$, onde v_{max} representa o limite de velocidade da via.

A via, por sua vez, é discretizada em uma malha uni-dimensional, quando possui uma faixa, e bi-dimensional para simular vias com mais de uma faixa. Essa malha é constituída por células de mesmo tamanho, onde o conjunto de estados (S) pode assumir apenas dois

estados: vazio ou ocupado por apenas um veículo em um determinado instante de tempo.

A primeira proposta para modelar o fluxo de tráfego utilizando o autômato celular foi um modelo determinístico, que teve como base a regra 184 de Wolfram [11].

O modelo considera que um veículo irá mover-se para a célula à sua frente, se esta estiver vazia, ou seja, que o veículo analisado i pode acelerar, no máximo uma célula, quando há espaço à sua frente, isto é, a célula imediatamente à sua frente está vazia. Caso contrário, não havendo espaço, isto é, a célula está ocupada, o veículo i fica parado e sua velocidade é definida com o valor zero. A Figura 5 apresenta exemplos de estados das células nos tempos t e $t+1$ onde a célula preta significa que ela está ocupada (valor 1) e a célula branca, que está vazia (valor 0). Assim, na Figura 2.5 a célula i no instante t ficará vazia, uma vez que a célula à sua frente no tempo $t - 1$ está ocupada. A a Figura 2.6 apresenta a configuração gráfica da regra 184, para todas as possíveis configurações.

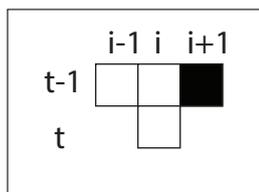


Figura 2.5: A célula $i + 1$ no tempo $t - -1$ está ocupada, e a célula i assume o valor 0 em t (célula branca).

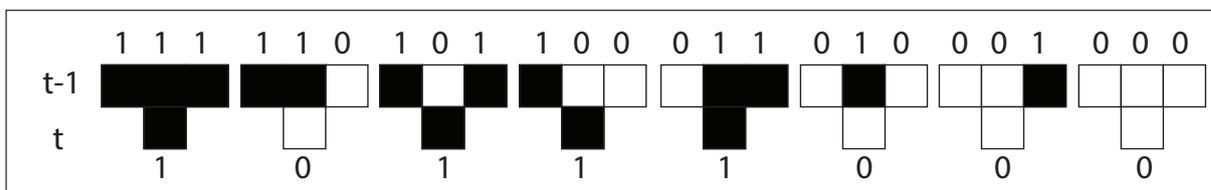


Figura 2.6: Configuração gráfica da regra 184 (célula preta, ocupada e branca, vazia).

No entanto, um motorista não tem, de forma determinística, o mesmo comportamento ao longo do tempo. Assim, levando em consideração os diferentes comportamentos individualizados dos condutores e as condições externas que podem colaborar para essa mudança de comportamento, utilizar uma abordagem probabilística de AC pode melhor reproduzir as características observadas no tráfego real.

O modelo pioneiro utilizando Autômato Celular probabilístico, foi proposto em 1992 por Nagel-Schreckenberg (NaSch) [7] e será descrito no Capítulo 3. Com base nesse modelo, vários autores têm proposto alterações nas regras visando descrever melhor o comportamento do tráfego real.

Na maioria dos modelos de TAC a pista é discretizada em células de 7,5 metros [7, 3], embora diversos trabalhos adotam uma discretização mais refinada [12, 13]. A discretização, de 7,5 metros, é baseada no tamanho médio que um veículo ocupa numa via acrescido de uma distância de segurança em relação ao veículo à sua frente.

A vizinhança N é composta pelo veículo imediatamente à frente do veículo analisado i , nos modelos de faixa única. Nos modelos de múltiplas faixas, a vizinhança N é composto pelos veículos que estão à frente e atrás do veículo i e nas faixas da esquerda e direita.

A velocidade v_i é dada em células por segundo. Logo, o veículo i está com velocidade $v_i = 1$ célula/(unidade de tempo), equivale a dizer que a velocidade é de 7,5m/s ou 27km/h. Os trabalhos que adotam essa discretização espacial (7,5m), também definem, usualmente, o limite de velocidade em 5c/s (células/segundo) ou 135km/h. A Figura 2.7 representa uma via com dois instantes de tempo ($t-1$ e t), a discretização é de $\Delta x = 7,5m$ e $\Delta t = 1s$. O veículo i movimentou-se em 1c/s, enquanto o veículo j deslocou-se 2c/s.

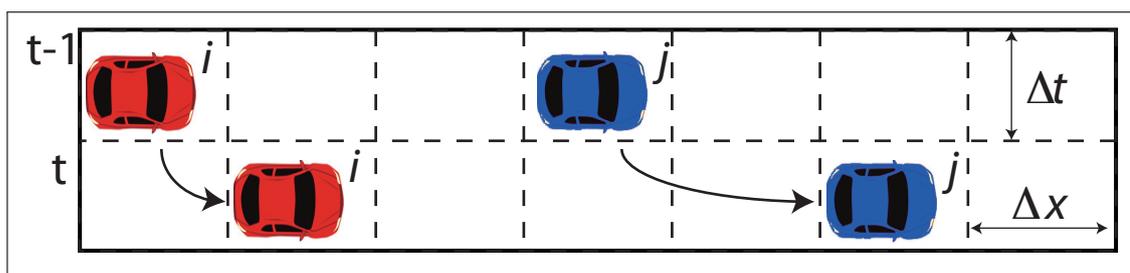


Figura 2.7: Representação gráfica de um Autômato Celular aplicado ao tráfego.

Para avaliar o comportamento dos modelos é comum a utilização de uma pista fechada, isto é, adota-se a condição de contorno periódica. Portanto, tendo a via o comprimento igual a L , a posição x_i , de um veículo i , é a mesma posição $x_i + L$.

A nova posição do veículo no instante de tempo t é definida por:

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (2.2)$$

Vale ressaltar que esta soma é possível pois, o espaço é dado em células e a velocidade é dada em número de células em um instante de tempo.

A função de transição (f) que é a responsável pelas regras de movimentação dos veículos a cada novo instante de tempo.

2.3 Conceitos da Teoria do Fluxo de Tráfego

O comportamento do tráfego veicular é analisado com base em um conjunto de variáveis: a densidade (ρ), velocidade (v) e fluxo (J). Considerando a via como um domínio unidimensional, a densidade da via é descrita pelo número de veículos em um trecho da pista, conforme Equação 2.3, onde n é o número de veículos e L é o comprimento de pista considerada [14].

$$\rho = \frac{n}{L} \quad (2.3)$$

A média de velocidades dos veículos é dada pela média aritmética da velocidade de cada veículo no trecho analisado:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (2.4)$$

Por fim, o fluxo é definido como sendo o número de veículos m que passam por um local fixo da via em um determinado intervalo de tempo T :

$$J = \frac{m}{T} \quad (2.5)$$

Os dados do movimento veicular podem ser obtidos de duas formas: a primeira considera uma seção da via de comprimento L em um único instante de tempo, como uma fotografia. Nesta representação as Equações 2.3 e 2.4 descrevem a densidade e a velocidade média considerando esta seção da via, de comprimento L . Neste caso, n (Equação 2.3) é número de veículos que estão nesta seção naquele instante de tempo e v é a média de velocidades destes veículos. A segunda forma obtém os dados a partir de um local fixo de observação na via, onde apenas os veículos que passam por este local de observação são contabilizados durante um intervalo de tempo (T). Nesta abordagem, o fluxo é dado pela Equação 2.5 e a densidade considera o quanto a seção observada fica ocupada durante o tempo considerado. conforme Equação:

$$\rho = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{v_i} \right) \quad (2.6)$$

Ainda, nessa abordagem, média de velocidade pode ser escrita em função da velocidade dos veículos que passam pelo local de observação:

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i}{m} \quad (2.7)$$

Além dessas variáveis, outras duas variáveis são também empregadas no tráfego veicular: espaçamento (s) que representa a distância entre dois veículos consecutivos, medida entre os para-choques dianteiros de dois veículos, conforme Figura 2.9. O intervalo de tempo medido entre dois veículos consecutivos que passam pelo mesmo ponto de observação é dado por h .



Figura 2.8: Espaço (s) entre dois veículos.

2.3.1 Estado Estacionário

O estado estacionário do tráfego, por definição, é dada quando todos os veículos estão movimentando-se em uma mesma velocidade e estão igualmente espaçados entre si. Desta forma, é possível obter algumas relações entre as variáveis envolvidas.

Em virtude do estado estacionário do tráfego, o intervalo de tempo de observação (T), da Equação 2.5, pode ser substituído pela soma dos intervalos de tempos (h_i) gastos entre os veículos que passam por um ponto fixo de observação da via (Equação 2.8), como é ilustrado na Figura 2.9, onde v_i representa a trajetória do veículo i que passa por um ponto fixo de observação definido como x_i , durante um intervalo de tempo T .

$$J = \frac{m}{\sum_{i=1}^m h_i}. \quad (2.8)$$

Reescrevendo a equação anterior em função da soma dos intervalos tempo (h), tem-se:

$$\sum_{i=1}^m h_i = \frac{m}{J}. \quad (2.9)$$

Dividindo ambos os lados da Equação 2.9 pelo número de veículos (m), dado por:

$$\bar{h} = \frac{1}{J}. \quad (2.10)$$

Uma outra relação para densidade surge de forma análoga à Equação 2.3, pois L pode ser reescrito em função da soma dos espaços entre os veículos que passam por um ponto

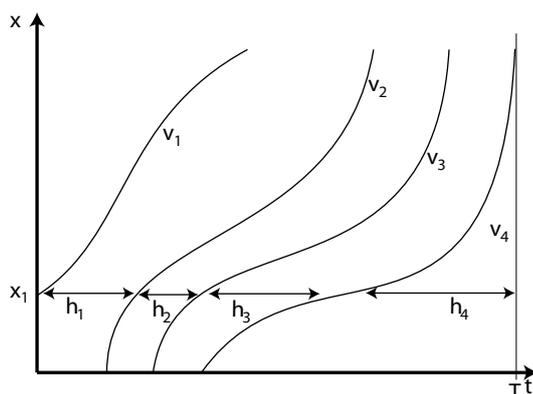


Figura 2.9: intervalo de tempo médio

fixo de observação, conforme a Equação 2.11 e ilustrado pela Figura 2.10, fornecendo:

$$\rho = \frac{n}{\sum_{i=1}^m s_i}. \quad (2.11)$$

Reescrevendo a Equação 2.11 em termos das somas dos espaçamentos, obtém-se:

$$\sum_{i=1}^n s_i = \frac{n}{\rho}. \quad (2.12)$$

Portanto, o espaçamento médio entre os veículos é alcançado quando ambos os lados da Equação 2.12 são divididos pela quantidade de veículos n , fornecendo:

$$\bar{s} = \frac{1}{\rho}. \quad (2.13)$$

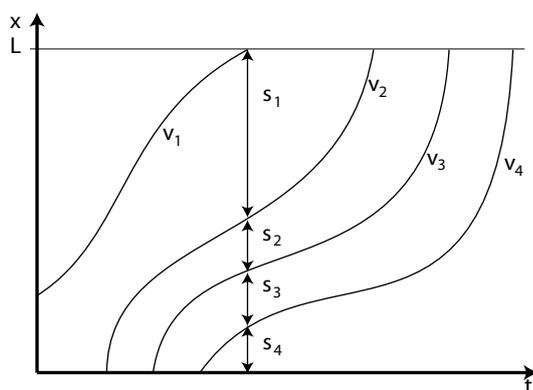


Figura 2.10: Espaçamento entre os veículos.

Considerando o fato que os veículos estão movimentando-se em estado estacionário, é possível determinar a próxima posição de cada veículo por: $\bar{s} = \bar{v} \times \bar{h}$, onde \bar{v} é a velocidade média da via e, da mesma forma que as outras duas variáveis (\bar{s} e \bar{h}), a velocidade de

cada veículo i é igual à velocidade média. Portanto, pode-se obter a relação:

$$\bar{v} = \frac{\bar{s}}{\bar{h}} = \frac{\frac{1}{\rho}}{\frac{1}{J}} = \frac{J}{\rho} \quad (2.14)$$

Por fim, obtém-se uma relação linear entre as três principais variáveis que descrevem o fluxo viário, dada por:

$$J = \rho \bar{v} \quad (2.15)$$

A tabela 2.1 apresenta um resumo das equações anteriormente descritas, tanto considerando um ponto fixo de observação quanto considerando uma seção da via.

Tabela 2.1: Síntese das equações

	Ponto fixo de observação	Seção da via de comprimento L (como uma fotografia)
Fluxo	$J = \frac{m}{T}$	$J = \rho \bar{v}$
Densidade	$\rho = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{v_i} \right)$	$\rho = \frac{n}{L}$
Velocidade	$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^m v_i}{m}$	$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}$

2.3.2 Fases do Fluxo do Tráfego

O comportamento do fluxo tráfego é descrito pelas equações anteriormente apresentadas, considerando a contagem dos veículos durante um período de tempo em um ponto fixo de observação. Tipicamente, a análise do fluxo viário é realizada pela construção dos diagramas: fluxo-densidade, velocidade-densidade e velocidade-fluxo. Um outro diagrama utilizado para visualizar o comportamento do tráfego é o diagrama espaço-tempo.

O diagrama espaço-tempo representa a trajetória feita pelos veículos em um intervalo de tempo na seção da via analisada. Formalmente, o problema pode ser representado por um diagrama (espaço-tempo) baseado em uma função $x(t)$, onde x representa o espaço nesta seção da via e t corresponde a um instante de tempo. Em síntese, este diagrama é construído como se fossem tiradas fotos instantâneas desta seção da via e elas fossem

colocadas em sequência cronológica.

Pode-se observar na Figura 2.11 que as curvas *a* e *b* representam trajetórias válidas de dois veículos, enquanto que a curva *c* é uma representação inválida, pois existe mais de uma posição para um determinado instante de tempo *t*. Usualmente, o registro desses dados são obtidos por um sistema automático de monitoramento, ou pela observação dos veículos nos diversos instantes de tempo. Assim, a função $x(t)$ e o diagrama espaço-tempo representam uma descrição histórica das trajetórias de todos os veículos durante um período de tempo, mostrando os gargalos e os pontos de congestionamento formados.

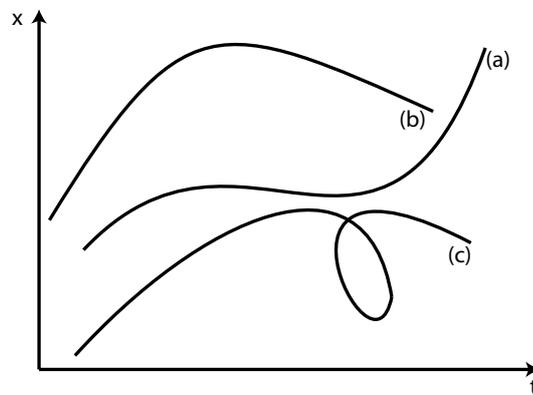


Figura 2.11: Exemplo de um diagrama espaço-tempo.

A Figura 2.12 mostra o modelo teórico do diagrama fluxo-densidade. Pode-se observar que no modelo teórico há três fases bem definidas conhecidas como: fluxo livre, sincronizado e congestionado [15].

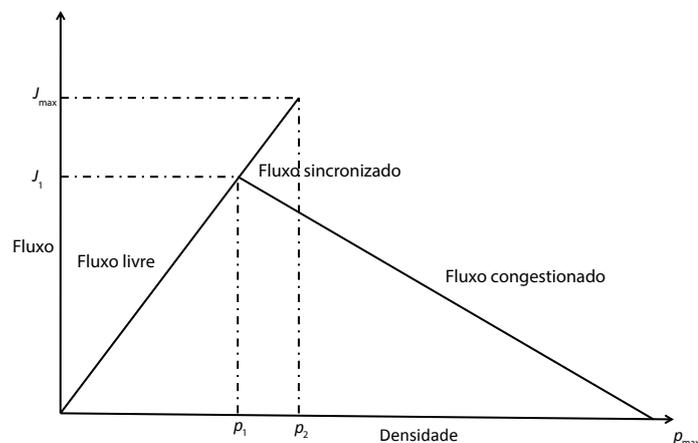


Figura 2.12: Modelo teórico do diagrama fluxo-densidade.

Fluxo livre: nesta fase não há interação entre os veículos e todos eles andam na velocidade desejada, que é a velocidade máxima da via e a média de velocidade é igual à velocidade máxima, correspondendo a uma região de baixa e média densidade ($0 < \rho < \rho_1$). Nesta faixa o fluxo cresce linearmente com o aumento da densidade (Figura 2.12).

Fluxo sincronizado: a segunda fase encontra-se em uma região de média e alta densidade ($\rho_1 < \rho < \rho_2$) e o fluxo máximo é alcançado em J_{max} . Nesta região, o fluxo não é exclusivamente definido pela densidade ou pela velocidade, mas também pela interação entre os veículos. Deste modo, o fluxo ora é livre ora é congestionado. No fluxo livre, tem-se que o fluxo é definido no intervalo $J_1 < J \leq J_{max}$ (Figura 2.12) e continua sendo caracterizado pela relação linear entre a densidade e a velocidade média da via. À medida que o fluxo aumenta nesta faixa ($J_1 < J \leq J_{max}$) e a velocidade média é mantida próxima da máxima, o espaçamento médio (\bar{s}) entre os veículos vai diminuindo (Equação 2.13). Embora este estado apresente fluxo livre, o \bar{s} é pequeno o suficiente para que qualquer flutuação na velocidade acabe por provocar uma redução rápida da média de velocidade da via, criando pontos de congestionamento, fazendo o fluxo passar de livre para congestionado. Em seguida, os veículos começam a retornar a velocidade que estavam, ou seja, a velocidade da via e o congestionamentos formados são dissolvidos e o fluxo vai subindo até $J = J_1$, conforme apresentado na Figura 2.12. Este processo de retomada da velocidade é lento, em relação à desaceleração, pois acontece em razão da inércia do comportamento do motorista em acelerar. Essa região é conhecida na literatura como região de meta-estabilidade.

Fluxo congestionado: a terceira fase representa o fluxo congestionado, onde o aumento da densidade provoca uma redução no fluxo. É uma região definida pela densidade dentro da faixa de $\rho_2 < \rho < \rho_{max}$ (Figura 2.12). Nesta fase há grandes faixas de congestionamentos e devido a alta densidade, essas faixas não são dissolvidas e movem-se em sentido contrário ao fluxo, pois à medida que veículos saem de uma dessas faixas de congestionamento, outros chegam e dessa forma fazendo o congestionamento andar no sentido contrário ao fluxo.

Além do diagrama fluxo-densidade, existem outros dois tipos de diagramas que são utilizados para visualizar a relação das três variáveis (fluxo, densidade e velocidade): velocidade-fluxo e velocidade-densidade. O modelo teórico do diagrama velocidade-fluxo é ilustrado pela Figura 2.13, onde pode-se observar que \bar{v} é a velocidade média da via que permanece pouco abaixo da velocidade máxima e o fluxo é definido como livre, permanecendo livre até atingir o fluxo máximo (J_{max}), onde obtém-se a velocidade ótima (v_o). A

partir desse ponto o fluxo cai e a velocidade média também é reduzida, gerando um fluxo congestionado.

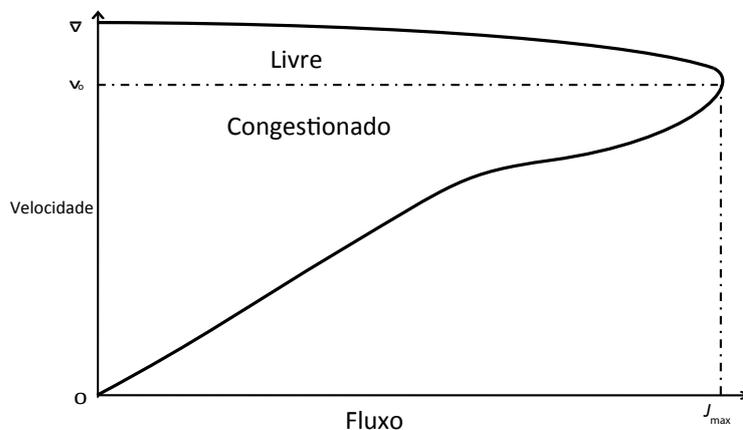


Figura 2.13: Diagrama velocidade-fluxo - modelo teórico

Finalmente, o diagrama velocidade-densidade apresentado pela Figura 2.14, mostra a relação da densidade e velocidade, onde a velocidade média da via é reduzida em função da saturação da mesma.

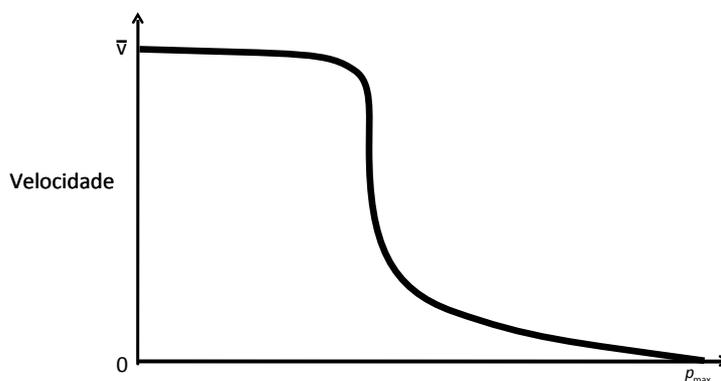


Figura 2.14: Diagrama velocidade-densidade - modelo teórico

Vale ressaltar que na definição do espaçamento médio dos veículos há a necessidade que exista uma distância entre dois veículos, que possibilite que um veículo pare sem colidir com o veículo à sua frente. Essa distância é função do tempo de reação do motorista, do espaço necessário para que ele pare seu veículo, acrescentado-se uma distância de segurança, como pode ser visto na Figura 2.15. O cálculo dessa distância é feito em função da velocidade dos veículos e, em casos reais, também depende das condições da via, do tempo, entre outras [16]. Se a velocidade dos veículos é menor, a distância de

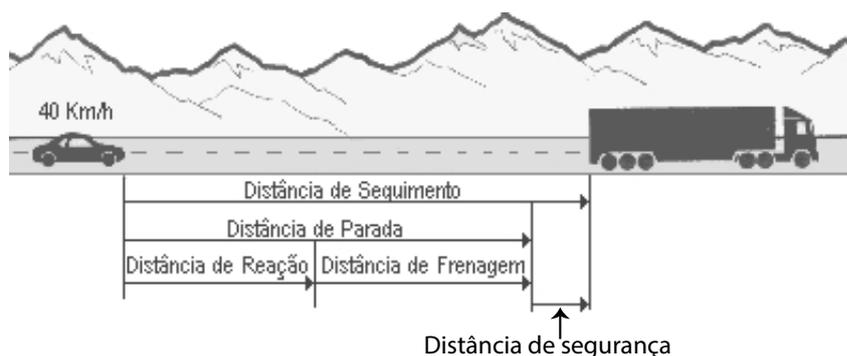


Figura 2.15: Distância de segurança.
 Fonte: Adaptada de DETRANPR [17].

segurança (\bar{s}) também é menor. Neste caso, pode-se afirmar que o fluxo mantém-se livre para um valor de densidade maior do que quando a velocidade máxima da via é maior, requerendo, conseqüentemente, maior distância entre os veículos (Equação 2.13). Cabe ressaltar que em casos reais, em muitas situações, a distância de segurança sugerida não é respeitada. Neste caso, à medida que o veículo diminui esta distância, maior é o valor do fluxo livre, conforme descreve as Equações 2.15 e 2.11.

No entanto, a análise anterior só é válida enquanto a relação linear dada pela Equação 2.15 for sustentada pela velocidade média da via igual à velocidade máxima. Sabe-se que a partir de um determinado momento, os veículos não conseguem andar em sua velocidade máxima, tendo que reduzi-la, em função da distância em que está do veículo à sua frente.

A Figura 2.16 ilustra a relação entre os três diagramas anteriormente apresentados: fluxo-densidade, velocidade-densidade e velocidade-fluxo que são analisados em conjunto. Nota-se que para uma densidade $\rho = \rho_2$ no diagrama fluxo-densidade (Figura 2.16 A), por exemplo, a velocidade varia de $v_1 \leq v \leq v_2$, como pode ser visto no diagrama velocidade-densidade (Figura 2.16 B). Em seguida, no diagrama velocidade-fluxo (C) nota-se que para o intervalo do fluxo para $J_2 \leq J \leq J_{max}$, tem-se o mesmo intervalo de velocidade $v_1 \leq v \leq v_2$. Pode-se observar que a região de meta-estabilidade do diagrama (A) está incluída na região considerada livre no diagrama velocidade-fluxo (C), apesar da velocidade média estar decaindo. Isto significa que podem acontecer pequenos congestionamentos na via que rapidamente são absorvidos.

O *Highway Capacity Manual* (HCM) [16], que é importante publicação sobre transporte e o tráfego viário, classifica em seis níveis de serviço de via em função da sua densidade na região de fluxo livre, descritas a seguir:

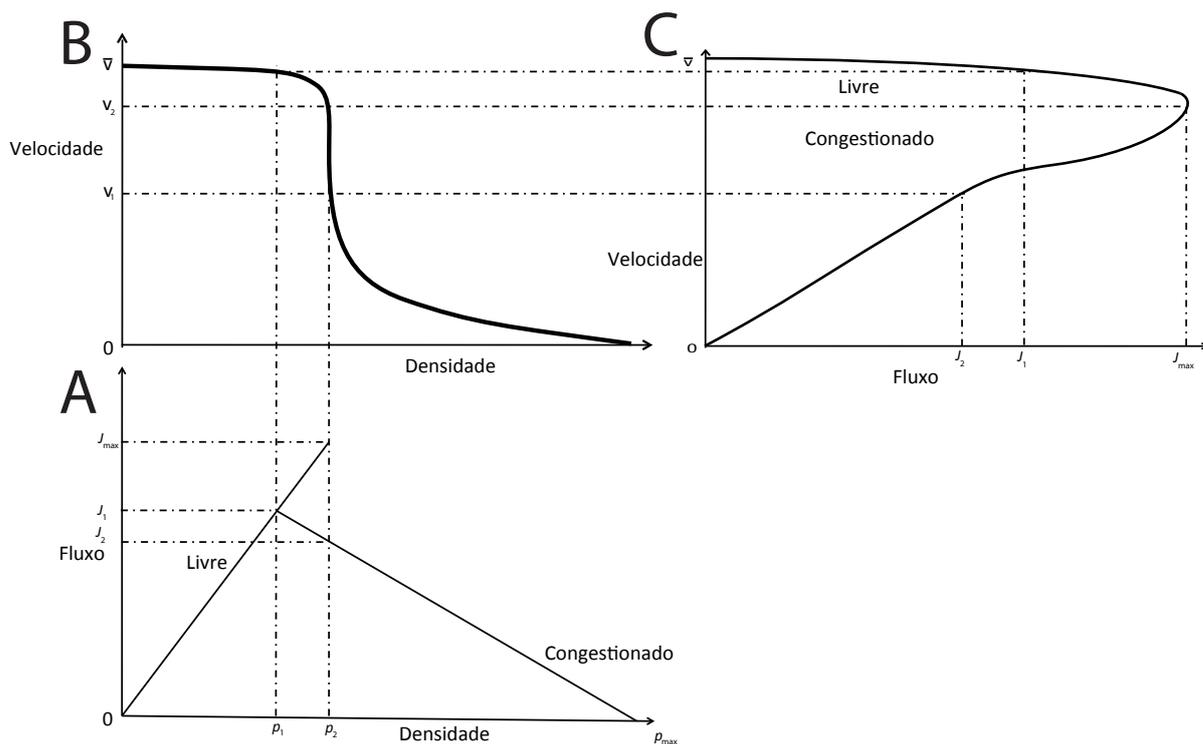


Figura 2.16: Relação do fluxo com a densidade e a velocidade.

- nível **A** ($0 \text{ veículo/km} \leq \rho < 7 \text{ veículos/km}$): a via apresenta-se vazia de veículos e o fluxo é livre e os veículos trafegam distantes uns dos outros;
- nível **B** ($7 \text{ veículos/km} \leq \rho < 11 \text{ veículos/km}$): a via apresenta também o fluxo livre, mas é perceptível o número maior de veículos na via.
- nível **C** ($11 \text{ veículos/km} \leq \rho < 16 \text{ veículos/km}$): a via apresenta um fluxo intenso e naquelas onde a velocidade máxima está acima de 80km/h , há uma pequena redução na média de velocidade. Nesta densidade, eventualmente pequenos congestionamentos são formados, dependendo da velocidade máxima da via, e em seguida são imediatamente absorvidos;
- nível **D** ($16 \text{ veículos/km} \leq \rho < 22 \text{ veículos/km}$): mostra que os veículos já trafegam bem próximos uns dos outros. A velocidade média da via é reduzida em função do crescente volume de veículos. Nesta faixa, os congestionamentos são formados mais facilmente e demoram mais para serem desfeitos;
- nível **E** ($22 \text{ veículos/km} \leq \rho < 28 \text{ veículos/km}$): a via encontra-se próxima da sua capacidade máxima (J_{max}). Os veículos estão trafegando com o espaçamento mínimo entre eles, ou seja, os veículos estão bem próximos uns dos outros. Há a

formação de congestionamentos que levam mais tempo para serem absorvidos.

- nível **F** ($\rho > 28$ veículos/km): caracteriza o fluxo congestionado.

A Figura 2.17 mostra, no modelo teórico, a velocidade média da via na região de fluxo livre. Deste modo, para cada uma das velocidades: 90km/h, 100km/h, 110km/h e 120km/h, calcula-se a respectiva velocidade de fluxo livre (*Free-Flow Speed* - FFS). Neste diagrama, a velocidade é dada em quilômetros por hora (km/h) e o fluxo é dado em veículos de passeio por hora por faixa (*passenger car/hour/lane* - pc/h/ln). Nota-se que não é possível manter a velocidade máxima, de fluxo totalmente livre, mantendo-

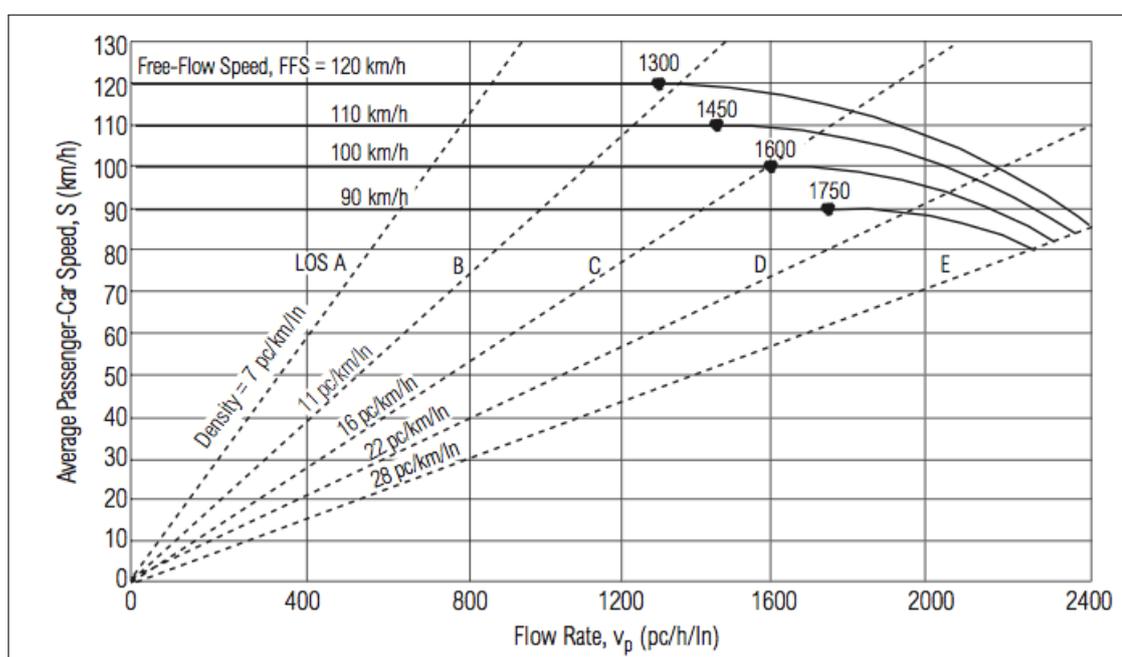


Figura 2.17: Diagrama velocidade-fluxo teórico do HCM.

Fonte: HCM [16].

se a distância segura requerida em cada uma dessas situações. Para uma mesma via, onde todos os veículos mantêm sua distância de segurança, a densidade da via, dada pelo número de veículos por quilômetros (veículos/km) é função somente da velocidade máxima permitida, ou seja, mantendo-se a distância de segurança, não é mais possível manter-se na velocidade máxima, nas situações descritas a seguir:

- se o veículo está a 120km/h, o fluxo máximo será 1300 veículos/hora, o que equivale a aproximadamente, $\rho = 11$ veículos/km;
- se o veículo está a 110km/h, o fluxo máximo será 1450 veículos/hora, o que equivale a aproximadamente, 13 veículos/km;

- se o veículo está a 100km/h, o fluxo máximo será 1600 veículos/hora, o que equivale a aproximadamente, 16 veículos/km;
- se o veículo está a 90km/h, o fluxo máximo será 1750 veículos/hora, o que equivale a aproximadamente, 19 veículos/km.

Isso significa que a velocidade sendo menor, a distância de segurança também é menor e o valor máximo de fluxo livre é também maior.

Para exemplificar um caso real, a Figura 2.18 mostra diagrama-fluxo-densidade obtido a partir de dados reais em uma via conhecida como *Queen Elizabeth Way* entre as cidades de Oakville e Toronto no Canadá. A seção da via considerada foi de 5km. As medidas foram feitas em 45 dias, durante duas horas na parte da manhã, com tempo bom e sem registro de batidas ou quebra de veículos. Os veículos maiores, como os ônibus e caminhões, foram contados na mesma unidade que os carros (carros de passeio - CP). A velocidade máxima da via era de 100km/h. Cada ponto do diagrama corresponde a uma média aritmética do fluxo e da densidade em um intervalo de tempo de 5 minutos, onde a média do fluxo é dada pelo número de veículos que passam neste intervalo de tempo ($T = 5$ minutos) e a densidade é obtida pela Equação 2.15, onde a velocidade média é calculada a partir da velocidade desses veículos que passaram no intervalo de tempo T [18].

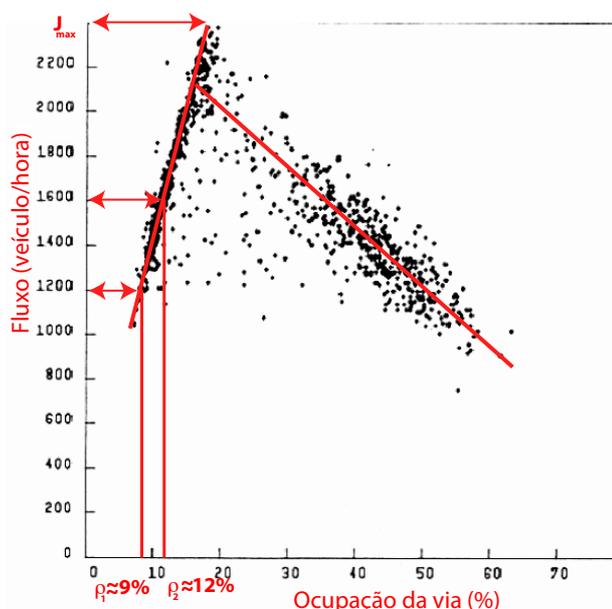


Figura 2.18: Diagrama fundamental - dado real.
Fonte: Adaptada de Fred et al. [18].

2.4 Aquisição das Medições

A validação de um modelo de TAC é, normalmente, feita analisando-se principalmente o diagrama fluxo-densidade. Este diagrama, em casos reais, é construído a partir de medições feitas na via e por faixa, durante um intervalo de tempo. No caso de simulação do comportamento do tráfego veicular, há a necessidade de simular essa extração de dados para comparar com resultados obtidos dos dados reais com o objetivo de verificar se estes representam qualitativamente e quantitativamente a dinâmica do fluxo. Para isto, é necessário simular um sensor de movimento em uma seção da via, com o objetivo de contar o número de veículos e registrar suas velocidades, quando estes passam nesta seção da via em um determinado intervalo de tempo. No caso da simulação, considera-se que as medições são realizadas quando os veículos passam em uma determinada célula, chamada de célula detectora de movimento. Assim, as expressões obtidas na Seção 2.3 são utilizadas para o cálculo do fluxo e velocidade média da via, Equações 2.5 e 2.7 respectivamente, onde considera-se apenas um ponto de observação ao longo do tempo. Para obter a densidade, deve-se reescrever a Equação 2.15 em função de ρ :

$$\rho = \frac{J}{\bar{v}} \quad (2.16)$$

Substituindo-se as Equações 2.5 e 2.7 na Equação 2.16, tem-se que a densidade é dada por:

$$\rho = \frac{m^2}{T \sum_{i=1}^m v_i} \quad (2.17)$$

A Equação 2.17 calcula apenas a densidade para os veículos que passam sobre a célula detectora de movimento. Embora os veículos que ficam parados sobre esta célula não contribuam para o fluxo, estes veículo contribuem para a densidade média [19]. Neste sentido, deve-se acrescentar à Equação 2.17 a parcela referente à quantidade de instantes de tempo que um veículo ficou parado sobre a célula detectora de movimento. Logo, a Equação 2.17 é reescrita como:

$$\rho = \frac{m^2}{T \sum_{i=1}^m v_i} + \frac{N_s}{T} \quad (2.18)$$

onde N_s representa a quantidade de instantes de tempo que um veículo fica parado sobre a mesma célula [19]. Assim, para avaliar os resultados das simulações do modelo proposto nesta tese, empregam-se as Equações 2.18, 2.5 e 2.7 e os respectivos diagramas.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Dentre os modelos de Autômatos Celulares para o tráfego veicular (TAC), o modelo proposto por Nagel e Schreckenberg, chamado de modelo NaSch [7], merece grande destaque, pois é um dos pioneiros a utilizar uma abordagem probabilística de AC para tráfego viário. A maioria dos modelos sugeridos posteriormente ou o cita, ou propõe alguma modificação a partir deste modelo, com o objetivo de melhor reproduzir a dinâmica do tráfego veicular. Esse modelo (NaSch), apesar de conseguir representar a mudança de fase do fluxo livre para o congestionado, é um modelo que não consegue representar a meta-estabilidade e possui, de forma geral, um valor de fluxo máximo conservador quando utiliza valores de probabilidade sugeridos na literatura [20, 21, 22] para representar a incerteza no comportamento do motorista. Fred L. H. [18] sugere que esta probabilidade esteja entre 0,30 e 0,40, isto é, de 30 a 40%. Desta forma, novos modelos de TAC têm sido propostos tanto para melhorar a relação fluxo-densidade quanto para reproduzir a meta-estabilidade ou para modelar outros comportamentos do tráfego viário.

O modelo NaSch parte dos seguintes princípios: - todos os veículos tentam andar na velocidade máxima permitida pela via ou pelo fluxo; - eventualmente, com uma probabilidade $p = p_m$, algum motorista não tem este comportamento, mantendo a velocidade ou desacelerando o veículo sem motivo algum; - além disso, a velocidade é regulada com base na distância entre o veículo analisado e o veículo à sua frente, considerando a velocidade dos veículos no instante de tempo anterior, uma vez que este modelo é explícito no tempo. Estes comportamentos são modelados por um conjunto de regras descrito no Algoritmo 1. Neste trabalho as células têm 7,5m e a velocidade máxima é de 5células/segundo, equivalente a 135km/h. Neste caso, o fluxo máximo esperado é de aproximadamente 1800 veículos/hora ou 0,5veculos/segundos aproximadamente. Resultados do modelo NaSch são apresentados na Figura 3.1 para diferentes valores de p_m .

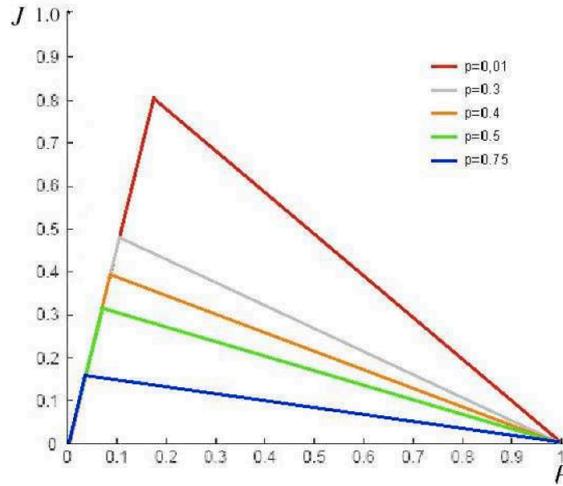


Figura 3.1: Diagrama fluxo-densidade para diferentes valores de p_m - Modelo NaSch.

```

Input: ( $p_m$ , estado atual)
Result: novo estado
1 for para todos os veículos do
2    $v_i^t \leftarrow \min[v_i^{t-1} + 1, v_{max}]$ ;
3    $p \leftarrow$  sortear numero  $\in [0, 1]$  ;
4   if  $p \leq p_m$  and  $v_i^{t-1} > 0$  then
5      $v_i^t \leftarrow v_i^{t-1} - 1$ ;
6   end
7    $d_i^t \leftarrow x_i^{t-1} - x_{i-1}^{t-1} - 1$ ;
8   if  $v_i^t > d_i^t$  then
9      $v_i^t \leftarrow d_i^t$ ;
10  end
11   $x_i^t \leftarrow x_i^{t-1} + v_i^t$ ;
12 end

```

Algoritmo 1: Algoritmo do modelo NaSch.

Uma outra família de modelos probabilísticos de TAC que tem recebido grande atenção, objetiva representar a lenta reação do motorista em recuperar sua velocidade quando parado, isto é, a inércia do motorista. Este efeito é conhecido como *slow-to-start*. Em alguns trabalhos, como os desenvolvidos por Barlovic et al. [23], Benjamin et al. [9], Takayasu e Takayasu [8], Tian [24] e Zhao et al. [25], o efeito *slow-to-start* é modelado com o objetivo de reproduzir a região de meta-estabilidade no diagrama fundamental, embora não seja responsável por sua causa. Os modelos *slow-to-start*, de forma geral, requerem condições iniciais especiais: *i*) para reproduzir o fluxo sincronizado os veículos necessitam estar distribuídos uniformemente na via; *ii*) para o fluxo congestionado é necessária outra condição inicial, onde os veículos são distribuídos de forma heterogênea, formando grupos de veículos, com o objetivo de garantir pontos de congestionamentos da via. Além disso, esses modelos utilizam diferentes probabilidades para fazer o ajuste de velocidades, que

considera se o veículo está parado ou movimentando-se, ou seja:

$$p(v_i^t) = \begin{cases} p_0 & \text{se } v_i^{t-1} = 0 \\ p_m & \text{se } v_i^{t-1} \geq 1 \end{cases} \quad (3.1)$$

Em Takayasu e Takayasu [8] foi proposto um modelo pioneiro para reproduzir este efeito, conhecido como modelo TT. Neste trabalho adotam-se duas probabilidades para determinar a velocidade de um veículo: dado que o veículo encontra-se parado, ele tem uma probabilidade maior de continuar parado (p_0), caso haja espaço para o veículo movimentar-se. Caso contrário utiliza a outra probabilidade, que é menor (p_m). O princípio adotado é que estando em um engarrafamento, se o veículo logo à frente anda, o motorista tem uma probabilidade maior de continuar parado ($p_0 > p_m$) caso esteja muito próximo dele, ou seja, um veículo parado dificilmente ocupa um espaço à sua frente assim que ele aparece. A Figura 3.2 ilustra o resultado do diagrama fluxo-densidade para este modelo, obtido com os valores de $p_0 = 0,75$ e $p_m = 0,01$ e com as condições iniciais especiais relativas a esta família de modelo. Este modelo apresenta bons resultados para grandes diferenças de valores entre as duas probabilidades e $p_m \ll 1$. No entanto, para esses valores de p_m ($p_m = 0,01$) considera-se que o comportamento do motorista é quase determinístico e este valor está bem abaixo do sugerido, como sugerido na literatura [8, 9, 23]. Quando aumenta-se este valor, a relação fluxo-densidade fica muito abaixo do desejado.

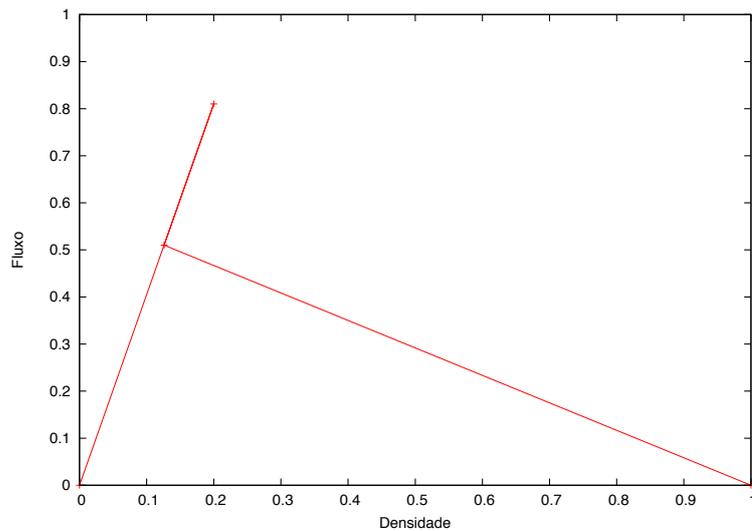


Figura 3.2: Diagrama fluxo-densidade do modelo TT com $p_0 = 0,75$ e $p_m = 0,01$.

O modelo proposto por Benjamin et al. [9] considera que se o veículo analisado foi parado pelo veículo à sua frente, esse deve ter uma probabilidade maior de continuar parado no próximo instante de tempo. De forma semelhante ao modelo TT, neste caso também há duas probabilidades e a probabilidade de permanecer parado é maior que a probabilidade para as demais velocidades, atuando somente quando o veículo à frente está a menos de duas células de distância. O modelo adota a velocidade máxima da via de 3 células/segundo, sendo que cada célula tem 7,5m. Esse valor é menor do que o utilizado na maioria dos modelos, que é de 5 células/segundo. É um modelo que consegue reproduzir o fluxo congestionado e sincronizado, com a utilização das condições iniciais já apresentadas. Este modelo tem o mesmo comportamento do modelo TT em relação aos valores das probabilidades.

Dentre os modelos da família *slow-to-start* existe ainda o modelo proposto por Barlovic et al. [23], chamado de modelo VDR (*velocity dependent randomization*). É um modelo que também trabalha com duas probabilidades. A diferença entre este modelo e os anteriores é que este não considera a distância, e sim, somente se a velocidade para determinar se um veículo tem uma maior probabilidade de manter-se parado, uma vez que já está parado, ou seja, caso o veículo analisado tenha velocidade igual a zero (0), este tem uma probabilidade maior de continuar parado no instante de tempo atual. Bons resultados também só são alcançados com uma grande diferenças de valores entre as probabilidades e mesmo assim a relação fluxo-densidade fica abaixo de $J \approx 0,6$ ou $J \approx 2160$ veículo/hora [18]. A Figura 3.3 apresenta o diagrama fundamental do modelo VDR, onde são comparados os resultados com a utilização das duas condições iniciais anteriormente descritas, com resultados obtidos pelo modelo NaSch.

O trabalho proposto por Tian [24] adota uma outra estratégia para reproduzir o efeito *slow-to-start*, visto que para representar a inércia do motorista, o modelo considera que o veículo deve manter sua velocidade por dois instantes de tempo consecutivos. Para isto, a política proposta requer uma maior demanda de memória, pois é necessário guardar um histórico dos veículos em dois tempos de simulação. Neste trabalho podem surgir diversas regiões de meta-estabilidade (braços), conforme ilustrado na Figura 3.4. Através deste modelo, surgem diferentes grupos de veículos que estão próximos entre si, mas com diferentes velocidades. As diferentes regiões de meta-estabilidade são resultados da passagem desses diferentes grupos pelo sensor de velocidade. Este modelo não requer qualquer uma das duas condições iniciais especiais ou a combinação de diferentes probabilidades.

Em síntese, os quatro modelos descritos anteriormente conseguem representar a meta-

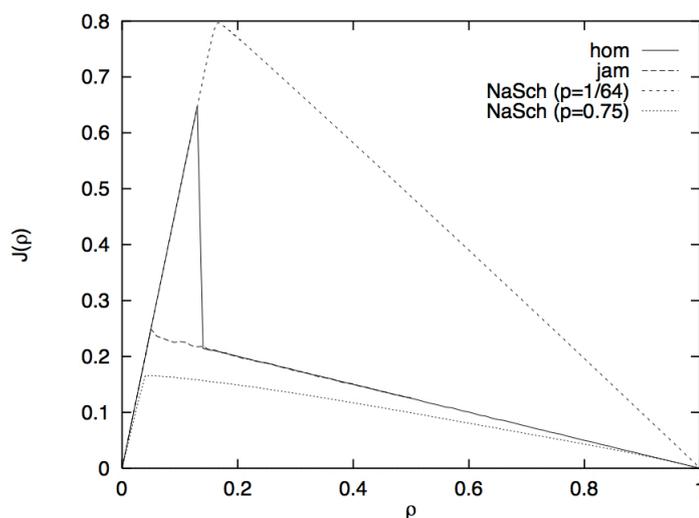


Figura 3.3: Diagrama fundamentais - modelo VDR versus modelo NasSch.
Fonte: Barlovic et al. [23].

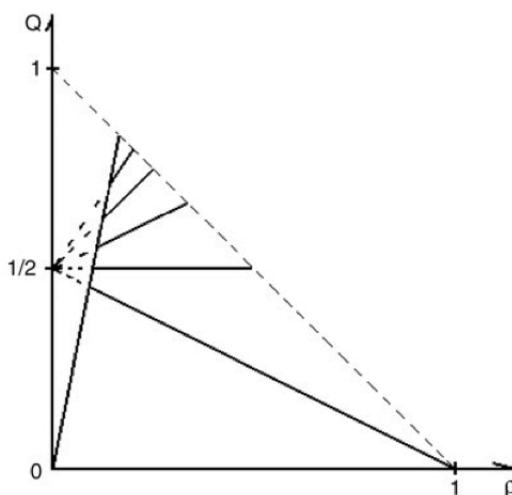


Figura 3.4: Diagrama fluxo-densidade.
Fonte: Tian, R. [24].

estabilidade, mas de forma geral, a relação fluxo densidade fica abaixo do desejado quando se utiliza valores sugeridos na literatura para considerar a incerteza no comportamento do motorista, quando o veículo está em movimento e a região de meta-estabilidade surge somente a partir de condições iniciais especiais, embora o modelo proposto por Tian [24] não adote diferentes probabilidades ou alguma condição inicial especial.

Um outro subconjunto de modelos de TCA probabilísticos é composto por modelos chamados de antecipação. Estes modelos, diferentemente dos modelos anteriores, consideram o deslocamento do veículo à frente no instante atual de tempo, ou seja, tentam

considerar, de alguma forma, o quanto que os veículos vão deslocar-se no instante de tempo atual.

Dentre os modelos que adotam um política de antecipação, o modelo proposto por Emmerich e Rank [26] é pioneiro neste sentido. Nesse trabalho é proposta uma técnica chamada de propagação implícita de movimento, onde é utilizada uma matriz de distâncias para determinar a nova velocidade de cada veículo. Este cálculo é feito de forma sequencial no sentido contrário ao fluxo, diferentemente de outros modelos onde o movimento de cada veículo depende somente da configuração da via no instante de tempo anterior. No modelo de Emmerich e Rank [26], o movimento dos veículos tem início na posição da via onde existe o veículo mais distante em relação a outro veículo à sua frente. A partir deste movimento, cada veículo tem sua posição ajustada sequencialmente no sentido contrário ao fluxo. Apesar de melhorar a relação fluxo-densidade, ele suaviza a transição de fases e não reproduz a meta-estabilidade.

O modelo proposto por Nishinari et al. [27] é um modelo de antecipação que para ajustar a velocidade do veículo i , considera que a velocidade dos dois veículos à sua frente ($i + 1$ e $i + 2$), no tempo t , se mantêm em relação às suas respectivas velocidades no tempo $t - 1$. Caso esses veículos ($i + 1$ e $i + 2$) andem abaixo do esperado, o esquema de antecipação é reaplicado iterativamente sobre todos os veículos da via, inclusive executando esse procedimento sobre aqueles veículos que não seriam influenciados por essa mudança de velocidades. Este procedimento é repetido até que todos os veículos da via tenham suas velocidades definidas de forma que uma célula não seja ocupada por dois ou mais veículos no instante de tempo atual ou não haja uma "ultrapassagem" de um veículo sobre o outro. Este modelo adota duas probabilidades: uma que representa a probabilidade do veículo acelerar e outra que é a probabilidade do veículo reduzir sua velocidade, caso esteja movimentando-se. A Figura 3.5 apresenta o resultado deste modelo para $p_a = 0,8$ e $p_b = 0,2$, isto é, um determinado veículo tem uma probabilidade p_a de acelerar em uma (1) célula e tem também a probabilidade p_b de desacelerar em uma (1) célula, caso esteja em movimento ($v > 0$) no instante de tempo atual.

O trabalho proposto por Kokubo et. al [28] é um extensão do modelo apresentado em Nishinari et al. [27]. A diferença deste para o trabalho anterior são as regras do esquema de aceleração. Este modelo trabalha com quatro probabilidades diferentes, que são escolhidas de acordo com a distância de segurança (D), a velocidade do veículo i , velocidade do veículo $i + 1$ à sua frente e a distância entre estes dois veículos (d_i), conforme

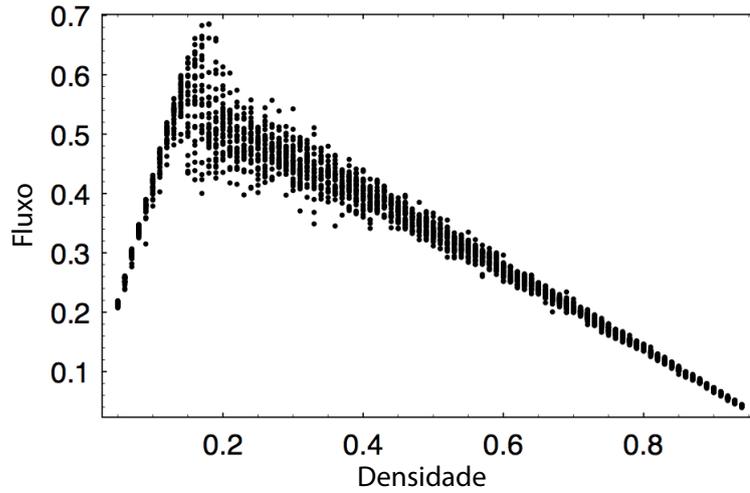


Figura 3.5: Diagrama fundamental do modelo Nishinari.
Fonte: Nishinari et al. [27].

as regras descritas a seguir:

$$p(v_i^t) = \begin{cases} p_1 & \text{se } d_i \geq D \\ p_w & \text{se } d_i < D \wedge v_i < v_{i+1} \\ p_3 & \text{se } v_i = v_{i+1} \\ p_4 & \text{se } v_i > v_{i+1} \end{cases} \quad (3.2)$$

onde a constante D tem valor de $110m$ para uma via com velocidade máxima de $100km/h$. Em síntese: *i*) se o veículo i está longe do veículo $i + 1$ ($d_i \geq D$), a probabilidade de desacelerar é $1 - p_1$; *ii*) se o veículo i estiver perto do $i + 1$ ($d_i < D$), mas se o veículo $i + 1$ está mais rápido ($v_i < v_{i+1}$), a sua probabilidade de desacelerar é de $1 - p_2$; *iii*) se os dois veículos (i e $i + 1$) estiveram na mesma velocidade, essa probabilidade de desaceleração é maior que a anterior ($1 - p_3$); *iv*) e o veículo i tem uma probabilidade maior de desacelerar ($1 - p_4$) quando estiver mais rápido que o veículo $i + 1$ ($v_i > v_{i+1}$), onde $p_1 > p_2 > p_3 > p_4$. Portanto, na medida que um veículo aproxima-se de outro à sua frente, ele vai desacelerando continuamente de forma a evitar que tenha necessidade de desacelerar em mais de uma célula em um único instante de tempo, como pode acontecer no modelo NaSch. Isso faz com que este ajuste de velocidade (desaceleração) tenha valores próximos da realidade em relação ao que um veículo pode desacelerar em um instante de tempo. A Figura 3.6 mostra o diagrama fluxo-densidade deste modelo.

Uma outra família de TAC que tem sido amplamente pesquisada é o Luz de Freio (*break-light*). O trabalho proposto por Knospe et al. [29], assim como os demais modelos TAC, é baseado no modelo NaSch e acopla regras do modelo VDR, para definir a veloci-

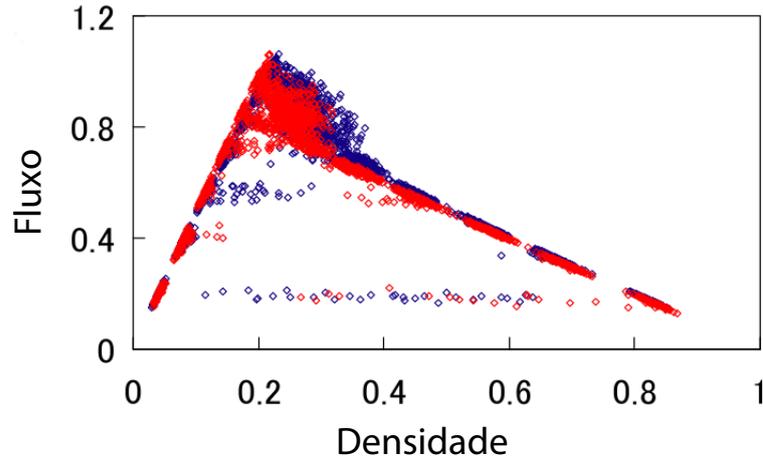


Figura 3.6: Diagrama fundamental do modelo Nishinari versus modelo Kokubo.
Fonte: Adaptada de Kokubo et. al [28].

dade do veículo no instante de tempo atual. A outra parte é dada pelo conceito de Luz de Freio que utiliza uma variável lógica para representar a Luz de Freio de um veículo. Quando esta variável tem valor um (1) indica que o veículo está desacelerando ou parado ($v_i = 0$). O outro valor da variável é zero (0) e indica que o veículo está acelerando [30]. A política antecipatória proposta neste modelo é dada por:

$$\begin{aligned} d_{is} &= d_i + \max \left[\min \left[d_{i+1}, v_{i+1}^{t-1} \right] - d_{sec}, 0 \right] \\ v_i^t &= \min \left[d_{is}, v_i^{t-1} + 1 \right] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Essa política de antecipação considera que dado um veículo i , este vai mover-se no instante de tempo atual, seja pela velocidade do veículo à sua frente (v_{i+1}^{t-1}) ou pela distância que este veículo está do veículo $i + 2$ (d_{i+1}), dado por: $\min \left[d_{i+1}, v_{i+1}^{t-1} \right]$. Para isto, é calculada a distância efetiva (d_{is}), que é composta pela distância entre o veículo i e o veículo à sua frente, acrescentando-se o movimento deste no instante de tempo atual, o parâmetro d_{sec} que representa uma distância de segurança. A região de meta-estabilidade surge em função das características dos modelos *slow-to-start*, pois também neste modelo, um veículo tem uma probabilidade maior de permanecer parado se já estiver parado, embora não necessite das duas condições iniciais especiais, comuns nos modelos *slow-to-start*. A Figura 3.7 apresenta dois diagramas fluxo-densidade, onde o diagrama da esquerda foi obtido de forma empírica e o da direita foi simulado, considerando a velocidade máxima da via foi de 108km/h.

Há modelos de AC que simulam outros comportamentos do tráfego, como o que ocorre

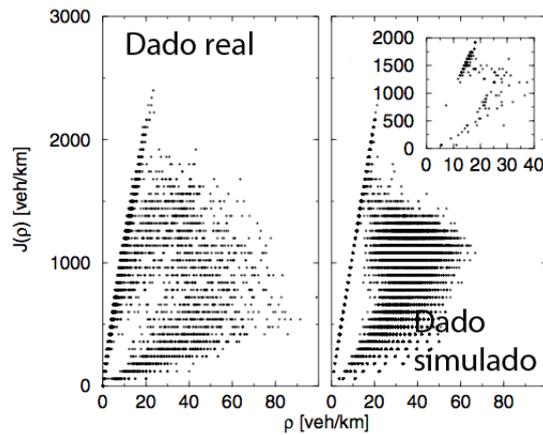


Figura 3.7: Diagrama fundamental do modelo Luz de Freio.

Fonte: Adaptada de Knospe et al. [29].

com pista aberta, onde há entrada e saída de veículos na via [31, 32, 33, 34, 35], ou modelos com mais de uma pista [36, 37, 38], modelos que simulam o trânsito em um cidades [39, 40, 41, 42, 43], entre outros. Os modelos que simulam o trânsito em cidades, utilizam os modelos de AC adaptando-os para simularem a dinâmica do tráfego em cruzamentos, sinais, entre outros, não sendo o objetivo do presente trabalho. Os modelos que abordam a questão de vias com mais de uma faixa são detalhados no Capítulo 6. Os modelos que representam pista aberta, trabalham com condição de contorno abertas (*Open Boundaries Conditions*), isto é, condições que representam a continuidade do domínio simulado definindo políticas tanto para entrada quanto para a saída de veículos no subdomínio considerado.

Neste sentido, Jiang e Wu [32] apresentam um modelo que usa por base o modelo Luz de Freio, com condições de contorno abertas, onde a política de saída dos veículos é diferenciada em relação à de entrada. Na política de saída de veículos, quando estes chegam ao final do subdomínio, há uma probabilidade de ficarem parados por alguns instantes de tempo antes de deixarem o subdomínio simulado. Por outro lado, os veículos que entram são inseridos em uma das cinco primeiras posições da malha, de forma aleatória, caso a célula esteja desocupada, e a velocidade é sorteada com $v \in [0 : v_{max}]$, sendo v_{max} o limite de velocidade da via. Uma outra abordagem de continuidade do domínio é apresentada por Nassab et al. [33]. Neste trabalho são definidas duas probabilidades: uma que é aplicada sobre o veículo que está quase saindo do subdomínio e descreve a incerteza deste ficar parado por mais de um instante de tempo antes de sair. A outra probabilidade determina a frequência de entrada dos veículos no subdomínio. Estes políticas são aplicadas ao trabalho utilizando o modelo NaSch como base.

Uma outra família de modelos que parecem promissores e que são objeto de estudo da presente tese, são modelos de antecipação que tentam reproduzir a meta-estabilidade sem a necessidade da utilização de condições iniciais especiais e que utilizam, para definir a incerteza do comportamento do motorista, uma função de densidade de probabilidade (FDP) que não é necessariamente constante em toda sua região da definição. Propostas de modelos com estas características são apresentadas a partir do Capítulo 4.

Capítulo 4

Resultados Preliminares

Lima [44] propôs um modelo de antecipação (TAC-UFF) para melhor representar a relação fluxo-densidade do modelo de tráfego viário e que utiliza uma função de densidade de probabilidade (FDP), que não é constante, para representar a aleatoriedade do comportamento do motorista. Neste trabalho Lima propõe uma FDP constante por partes. Além disso, o esquema de antecipação proposto para calcular velocidade e posição dos veículos no tempo atual (t), propõe uma estratégia para estimar o movimento do veículo à frente, neste mesmo instante de tempo, e um reajuste de valores de velocidade, caso algum veículo não se movimente conforme o esperado. Para isso propõe um processo iterativo que reajusta a velocidade e posição somente dos veículos que seriam afetados por este movimento inesperado. Com isso consegue obter uma boa relação fluxo-densidade e representar a meta-estabilidade sem a necessidade de condições iniciais especiais ou de combinação de valores de probabilidades.

Resultados preliminares do trabalho proposto nesta tese tiveram por base os resultados obtidos em Lima [44]. Inicialmente foi proposta uma modificação neste modelo para avaliar os resultados da utilização de uma função de densidade de probabilidade que não fosse constante, mas que fosse contínua. Em seguida, avaliando os resultados promissores obtidos e com o objetivo de minimizar o número de operações e possibilitar que o modelo de TAC fosse implementado em uma arquitetura paralela de computação, caso alguma aplicação prática assim exigisse, tentou-se eliminar o processo iterativo do modelo TAC-UFF. Para isso foi proposto um novo modelo de antecipação que também é explícito e que considera, para ajustar a velocidade dos veículos no tempo atual, o quanto que o veículo à frente pode movimentar-se, tendo em vista sua velocidade e o espaço que tem disponível para sua movimentação.

Neste capítulo apresenta-se na Seção 4.1, o modelo TAC-UFF, proposto por Lima [44].

Utilizou-se uma FDP contínua no modelo TAC-UFF e seus resultados são descritos na Seção 4.2. A Seção 4.3 apresenta-se uma nova proposta para o esquema de antecipação, modificando o modelo TAC-UFF (TAC-UFF-M) e a Seção 4.4 apresenta seus resultados utilizando FDP normal, que foram avaliados para diferentes valores de média e desvio padrão.

4.1 TAC-UFF: Modelo de Antecipação com Ajuste de Fluxo

Lima [44] propôs um modelo de antecipação que para atualizar a velocidade do veículo i no tempo t , considera o espaço entre este e o veículo à sua frente no instante de tempo anterior ($t - 1$) e acrescenta a este espaço uma parcela relativa à estimativa de velocidade do veículo que está à sua frente ($i + 1$). Esse ajuste é feito considerando-se a Equação 4.1, onde o parâmetro α determina a incerteza que um veículo tem em relação ao movimento do veículo à sua frente, deste continuar a mover-se na mesma velocidade do instante de tempo atual, ou seja:

$$d_{is}^t = d_i^{t-1} + int\left((1 - \alpha)v_{i+1}^{t-1}\right) \quad (4.1)$$

onde d_{is}^t é chamada de distância efetiva. A função int representa o arredondamento simétrico para um valor inteiro. A distância entre dois veículos consecutivos no instante de tempo $t - 1$ é dada por d_i^{t-1} ; v_{i+1}^{t-1} , é a velocidade do veículo à frente do veículo i em $t - 1$ e $\alpha \in [0, 1]$. Assim, quando $\alpha = 0$ indica que o veículo i vai considerar que o veículo à sua frente vai continuar a movimentar-se na mesma velocidade do instante do tempo anterior. Do contrário, com $\alpha = 1$, o veículo analisado vai considerar que o veículo à sua frente não vai mover-se no instante de tempo atual, semelhante ao modelo NaSch.

Para definir o valor de α Lima [44] propõe que se utilize uma FDP que não se mantém constante em todo seu intervalo de definição. Isto significa que existirá uma probabilidade maior para a ocorrência de alguns valores de α , em relação a outros. Lima [44] propõe que o parâmetro α seja definido por uma FDP uniforme por partes, como a apresentada na Figura 4.1, para exemplificar. Nesta Figura pode-se observar que há uma probabilidade maior de ocorrência de valores em determinadas regiões.

Para que a variável α possa assumir valores definidos pela FDP escolhida, seus valores são sorteados adotando-se o método conhecido como Método de Monte Carlo - Técnica da Rejeição [45], descrita na Subseção 4.1.1.

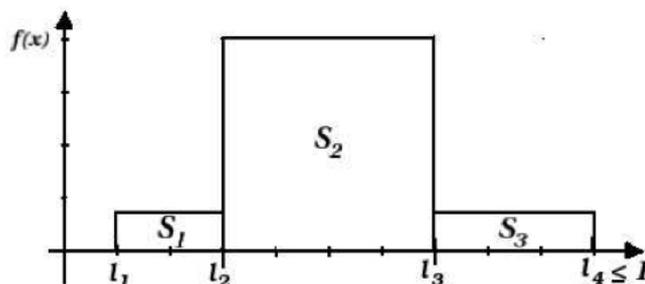


Figura 4.1: Distribuição com as regiões S_1 , S_2 e S_3 .

Fonte:Lima [44].

Neste modelo todos os veículos tentam andar na velocidade máxima da via ou permitida pelo fluxo; para acelerar, o motorista considera o espaço entre o seu veículo (i) e o veículo à sua frente ($i + 1$), acrescida da expectativa deste manter a velocidade no instante de tempo atual. Contudo, a qualquer momento existe a possibilidade do veículo à frente ($i + 1$) não andar o estimado pelo veículo i . Quando este motorista não movimentar-se o esperado, ele sinaliza, quando necessário, para o veículo que vem atrás, veículo (i), para que este possa ajustar sua velocidade, evitando colisões.

O esquema utilizado no modelo TAC-UFF para sinalizar ao veículo de trás que a velocidade não foi mantida, é uma característica fundamental do trabalho desenvolvido por Lima [44]. Sempre que um motorista anda menos do que esperado pelo veículo que está atrás, há necessidade de se reajustar o movimento de todos os veículos que são afetados por aquele veículo que teve o seu comportamento alterado. Este grupo de veículos é chamado de *cluster* de veículos. Neste caso, o primeiro veículo do *cluster* tem sua velocidade, ajustada para que não colida com o veículo à sua frente. A partir deste ponto, todos os veículos que compõem o *cluster* têm suas velocidades ajustadas, em um processo recursivo. Entretanto, durante esse procedimento de ajuste, algum veículo pode, novamente, ter sua velocidade ajustada abaixo do esperado pelo veículo anterior. Neste caso, um novo *cluster* é formado, sendo este sempre menor que o anterior. Assim, de forma iterativa, os veículos vão tendo suas velocidades ajustadas e, eventualmente, novos *clusters* são formados. Dessa forma, é garantida a convergência do procedimento, pois em cada *cluster*, no mínimo, o primeiro veículo é retirado. O pior caso é caracterizado quando todos os veículos do domínio devem ter suas velocidades reajustadas no *cluster* inicial. Mesmo assim, o processo converge, mas de forma linear [44].

O conjunto de regras deste modelo é apresentado pelos Algoritmos 2 e 3: o primeiro Algoritmo define a velocidade de cada veículo no instante (t). Já o Algoritmo 3 tem o objetivo de resolver o *cluster* de veículos e, eventualmente formar novos *clusters*, para

serem resolvidos através de uma chamada recursiva (linha 9). A linha 18 do Algoritmo 2 faz a atualização da posição de cada veículo na malha do AC.

```

Input: ( $p_m$ , estado atual)
Result: novo estado
1 for para todos os veículos do
2    $v_i^t = \min[v_i^{t-1} + 1, v_{max}]$ ;
3    $p = \text{sortear número} \in [0, 1]$ ;
4   if  $p \leq p_m$  and  $v_i^{t-1} > 0$  then
5      $v_i^t = v_i^{t-1} - 1$ ;
6   end
7    $\alpha_i^t = \text{Monte Carlo}$ ;
8    $d_i^t = x_i^{t-1} - x_{i-1}^{t-1} - 1$ ;
9    $d_{is}^t = d_i^t + \text{int}(v_{i+1}^{t-1} \times (1 - \alpha_{i+1}^{t-1}))$ ;
10  if  $v_i^t > d_{is}^t$  then
11     $v_i^t = d_{is}^t$ ;
12  end
13  if  $\text{int}(v_i^{t-1} \times (1 - \alpha_i^t)) > d_{is}^t$  then
14    resolve cluster de veículos ( $i$ );
15  end
16 end
17 for para todos os veículos do
18    $x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$ ;
19 end

```

Algoritmo 2: Modelo de antecipação - algoritmo principal.

O primeiro veículo a ser inserido no *cluster* é veículo imediatamente atrás do veículo que teve o comportamento diferente do esperado. Posteriormente, todos os veículos afetados são incluídos até o veículo que tem espaço para mover-se sem ser afetado pelo movimento do veículo que está à sua frente. Logo, os veículos afetados são todos os que satisfazem:

$$v_t^t \leq d_i^{t-1} \quad (4.2)$$

```

Input: ( $p_m, i$ )
Result: novo estado
1 while  $v_i^t > d_i^t$  do
2    $\alpha_i^t = \text{Monte Carlo}$ ;
3    $d_i^t = x_i^{t-1} - x_{i-1}^{t-1} - 1$ ;
4    $d_{is}^t = d_i^t + \text{int}(v_{i+1}^{t-1} \times (1 - \alpha_{i+1}^{t-1}))$ ;
5   if  $v_i^t > d_{is}^t$  then
6      $v_i^t = d_{is}^t$ ;
7   end
8   if  $\text{int}(v_i^{t-1} \times (1 - \alpha_i^t)) > d_{is}^t$  then
9     Resolve Cluster de Veículos ( $i$ );
10  end
11   $i = i - 1$ ;
12 end

```

Algoritmo 3: Modelo de antecipação - algoritmo para resolver cluster de veículos.

4.1.1 Escolha do α - Técnica da rejeição

Para gerar os valores de α de acordo com uma FDP utilizada, adota-se método de Monte Carlo (técnica da rejeição) [45] que consiste em:

Dada a função $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = y$ onde:

- A é o conjunto de valores que $\alpha \in [0, 1]$ pode assumir;
- $\int_0^1 f(x)dx = 1$;

o procedimento da técnica da rejeição é dado por:

- sorteio: é sorteado um par ordenado (x, y) ;
- rejeição: se $y > f(x)$ então o par é rejeitado e retorna-se ao passo do sorteio, caso contrário $\alpha = x$.

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados de Lima [44] para três diferentes FDPs uniformes por parte para considerar, de alguma forma, o movimento de um veículo à frente do veículo analisado. Em todos os exemplos as células têm 7,5m e a velocidade máxima (v_{max}) é de 5c/s. A primeira FDP uniforme por partes (Figuras 4.2(a)) considera, com 80% da probabilidade, que os valores sorteados e aceitos, estarão entre 0,3 e 0,7. Isto significa que o veículo i está considerando, em 80% das vezes, que a velocidade do veículo $i + 1$ no tempo t estará entre 70 e 30%, respectivamente, da velocidade que tinha no tempo $t - 1$. A Figura 4.2(b) apresenta o digrama fluxo-densidade correspondente. A segunda FDP, Figura 4.2(c), considera que 80% dos valores sorteados e aceitos para α estejam entre o intervalo 0,2 e 0,4, ou seja, a velocidade do veículo $i + 1$ no tempo t estará entre 80% e 60% de sua velocidade do tempo anterior. O resultado desta simulação é mostrado na Figura 4.2(d). A última FDP, Figura 4.2(e), determina que 90% desses valores estão abaixo de 0,2, isto é, a velocidade em t será no mínimo, 80% da velocidade no tempo $t - 1$, com 90% da probabilidade e o resultado da simulação é apresentado na Figura 4.2(f).

Observando os diagramas fluxo-densidade das três distribuições adotadas, Figuras 4.2(b), 4.2(d) e 4.2(f), nota-se que elas reproduzem bem o diagrama esperado tanto em relação ao valor máximo em que o fluxo é livre, como reproduz a meta-estabilidade. Pode-se observar também a influência da política de antecipação na relação fluxo-densidade, para uma mesma velocidade máxima da via. Quanto mais próximos os veículos movimentam-se na via, melhor é o fluxo. Por outro lado, um comportamento global que considera

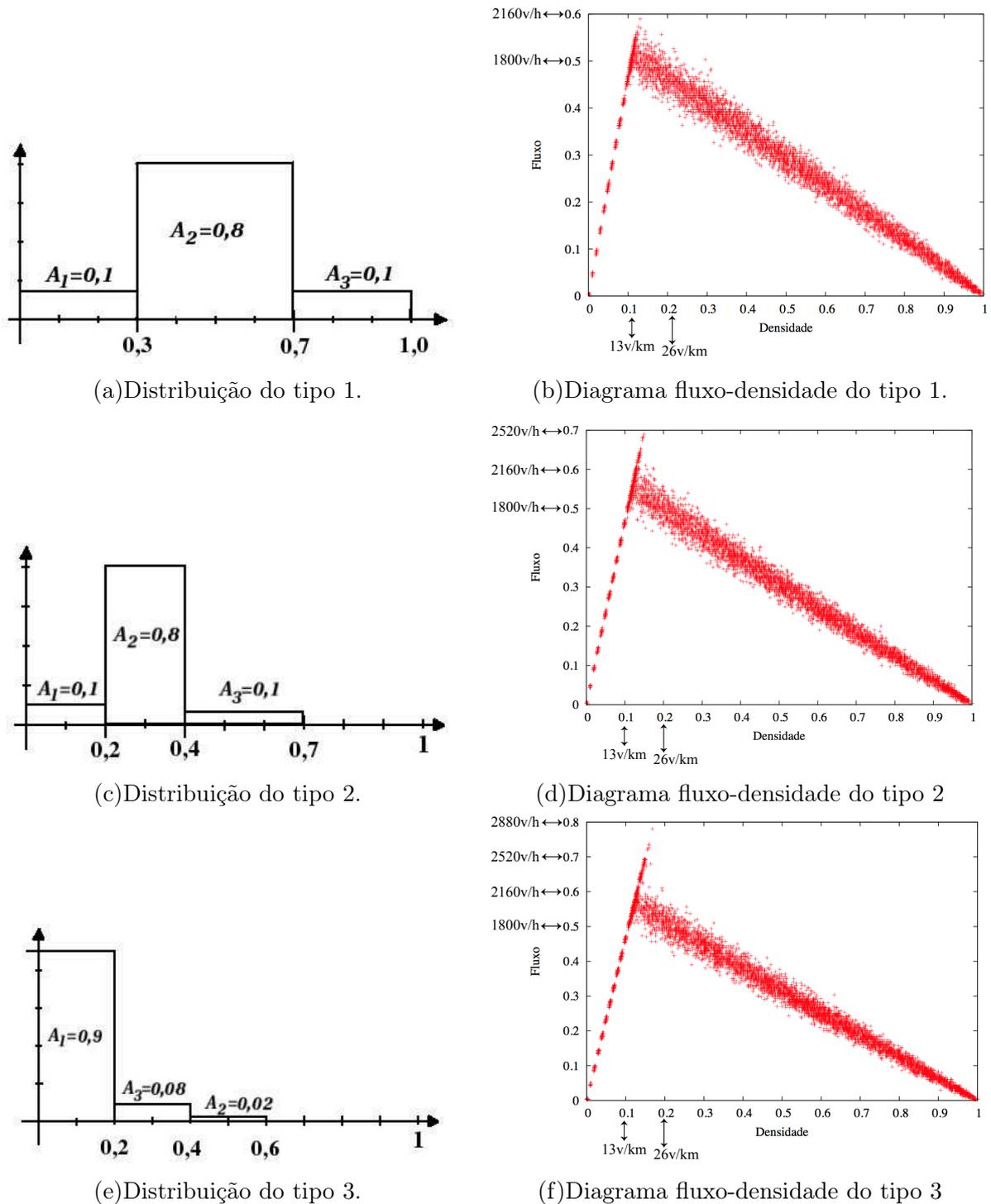


Figura 4.2: Distribuições e diagramas da relação fluxo-densidade das três FDP adotadas. Fonte: Adaptada de Lima [44].

menos o movimento do veículo à frente, acaba por forçar o surgimento de espaços entre os veículos. Uma vez que quanto maior a distância entre dois veículos, maior é o intervalo de tempo entre eles, isso faz com que o fluxo seja diminuído para uma mesma densidade, como descreve a Equação 2.13.

4.2 Primeiras Investigações

Como descrito anteriormente, o trabalho desenvolvido por Lima [44] propõe um modelo de TAC promissor, pois consegue reproduzir as características básicas do fluxo, com uma boa relação fluxo-densidade, e representa a meta-estabilidade sem a necessidade de condições iniciais especiais ou de determinadas combinações de valores de probabilidades, como nos modelos *slow-to-start*.

Assim, as primeiras investigações que deram origem a esta tese foram baseadas neste modelo, só que com o uso de FDP contínuas. Pretendia-se investigar a influência dessa escolha no resultado do modelo proposto, uma vez que não há trabalhos de TAC utilizando qualquer FDP que não seja homogênea em todo o domínio. Nesta primeira etapa utilizou-se uma FDP normal [46]. Deste modo, a incerteza da política de antecipação é dada pela função de densidade de probabilidade normal, como descrita pela Equação 4.3, onde a média (μ) representa a expectativa que um veículo tem do veículo à sua frente continuar movimentado-se no instante de tempo atual e o desvio padrão (σ) descreve a flutuação deste comportamento.

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (4.3)$$

A Figura 4.3 apresenta os diagramas fluxo-densidade dos resultados obtidos com diferentes valores de média ($\mu = 1, \mu = 2, \mu = 3$ e $\mu = 4$) e o desvio padrão $\sigma = 0,25$, para a FDP normal. Pode-se observar nesta Figura as três fases do fluxo, incluindo a região de meta-estabilidade. Para essas simulações foi considerada uma via com 300 células de 7,5m de comprimento, ou seja, 2,25km, com condições de contorno periódicas, como no modelo NaSch. O tempo total de simulação é de 10.000 segundos, onde os primeiros 1.000 instantes de tempo foram desconsiderados para que o resultado entre em regime permanente e as medições foram realizadas, segundo descrito em Hall et al. [47] e Chowdhury et al. [3], a cada 300 segundos (5 minutos).

Em resumo, os resultados apresentados mantêm as características encontradas em Lima [44], isto é, quanto mais um veículo considera que o veículo à sua frente vai continuar movimentando-se na mesma velocidade, mais ele considera a distância efetiva e mais próximos eles estão, aumentando portanto o valor máximo da relação fluxo-densidade.

Foram realizados também testes para outros valores de desvio padrão: $\sigma = 0,12$, $\sigma = 0,50$ e $\sigma = 0,75$ e média $\mu = 2$. Os resultados são apresentados na Figura 4.4. e

pode-se observar que essas alterações não representaram uma significativa alteração no comportamento global [46].

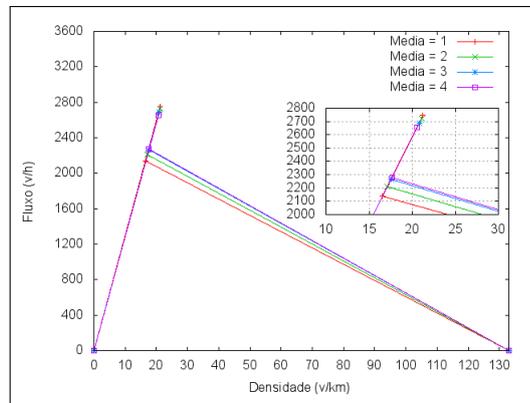


Figura 4.3: Diagrama velocidade-fluxo com diferentes valores de média.

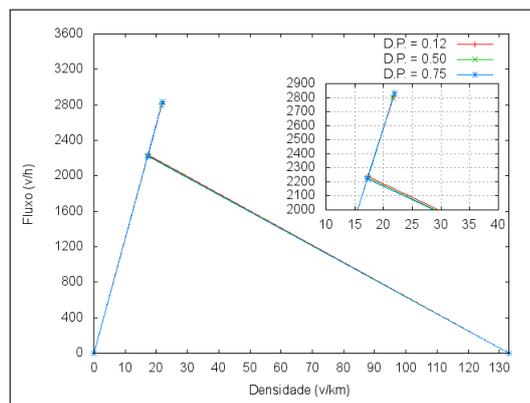


Figura 4.4: Diagrama velocidade-fluxo com diferentes valores de desvio padrão.

4.3 TAC-UFF-M: Modelo de Antecipação com Percepção da Distância

Embora o modelo proposto por Lima [44] apresente bons resultados, o processo iterativo para ajuste e velocidades pode ser demorado em casos mais críticos. Além disso, dependendo da dimensão do problema analisado, pode ser interessante paralelizar o código computacional utilizado para realizar as simulações dos modelos de Autômatos Celulares. O processo iterativo para ajuste do movimento dos veículos, proposto por Lima [44], dificulta essa paralelização devido aos diversos processos iterativos utilizados para resolver os *clusters* de veículos que surgem na via, que têm características estritamente sequenciais.

A partir disso pretendeu-se desenvolver um outro modelo de TAC (TAC-UFF-M) tão robusto quanto o proposto por Lima [44], mas sem o procedimento iterativo de ajuste de

fluxo e que possa ser mais facilmente utilizado em uma arquitetura paralela. As políticas de antecipação, em geral, fazem uma estimativa da velocidade do veículo que está à frente do veículo analisado, a fim de considerar sua nova posição e com isso, avaliar quanto o veículo considerado poderá movimentar-se. Normalmente considera-se que o veículo manterá a velocidade no instante de tempo anterior caso, neste tempo, tenha distância para movimentar-se. Isso significa que a distância do veículo i ao veículo $i+1$ é considerada no instante de tempo anterior.

No caso específico do modelo de ajuste de fluxo proposto por Lima [44], que não considera a distância que o veículo $i+1$ poderá movimentar-se e, com isso, há a probabilidade desta estimativa não ser tão boa, e considerar que um veículo pode movimentar-se mais do que o veículo à sua frente vai realmente deslocar-se no instante de tempo atual. Portanto, essa situação pode fazer com que veículo i queira ocupar uma posição não permitida, devido a posição do veículo $i+1$. Estes casos são os que necessitam de um processo iterativo para fazer esses reajustes de velocidades e posterior movimentação.

Uma outra abordagem de antecipação, proposta em Knospe et al. [29] e já descrita no Capítulo 3, considera os dois veículos que estão à frente do veículo i para ajustar sua velocidade no instante de tempo atual. Para isso parte do princípio que um veículo só desacelera caso não possa movimentar-se na velocidade desejada, ou seja, não possua distância suficiente para realizar o deslocamento necessário. Nessa abordagem o veículo $i+1$ manterá a mesma velocidade que tinha no instante de tempo anterior, a não ser que sua distância ao veículo que está à sua frente, veículo $i+2$ no tempo anterior, não permita esse deslocamento. Para que o esquema seja explícito e não necessite de reajustes de valores, como acontece no modelo proposto do Lima [44], considera-se a distância do veículo $i+1$ ao veículo $i+2$ no instante de tempo anterior.

Baseado nestas características foi proposto um novo modelo, o TAC-UFF-M [48], que utiliza essa mesma abordagem para a antecipação. Só que nesta proposta a política de antecipação é composta de duas etapas: percepção da distância e ajuste de velocidade, com a utilização de uma FDP normal para representar a aleatoriedade no comportamento dos motoristas. Assim, esse modelo considera a distância que o veículo i tem do veículo $i+1$, à sua frente, partindo do princípio que este manterá seu comportamento, caso haja espaço para isso. Isso significa que considera-se que há alguma incerteza em relação à manutenção da mesma velocidade do veículo $i+1$ no instante de tempo atual, segundo uma determinada FDP. A partir dessa percepção de distância ocorre o ajuste da velocidade do veículo i no instante de tempo atual. Também para o ajuste de velocidade é considerada a

mesma FDP para avaliar quanto o motorista irá acelerar, tendo em vista a sua percepção da distância.

Este modelo parte dos seguintes princípios: *i*) todos veículos vão acelerar, se possível, até a velocidade máxima da via, incluindo alguma flutuação no valor desta aceleração em um passo de tempo; *ii*) cada motorista vai ter uma percepção de distância disponível para movimentar-se, considerando que o veículo à sua frente continuará se movimentando, no máximo, com a velocidade que tinha no instantes de tempo anterior, e só não terá esse comportamento caso não tenha espaço livre à sua frente; *iii*) tendo essa percepção da distância, fará o cálculo de sua nova velocidade, e do quanto deve acelerar. A percepção da distância é dada:

A percepção da distância é dada:

$$d_{is}^t = d_i^{t-1} + \min \left[\text{int} \left(v_{i+1}^{t-1} \times (1 - \alpha) \right), d_{i+1}^{t-1} \right] \quad (4.4)$$

onde d_{is}^t é a distância efetiva, v_{i+1}^{t-1} é a velocidade do veículo $i + 1$ no tempo anterior, e d_{i+1}^{t-1} é a distância do veículo $i + 1$ ao veículo $i + 2$, também no tempo anterior. d_i^{t-1} é a distância entre o veículo i e o veículo $i + 1$ à sua frente, dada por: $d_i^{t-1} = x_i^{t-1} - x_{i+1}^{t-1} - l_{i+1}$, onde l_{i+1} representa o comprimento do veículo $i + 1$ e int é a função de arredondamento simétrico. A aleatoriedade do modelo é dada por $\alpha \in [0, 1]$, que tem seu valor escolhido conforme o Método de Monte Carlo - Técnica da Rejeição, como descrito na Subseção 4.1.1, adota-se uma FDP normal. Observa-se na Equação 4.4 que se $\alpha = 0$ o veículo i considera que o veículo $i + 1$, à sua frente, vai deslocar-se mantendo a mesma velocidade que tinha no instante de tempo anterior. Por outro lado, $\alpha = 1$ indica que o veículo i tem apenas a distância do instante de tempo anterior para movimentar-se. Com a utilização da FDP normal, a média define a expectativa que o veículo i tem do veículo $i + 1$ manter sua velocidade e o desvio padrão é a flutuação desta expectativa.

Após a percepção da distância, o veículo ajusta sua velocidade pela expressão descrita a seguir:

$$v_i^t = \min(v_i^{t-1} + acc_i^t, v_{max}) \quad (4.5)$$

Pode-se perceber pela expressão (4.5) que o veículo i terá um acréscimo de acc_i no valor da velocidade, caso este valor não seja maior que a velocidade máxima (v_{max}). Neste modelo o valor que define a taxa de aceleração, acc_i , varia considerando a mesma aleatoriedade

no comportamento do motorista, dada por:

$$acc_i^t = int\left(2(1 - \alpha)\right) \quad (4.6)$$

onde a variável α é o mesmo parâmetro definido na etapa de percepção da distância. Neste caso, se $\alpha = 0$ o veículo i irá acelerar em duas (2) células no instante de tempo atual. Do contrário, $\alpha = 1$, o veículo manterá a sua velocidade. Para que o veículo acelere mais de uma célula, é necessário utilizar uma discretização que torne essa aceleração real. No caso da célula ter $7,5m$, como utilizado em vários modelos [7, 9, 49], se o veículo acelerasse duas células em um instante de tempo, seria equivalente a aumentar sua velocidade em $15m/s$, ou $54km/h$, que é um valor muito acima do real [16]. No caso do veículo desejar assumir uma velocidade maior do que a permitida pela distância efetiva, então ele ajusta a sua velocidade para evitar possível colisão com o veículo à sua frente. Estas regras estão descritas no Algoritmo 4.

```

Input: ( $p_m$ , estado atual)
Result: novo estado
1 for para todos os veículos do
2    $\alpha = normal(\mu, \sigma)$ 
3    $d_i^{t-1} = x_i^{t-1} - x_{i+1}^{t-1} - l_{i+1}$ 
4    $d_{i+1}^{t-1} = x_{i+1}^{t-1} - x_{i+2}^{t-1} - l_{i+2}$ 
5    $d_{is}^t = d_i^{t-1} + min[int(v_{i+1}^{t-1} \times (1 - \alpha)), d_{i+1}^{t-1}]$ 
6    $acc_i^t = (2(1 - \alpha))$ 
7    $v_i^t = min(v_i^{t-1} + acc_i^t, v_{max})$ 
8   if  $v_i^t > d_{is}^t$  then
9      $v_i^t = d_{is}^t$ 
10  end
11 end
12 for para todos os veículos do
13    $x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$ ;
14 end

```

Algoritmo 4: Modelo de antecipação.

Uma vez que tanto a distância como a velocidade devem ser números inteiros, há a necessidade de se fazer um arredondamento após a consideração da parcela devido à aleatoriedade, que gere números entre zero e um. Assim, é feito um arredondamento simétrico, que é representado pela função int , após as multiplicações pela parcela $(1 - \alpha)$.

4.4 Resultados do modelo TAC-UFF-M

Nesta seção apresentam-se os resultados do modelo TAC-UFF-M, com a configuração de uma via de faixa única com $15km$, e com condições de contorno periódicas, onde foram simulados 25.000 instantes de tempo, em segundos. Para a discretização da via foram utilizadas células de $1,5m$, como sugerido em Knospe et al. [29], significando que

o acréscimo de velocidade será, no máximo, igual a $3m/s$ ou $10,8km/h$, quando o veículo acelerar $2c/s$. A quantidade de veículos na via foi dada em função da taxa de ocupação da mesma, que variou de 5 a 95% de ocupação, ou seja, uma faixa de 0,05 a 0,95, e em cada simulação os veículos são acrescentados na via de 0,01 em 0,01. Os veículos foram dispostos aleatoriamente ao longo da via e suas velocidades sorteadas entre 0 e a velocidade máxima (v_{max}) que foi considerada de $25c/s$ ($135km/h$) e cada veículo ocupou 5 células, ou seja, $7,5m$.

Foram realizados testes para diversos valores da média e do desvio padrão para a FDP normal. Nestes testes os valores das médias (μ) foram definidos em um intervalo entre 0 a 1. A Figura 4.5 mostra a influência dos diferentes valores de média ($\mu = 0,30$, $\mu = 0,50$ e $\mu = 0,70$) para um desvio padrão $\sigma = 0,10$. Pode-se observar que as diferentes curvas normais alteraram o comportamento global na via, de forma que quanto mais próximos estão os veículos uns dos outros, dado por valores de $\alpha \approx 0$, maior é o valor máximo da relação fluxo-densidade, como pode ser observado na relação fluxo-densidade para $\mu = 0,30$, que representa um valor para o fluxo na faixa de $0 < J < 2400$ próximo do dado real, onde o fluxo livre é mantido no intervalo de $0 < J < 2300$ [18].

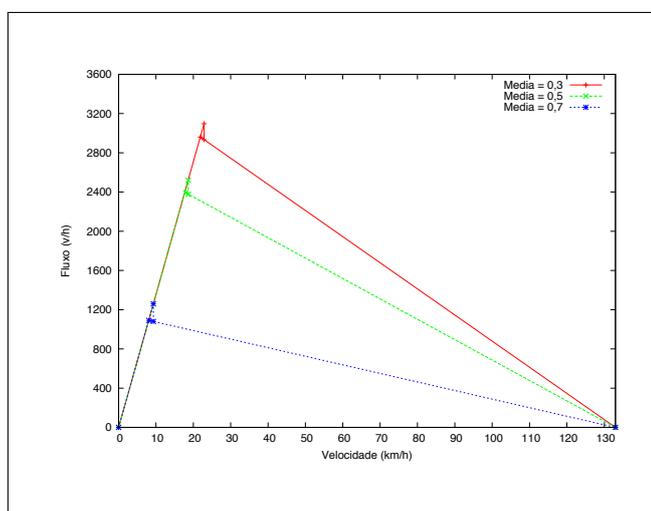


Figura 4.5: FDP Normal com diferentes valores para média e $\sigma = 0,10$.

A seguir apresentam-se resultados para diferentes valores de desvio padrão quando: $\sigma = 0,05$, $\sigma = 0,10$ e $\sigma = 0,15$, e média $\mu = 0,50$. A Figura 4.6 apresenta a influência desta variação na relação fluxo-densidade. Nota-se que o desvio padrão também influencia na relação fluxo-densidade, como esperado, pois a medida que há uma probabilidade de sortear valores distantes da média (Figura 4.7), mais valores de α estarão tanto próximos de 0 quanto próximos de 1, o que também aumenta ou diminui a interação entre os veículos.

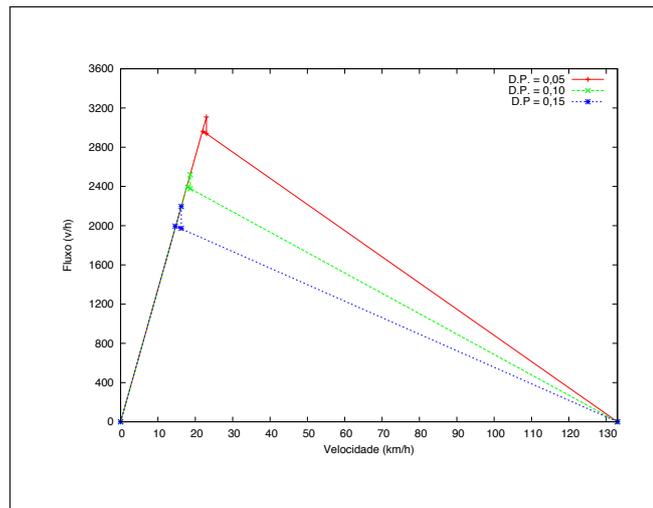


Figura 4.6: FDP Normal com $\mu = 0,50$ e diferentes valores de desvio padrão.

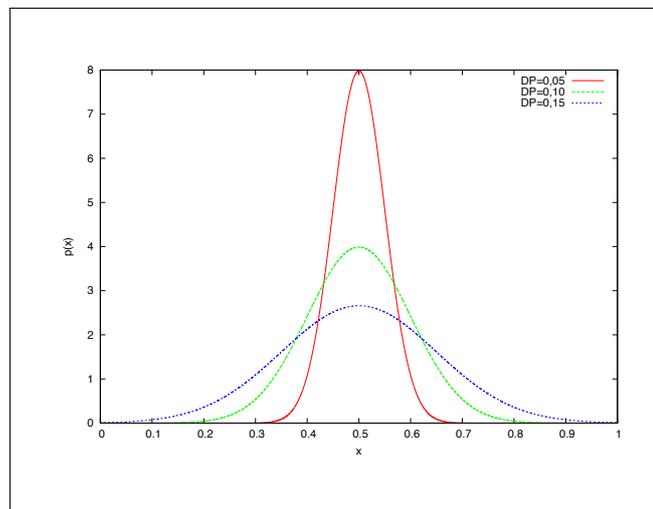


Figura 4.7: FDP normal com $\mu = 0,5$ e diferentes valores σ .

Este modelo, TAC-UFF-M, foi utilizado como base para o modelo proposto nesta tese. A partir desse, as etapas de percepção da distância e ajuste de velocidade foram melhoradas de forma a fazer que um veículo perceba o quanto próximo está do veículo à sua frente, considerando o quanto este está andando no instante de tempo atual.

Capítulo 5

Modelo T-UFF

Os modelos de AC para tráfego viário, como por exemplo o Modelo NaSch, ou *slow-to-start* [23, 50, 28] ou os modelos Luz de Freio [29, 51], simulam a incerteza do comportamento do motorista introduzindo uma aleatoriedade ao modelo através de uma FDP uniforme, que avalia situações específicas para definir quando um veículo vai acelerar uma quantidade fixa de células no instante de tempo atual. Além disso, para reproduzir a meta-estabilidade os modelos necessitam, de forma geral, trabalhar com diferentes probabilidades para simular diferentes situações, como os modelos *slow-to-start*. No entanto, como apresentado no Capítulo anterior, com um conjunto de regras e a utilização de uma FDP adequada, é possível simular a aleatoriedade do comportamento do motorista e ainda representar a meta-estabilidade sem haver necessidade de utilização de diferentes combinações de valores de probabilidades, ou de diferentes condições iniciais para simular diferentes situações.

Neste Capítulo é apresentado um modelo de antecipação onde a distância e velocidade são ajustadas e são funções de FDPs contínuas. Essas FDPs contribuem para a definição de como o motorista percebe o movimento do veículo que está à sua frente e como ele ajusta sua velocidade, tendo em vista essa percepção. Além disso, na etapa da percepção da distância, parte-se do princípio de que o motorista que está à frente do veículo considerado pode acelerar caso não esteja na velocidade máxima. Também no ajuste de velocidade o modelo foi otimizado, considerando que o motorista deve manter uma distância de segurança, que é função da velocidade relativa dos dois veículos em questão e da distância entre eles. As regras do modelo proposto, a forma com que a FDP é empregada e a própria FDP utilizada desempenham, em conjunto, um papel fundamental pois, possibilitam introduzir um comportamento aleatório nas duas variáveis envolvidas, distância e velocidade. A FDP utilizada no modelo descrito neste Capítulo, modelo T-UFF, é a

FDP *Beta*.

Para descrever o modelo T-UFF é feita, na Seção 5.1, uma breve apresentação da FDP contínua utilizada. Em seguida, a Seção 5.2 descreve o esquema de antecipação proposto, incluindo as etapas de percepção da distância e de ajuste de velocidades. O algoritmo do modelo proposto é apresentado na Seção 5.3, e algumas considerações sobre a discretização utilizada são feitas na Seção 5.4. Os testes realizados para a validação do modelo estão descritos na Seção 5.5 e, finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção 5.6.

5.1 Função de Distribuição de Probabilidade Beta

No modelo TAC-UFF-M descrito no Capítulo anterior, as FDPs normais foram utilizadas para reproduzir a incerteza do comportamento do motorista ao modelo. No entanto, verificou-se que, apesar do resultado ser satisfatório, outras FDPs poderiam representar melhor este comportamento. Dentre as investigações realizadas para determinar uma FDP que melhor represente diferentes formas de considerar a distância e de ajustar a velocidade do veículo, foi adotada a distribuição de probabilidade conhecida como *Beta*. Esta FDP *Beta* apresenta facilidade na sua manipulação e possibilita a representação de diversas possíveis curvas e, além da FDP uniforme. Esta FDP é sempre descrita entre os valores zero (0) e um (1) e que podem ser simétricas ou assimétricas, adquirindo diferentes formatos [52, 53, 54]. A FDP *Beta* é dada por:

$$f(x) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad (5.1)$$

onde a função $\Gamma(n)$ representa o fatorial do número $n \in \mathbb{Z}$ e $x \in [0, 1]$. Os parâmetros a e b são valores maiores que zero (0) e definem o formato da curva: *i*) se $a > b$, o valor máximo da curva e, conseqüentemente, a maior parte da área sob ela, fica mais próxima de um (1); *ii*) se $b > a$, estes valores ficam mais próximos de zero (0); *iii*) se $a = b$, a curva é simétrica e; *iv*) se $a = b = 1$, a FDP tem valor constante e representa uma FDP uniforme. Além disso, se o valor do parâmetro a for trocado pelo valor de b , e vice-versa, as curvas serão simétricas em relação ao ponto central do intervalo ($x = 0,5$).

O valor esperado para essa FDP é obtido conforme:

$$E(X) = \frac{a}{a+b} \quad (5.2)$$

enquanto, a variância é dada por:

$$V(X) = \frac{ab}{(a+b+1)(a+b)^2} \quad (5.3)$$

Para exemplificar apresenta-se, na Figura 5.1, diferentes formas que as curvas obtidas pela FDP *Beta* podem assumir em função dos parâmetros de entrada a e b . Para quaisquer valores de a e b é garantido que: $\int_0^1 f(a,b) dx = 1$. Esta distribuição sugere uma flexibilidade na forma de considerar a incerteza do comportamento do motorista, visto que permite reproduzir curvas assimétricas ou simétricas, com maior possibilidade de sorteios de valores próximos dos valores zero (0) ou de um (1), ou ainda a FPD uniforme, onde há a mesma probabilidade de sorteio para qualquer valor no intervalo entre zero (0) e um (1).

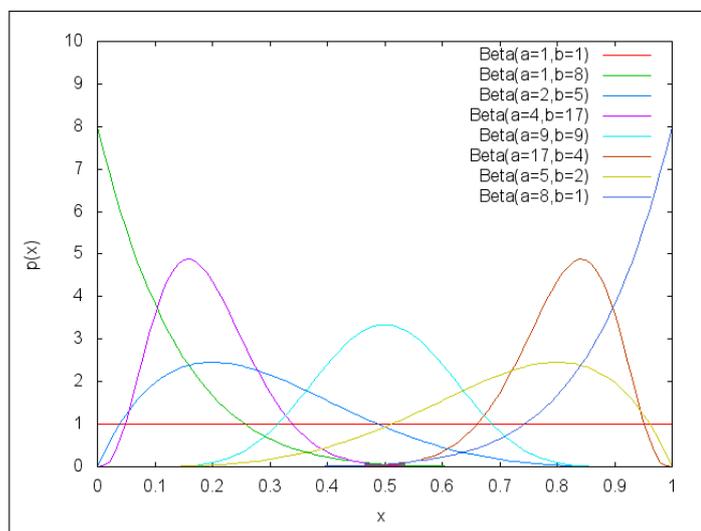


Figura 5.1: FDP *Beta* com diferentes valores de a e b .

5.2 Modelo T-UFF

Como descrito anteriormente, o modelo (T-UFF) adota o mesmo conceito apresentado no modelo TAC-UFF-M, em que a política de antecipação é composta de duas etapas: *i*) na primeira delas o motorista tem uma percepção de como o veículo que está à sua frente de movimentará, podendo inclusive, considerar que este irá acelerar, tomando o cuidado para que esta percepção não superestime distâncias, o que poderia ocasionar uma colisão; *ii*) na segunda, ele ajusta sua velocidade em função do comportamento do motorista e dessa percepção.

5.2.1 Percepção da Distância

Como descrito no Capítulo anterior, a etapa da percepção da distância visa determinar qual a expectativa que o veículo i tem em relação ao comportamento do veículo $i + 1$, ou seja, o quanto que este deverá movimentar-se no instante de tempo atual. Para isto, considera-se tanto a velocidade do veículo $i + 1$ quanto a distância que ele ($i + 1$) tem para andar, ou seja, a distância entre o veículo $i + 1$ e o veículo $i + 2$, no instante de tempo anterior.

No modelo T-UFF aqui proposto, a forma de como o motorista do veículo i percebe o movimento do veículo $i + 1$, à sua frente, diferencia-se do modelo anteriormente proposto. Neste caso, é considerado que o veículo $i + 1$ poderá acelerar no instante de tempo atual e não apenas manter sua velocidade, como considerado no modelo TAC-UFF-M e em outros modelos propostos na literatura [29, 38]. Este esquema de percepção da distância fornecido: pela distância efetiva, d_{is} , que deve ser sempre maior ou igual a zero, dada por:

$$d_{is}^t = \max \left[d_i^{t-1} + \min \left[v_{i+1}^{t-1} + \text{int} \left(\delta v \times (1 - \alpha) \right), d_{i+1}^{t-1} \right] - d_s, 0 \right] \quad (5.4)$$

onde d_i^{t-1} é a distância, em células, entre dois veículos, dada por $d_i^{t-1} = x_i^{t-1} - x_{i+1}^{t-1} - l_{i+1}$, sendo l_{i+1} o comprimento do veículo $i + 1$. A aleatoriedade está presente na parcela $\text{int} \left(\delta v \times (1 - \alpha) \right)$, onde δv define a quantidade máxima de células que um veículo pode acelerar em um instante de tempo, int é a função de arredondamento simétrico e o parâmetro α tem seu valor atribuído conforme a FDP Beta, que representa o nível de expectativa que o veículo i tem em relação ao movimento do veículo $i + 1$, com $\alpha \in [0, 1]$. Logo, se $\alpha = 0$ considera-se que o veículo $i + 1$ irá acelerar o máximo (δv). Se $\alpha = 1$ o veículo i está considerando que o veículo $i + 1$ irá se manter na mesma velocidade. Dessa forma, este veículo deverá movimentar-se segundo essa expectativa ou o que lhe for possível, tendo em vista sua distância ao veículo que está à sua frente (veículo $i + 2$). Para isso utiliza-se o mínimo entre o valor calculado por esta expectativa e a distância entre eles, que é dada pela variável d_{i+1}^{t-1} ($d_{i+1}^{t-1} = x_{i+1}^{t-1} - x_{i+2}^{t-1} - l_{i+2}$). Defini-se também uma distância de segurança d_s , que tem o objetivo de reduzir o desejo do motorista de acelerar no instante de tempo atual em determinadas situações: quando o veículo considera que está próximo e/ou mais rápido que o veículo à sua frente. Neste caso, consideram-se a variação das velocidades entre os veículos envolvidos e, com isso, o tempo que o veículo i demoraria para chegar até o veículo $i + 1$, que é função da FDP Beta, e/ou a distância do veículo $i + 1$, quando esta é muito pequena.

Inicialmente, para o cálculo desta distância de segurança, toma-se por base a proposta apresentada por Knospe et. al [29] que avalia o tempo que o veículo i demoraria para chegar ao veículo $i + 1$. Esta medida permite ao veículo analisado manter-se na mesma velocidade quando próximo do veículo à sua frente, e é dada por:

$$t_h = \frac{d_i}{\Delta v} \quad (5.5)$$

onde t_h expressa o tempo que o veículo analisado (i) vai levar para alcançar o veículo à sua frente ($i + 1$); d_i é a distância entre o veículo analisado e o que está à sua frente no tempo anterior. Δv é a diferença de velocidades entre o veículo analisado e do que está à sua frente ($\Delta v = (v_i^{t-1} + \delta v) - v_{i+1}^{t-1}$), levando-se em consideração que o veículo analisado poderá acelerar o seu máximo (δv). Assim, se $\Delta v > 0$ representa que o veículo analisado está mais rápido e será necessário considerar uma distância de segurança (d_s). Ao passo que o contrário, valores negativos para Δv , indicam que o veículo à frente está distanciando-se e neste caso, essa distância de segurança não precisa ser considerada no momento de ajustar a velocidade do veículo i . Se $\Delta v = 0$ significa que dois veículos consecutivos estão movimentando-se na mesma velocidade. No caso do veículo i estar mais rápido que o veículo que está à sua frente ($\Delta v > 0$), propõe-se a definição de uma distância de segurança que é função do perfil definido pela FDP utilizada, dada por um $d_{smin} \times \alpha$. Além disso, independentemente desta velocidade relativa entre os veículos em questão, caso eles estejam muito próximos considera-se também uma parcela da distância de segurança dada pela expressão:

$$d_s = int(\delta v \times (1 - \alpha)) \quad (5.6)$$

Desta forma a distância total de segurança é dada por:

$$d_s = d_s + int(d_{smin} \times \alpha) \quad (5.7)$$

de forma que as Equação 5.6 e 5.7 definem a distância de segurança em função do quanto perto o veículo i está do veículo $i + 1$ (Equação 5.6) e/ou de quanto mais rápido o veículo i está do veículo $i + 1$ (Equação 5.7). Além disso, parâmetro d_{smin} é uma constante e especifica uma distância de segurança mínima, como proposto por Knospe et al. [29], Maerivoet e De Moor [22] e Yang et al. [55]. No presente trabalho esse valor é multiplicado por α e varia de acordo com a FDP utilizada, possibilitando representar os motoristas que andam muito próximos aos veículos que estão à sua frente e aqueles que mantêm uma distância maior.

5.2.2 Ajuste de Velocidade

Na etapa de ajuste de velocidades da política de antecipação do modelo T-UFF propõe-se que o veículo poderá ter uma aceleração diferenciada, ou seja, acelerar uma quantidade diferente de células em um segundo. Desta forma, a velocidade desejada (v_i^t) é dada pela Equação 5.8, que é função da FDP utilizada e da quantidade máxima de células que um veículo pode acelerar em um instante de tempo. Portanto, a cada instante de tempo, o veículo poderá manter sua velocidade ou acelerar até atingir a velocidade máxima da via (v_{max}), ou permitida pelo fluxo, conforme:

$$v_i^t = \min \left[v_i^{t-1} + int(\delta v \times (1 - \alpha)), v_{max} \right] \quad (5.8)$$

onde v_i^{t-1} é a velocidade do veículo i no instante de tempo anterior; δv representa a quantidade máxima de células que o veículo pode acelerar. A velocidade máxima é dada por v_{max} e α é a variável aleatória. Neste caso, a parcela $(\delta v \times (1 - \alpha))$ que foi utilizada para calcular como o veículo i percebe a distância do veículo à sua frente, é utilizada também para ajustar sua velocidade. Assim sendo, caso note que não tem espaço para mover-se na velocidade desejada, ajusta sua velocidade considerando a distância disponível ($v_i^t = d_{is}^t$).

Estas regras tornam o modelo robusto pois, proporcionam aos veículos a capacidade de manterem-se na mesma velocidade quando próximos em distância e/ou em tempo uns dos outros e acelerarem, caso tenham distância para isto. Dessa forma, é reproduzida a inércia do motorista sem a necessidade de se trabalhar com combinações de probabilidades, fazendo com que este comportamento surja da interação entre os veículos, isto é, a região de meta-estabilidade.

5.3 Algoritmo T-UFF

As regras deste modelo são apresentadas no Algoritmo 5. Observa-se que a definição da nova velocidade é dividida em dois estágios: o primeiro estágio refere-se à etapa de percepção da distância (linhas 2 a 17). A expectativa do veículo i em relação ao veículo $i + 1$ à sua frente continuar acelerando no instante de tempo atual é calculado na linha 17. Nesta etapa o valor de α é escolhido conforme FDP *Beta* definida.

As linhas de 7 a 16 do Algoritmo indicam a partir de que momento d_s deve ser utilizada e para isto, adota-se as parcelas das linhas 10 e 13.

Na linha 10, a desigualdade $\delta d \leq \text{int}(\delta v \times (1 - \alpha))$ indica a partir de que distância, em células ($\delta d = d_{i+1}^{t-1} - d_i^{t-1}$), o veículo deve passar a considerar que o outro vai manter-se na mesma velocidade no instante de tempo atual, isto é, a medida que o veículo i aproxima-se do veículo $i + 1$, ele diminui o seu desejo de acelerar. Para isto, d_s é definido como o valor do quanto o veículo i espera que o veículo $i + 1$ vai acelerar no instante de tempo atual, $d_s = \text{int}(\delta v \times (1 - \alpha))$ (linha 11).

A desigualdade da parcela $t_h \leq \text{int}(h \times \alpha)$ (linha 13) visa reduzir o desejo do motorista de continuar acelerando quando está mais rápido que o veículo à sua frente. A parcela $h \times \alpha$, onde h é uma constante e indica um tempo em segundos e α , neste caso, é empregado como a percepção do motorista em relação a esse tempo, considerando ainda a FDP *Beta* adotada. Nota-se que esta percepção da distância leva em consideração o movimento dos dois veículos (Δv). Ademais, caso o veículo não tenha espaço para movimentar-se o desejado, sua velocidade é ajustada para que ele movimente-se apenas o espaço que tem disponível (linha 17). Neste caso, ele reduz sua velocidade.

O segundo estágio é responsável pela etapa de definição da velocidade (linhas 18 a 21) e, neste caso, o mesmo valor de α é utilizado. À medida que o veículo i aproxima-se do outro veículo $i + 1$ à sua frente, ele deve ser capaz de perceber o quão próximo está e então acelerar ou manter-se na mesma velocidade.

Em resumo, o modelo proposto considera que cada veículo poderá manter sua velocidade ou acelerar até atingir a velocidade máxima da via, ou permitida pelo fluxo. Para tanto, o motorista tem a percepção da distância que está em relação ao veículo à sua frente e tem uma expectativa deste também continuar acelerando, considerando também que o veículo à frente do analisado pode não ter este comportamento e manter-se na mesma velocidade. O comportamento aleatório do motorista, que é estabelecido pelo emprego da FDP *Beta*, acontece tanto na percepção da distância quanto no ajuste de velocidade.

5.4 Discretização utilizada

Em vários modelos apresentados na literatura são utilizadas vias com uma discretização de $7,5m$ e cada veículo ocupa uma célula. Devido a isso, nesses modelos, o veículo ou mantém sua velocidade ou acelera em $1c/s$. Assim, quando um veículo aumenta sua velocidade em 1 célula/segundo, ele está acelerando em $7,5m/s^2$ ($27km/h^2$), que é uma taxa de variação alta, segundo o *Highway Capacity Manual* (HCM) [16]. Um forma de permitir que o veículo possa acelerar mais suavemente é refinar a discretização da via,

```

Input: (estado atual)
Result: novo estado
1 for para todos os veículos do
2    $d_i^{t-1} = x_i^{t-1} - x_{i+1}^{t-1} - l_{i+1}$ 
3    $d_{i+1}^{t-1} = x_{i+1}^{t-1} - x_{i+2}^{t-1} - l_{i+2}$ 
4    $\alpha = \text{Beta}(a, b)$ 
5    $\Delta v = (v_i^{t-1} + \delta v) - v_{i+1}^{t-1}$ 
6    $d_s = 0$ 
7   if  $\Delta v > 0$  then
8      $t_h = \frac{d_i^{t-1}}{\Delta v}$ 
9      $\delta d = d_{i+1}^{t-1} - d_i^{t-1}$ 
10    if  $\delta d \leq \text{int}(\delta v \times (1 - \alpha))$  then
11       $d_s = \text{int}(\delta v \times (1 - \alpha))$ 
12    end
13    if  $t_h \leq \text{int}(h \times \alpha)$  then
14       $d_s = d_s + \text{int}(d_{s_{min}} \times \alpha)$ 
15    end
16  end
17   $d_{i_s}^t = \max \left[ d_i^{t-1} + \min \left[ v_{i+1}^{t-1} + \text{int}(\delta v \times (1 - \alpha)), d_{i+1}^{t-1} \right] - d_s, 0 \right]$ 
18   $v_i^t = \min \left[ v_i^{t-1} + \text{int}(\delta v \times (1 - \alpha)), v_{max} \right]$ 
19  if  $v_i^t > d_{i_s}^t$  then
20     $v_i^t = d_{i_s}^t$ 
21  end
22 end
23 for para todos os veículos do
24    $x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$ 
25 end

```

Algoritmo 5: Modelo T-UFF.

como proposto em Knosp, W. et al. [29], Sun, T. e Wang, J. [56] e Lárraga, M.E. e Alvarez-Icaza, L. [57], que propõem uma célula com 1,5 metros.

O modelo T-UFF também utiliza a discretização de 1,5 metros e neste caso um veículo ocupa 5 células. Essa discretização é particularmente importante no modelo, pois é fundamental nas etapas de percepção da distância e ajuste da velocidade desejada. Nestas duas etapas do modelo, calcula-se a parcela $\text{int}(\delta v \times (1 - \alpha))$ para ajustar a distância ou a velocidade. Como esse valor deve ser um inteiro, limitado pelo valor máximo de células que o veículo poderá acelerar, ele possibilita que esse valor varie de zero (0) a δv . Desta forma, o modelo T-UFF torna-se flexível, uma vez que permite configurar diferentes estratégias de ajuste de velocidades e distâncias e permite definir diferentes faixas de aceleração adaptáveis à valores reais.

5.5 Testes de Validação

Nesta Seção são apresentados alguns testes com o objetivo de validar o modelo proposto. Para isto, adota-se os mesmos diagramas apresentados na Seção 2.3: fluxodensidade, velocidade-densidade, velocidade-fluxo.

Os dados de configuração para a simulação deste modelo são: tempo total de simulação, número de células necessárias para representar a via (dimensão do domínio), quantidade de veículos e o comportamento médio global da via, que é indicado pelos parâmetros definidos da FDP empregada. Vale ressaltar que este modelo não necessita de qualquer condição inicial especial e os veículos podem ser colocados aleatoriamente na via, com qualquer velocidade inicial.

Para validar o modelo de faixa única são sugeridos três grupos de testes:

- **GRUPO 1:** tem como objetivo avaliar a influência dos parâmetros h e $d_{s_{min}}$ para os diferentes valores de α ;
- **GRUPO 2:** apresenta a influência das curvas das FDPs adotadas na relação fluxo-densidade; e
- **GRUPO 3:** tem como objetivo avaliar o comportamento do modelo e a influência da velocidade máxima da via na relação do fluxo-densidade.

Em todos os testes aqui apresentados, o domínio simulado é de 10.000 células, o que equivale a 15km de pista. A condição de contorno é periódica e são simulados 14.400 passos de simulação (4 horas). A quantidade de veículos na simulação é dada em função do percentual de ocupação da via e considerou-se entre 1 a 96% de ocupação, com incremento de 1%. Estes veículos são dispostos de forma aleatória ao longo da via e suas velocidades são sorteadas em um intervalo de 0 a v_{max} .

Para construir os diagramas é necessário simular as medições, como descrito na Seção 2.4. Nestas simulações as medições foram realizadas a cada 120 segundos (2 minutos) [58].

GRUPO 1 - influência dos parâmetros h e $d_{s_{min}}$ com diferentes valores de α : Inicialmente foram realizados testes para avaliar a influência dos parâmetros h e $d_{s_{min}}$. Para isto apresentam-se os testes realizados para os valores $h = 6$, $h = 12$ e $h = 15$ e para três diferentes FDPs *Beta*.

As três diferentes FDPs *Beta* utilizadas nestes testes são definidas pelos parâmetros: *i*) $a = 1$ e $b = 5$, de forma que a maior parte dos valores sorteados para α estejam próximas de 0; *ii*) $a = 8$ e $b = 4$, onde a maioria dos valores sorteados para α estão mais próximos de 1 e, *iii*) $a = 4$ e $b = 8$, onde a maioria dos valores sorteados estão em torno de 0,3. Esta é uma curva intermediária entre as duas anteriores e é usada para determinar o comportamento médio global da via. As formas das curvas são ilustradas na Figura 5.2.

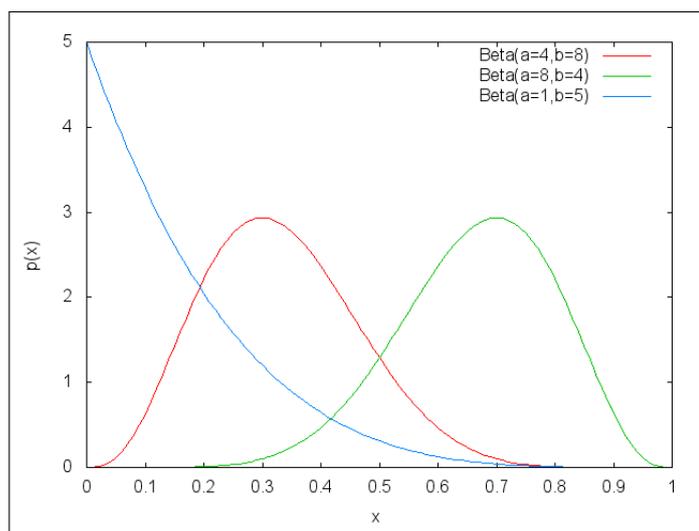


Figura 5.2: Três diferentes FDPs usadas nos testes.

As Figuras 5.4 a 5.5 apresentam os diagramas fluxo-densidade para esses valores de h e $d_{s_{min}}$ para as três FDPs e as Figuras 5.6 a 5.8 mostram os respectivos histogramas do número de ocorrências de valores inteiros tanto para $h \times \alpha$ quanto para $d_{s_{min}} \times \alpha$ para cada uma das três FDPs. Pode-se observar nas Figuras 5.3 a 5.5, pelos resultados obtidos, que o modelo T-UFF representa as três fases na dinâmica do fluxo, incluindo a região de meta-estabilidade. Como descrito anteriormente, a política de antecipação proposta influi tanto na forma como o veículo i considera sua distância em relação ao veículo $i + 1$ quanto como ele ajusta sua velocidade. Assim, utilizando a FDP $Beta(a = 1, b = 5)$ com valores de α próximos de zero, os veículos tendem a acelerar mais rapidamente e a andarem mais próximos, obtendo uma alta relação fluxo-densidade máxima. Com a FDP $Beta(a = 4, b = 8)$, onde a maioria dos valores de α estão próximos de um (1), os veículos tendem a ter uma taxa de aceleração menor e a manterem-se mais distantes dos veículos à frente. Neste caso, a relação fluxo-densidade máxima é bem menor do que no caso anterior, assim como a região de meta-estabilidade. Isso acontece uma vez que a possível diminuição de velocidade de um veículo não interfere muito na movimentação dos veículos subsequentes, uma vez que estão distantes uns dos outros. A FDP $Beta(a = 4, b = 8)$ fornece valores intermediários e será denominado, neste trabalho como comportamento médio da via.

Nps exemplos que se sucedem, optou-se por utilizar $h = 12$ e $d_{s_{min}} = 12$.

GRUPO 2 - variação das FDPs: Para analisar a influência das diferentes FDPs na percepção da distância e no ajuste de velocidade, são testadas além das três curvas descritas pela FDP $Beta$ e ilustradas na Figura 5.2, utilizou-se outra definida pela FDP

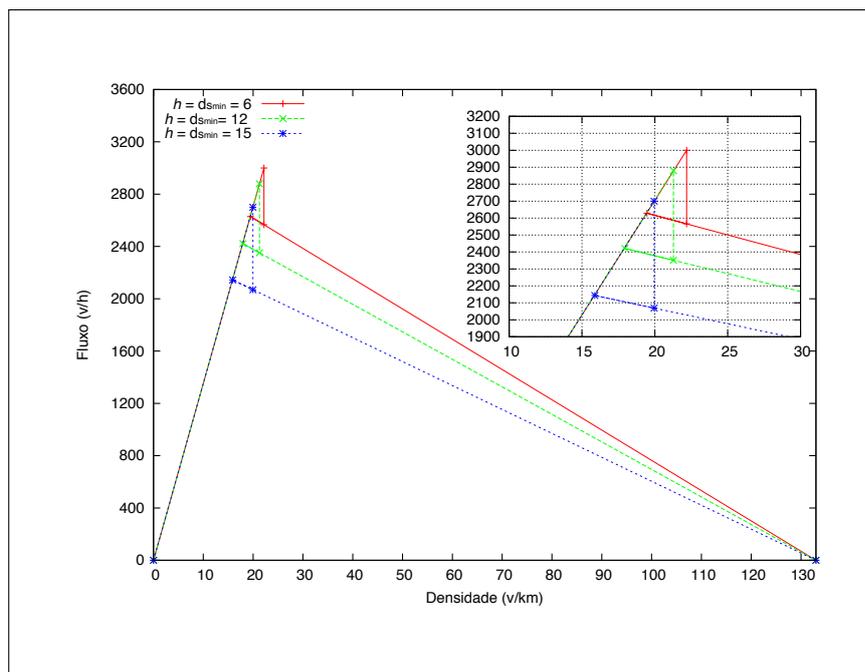


Figura 5.3: Diagrama fluxo-densidade com diferentes valores de h e d_{smin} e FDP $Beta(a = 1, b = 5)$.

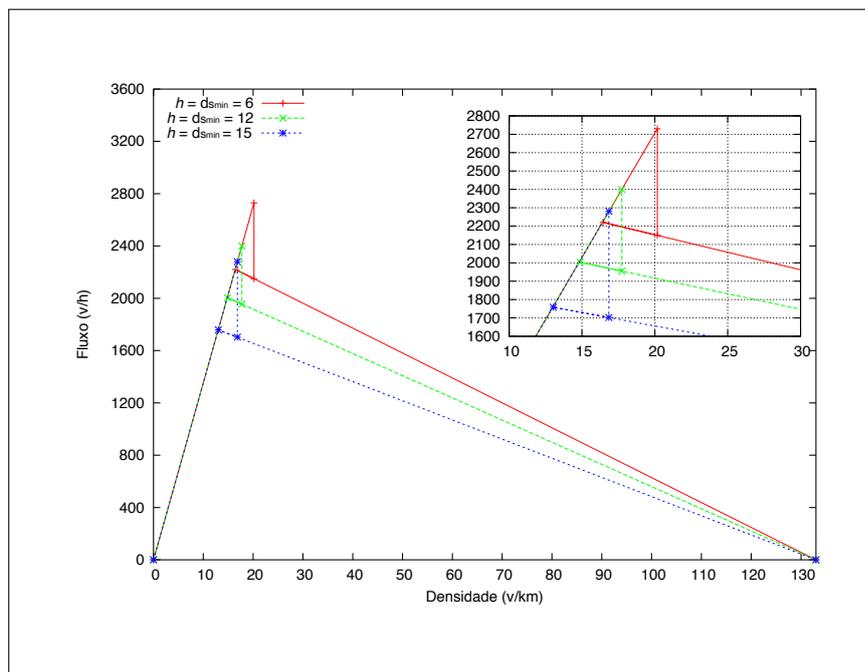


Figura 5.4: Diagrama fluxo-densidade com diferentes valores de h e d_{smin} e FDP $Beta(a = 4, b = 8)$.

$Beta(a = 1, b = 1)$ que representa uma distribuição uniforme (Figura 5.2). Para comparar com outros trabalhos da literatura [7, 28, 59], a velocidade máxima da via é definida em $v_{max} = 25c/s$ (135km/h).

A Figura 5.9 apresenta, através do diagrama velocidade-fluxo, a influência das dife-

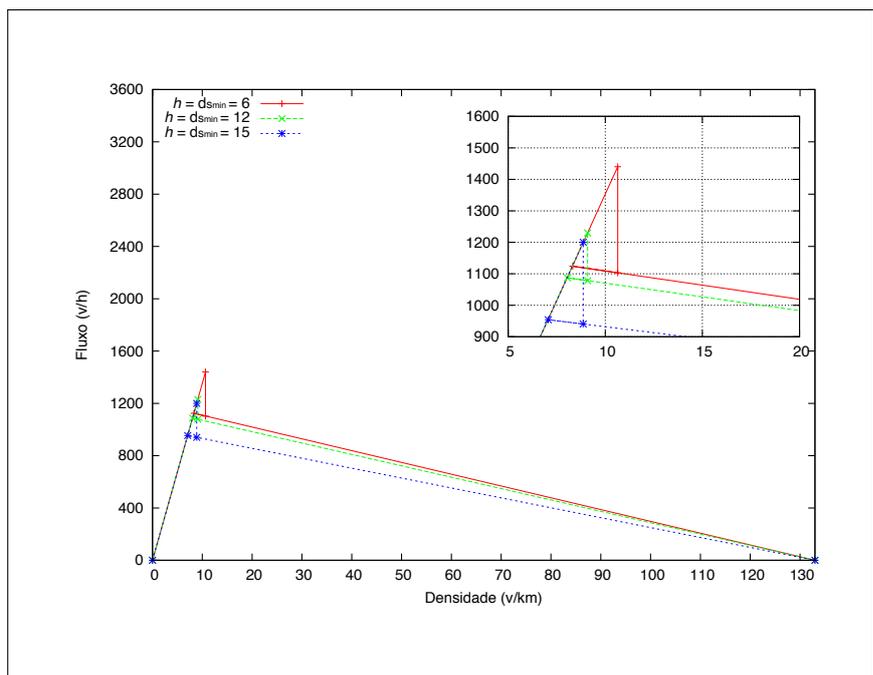


Figura 5.5: Diagrama fluxo-densidade com diferentes valores de h e d_{smin} e FDP $Beta(a = 8, b = 4)$.

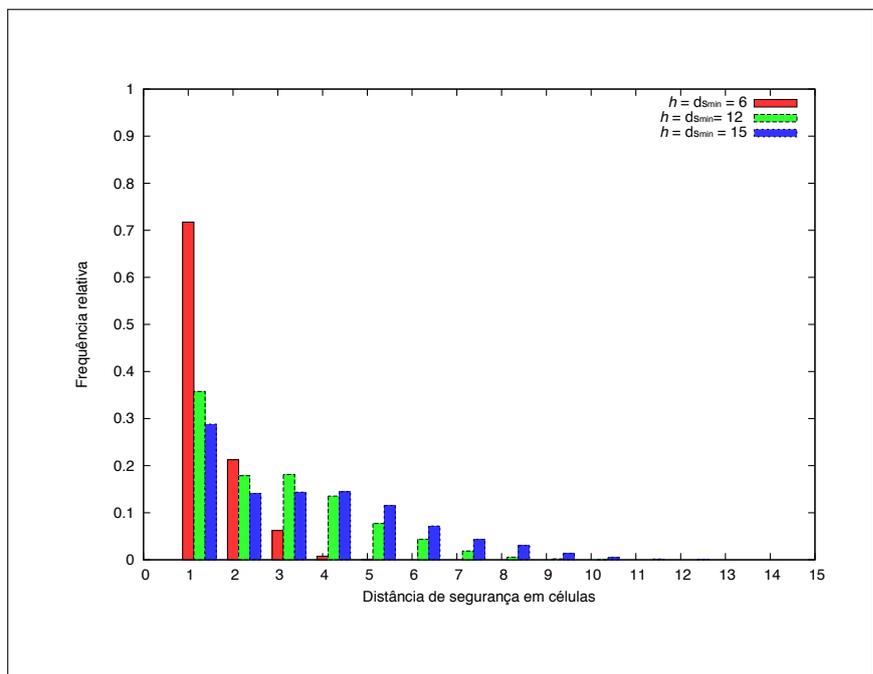


Figura 5.6: Histograma de frequência relativa de $h \times \alpha$ e $d_{smin} \times \alpha$ para FDP $Beta(a = 1, b = 5)$.

rentes políticas de antecipação, obtidas pelas curvas apresentadas na Figura 5.2. Nota-se que quanto mais distante os veículos movimentam-se uns dos outros, menor é o fluxo e a velocidade média da via cai mais rapidamente, como determinado pela Equação 2.13. Este mesmo comportamento pode ser observado no diagrama velocidade-densidade, apre-

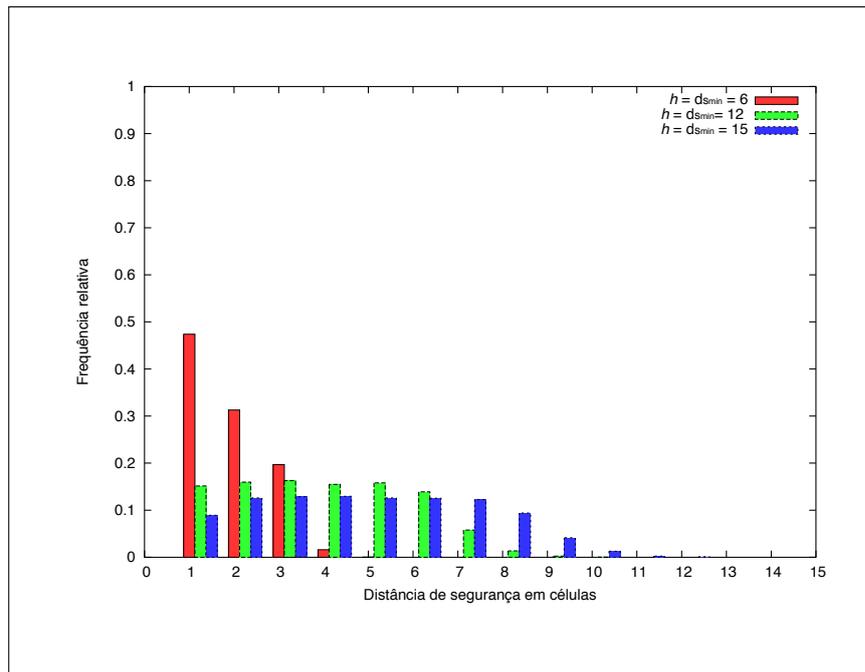


Figura 5.7: Histograma de frequência relativa de $h \times \alpha$ e $d_{s_{min}} \times \alpha$ para FDP $Beta(a = 4, b = 8)$.

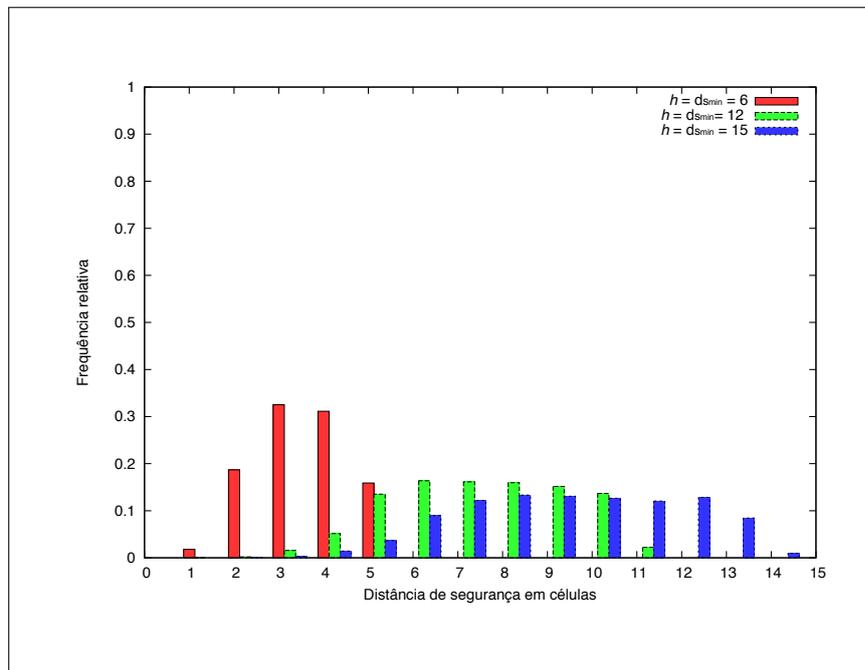


Figura 5.8: Histograma de frequência relativa de $h \times \alpha$ e $d_{s_{min}} \times \alpha$ para FDP $Beta(a = 8, b = 4)$.

sentado na Figura 5.10.

O diagrama fluxo-densidade é ilustrado na Figura 5.11, onde pode-se observar que os veículos com uma menor percepção da distância acabam por congestionar o fluxo prematuramente, uma vez que ao manterem-se distantes uns dos outros acabam por reduzir a

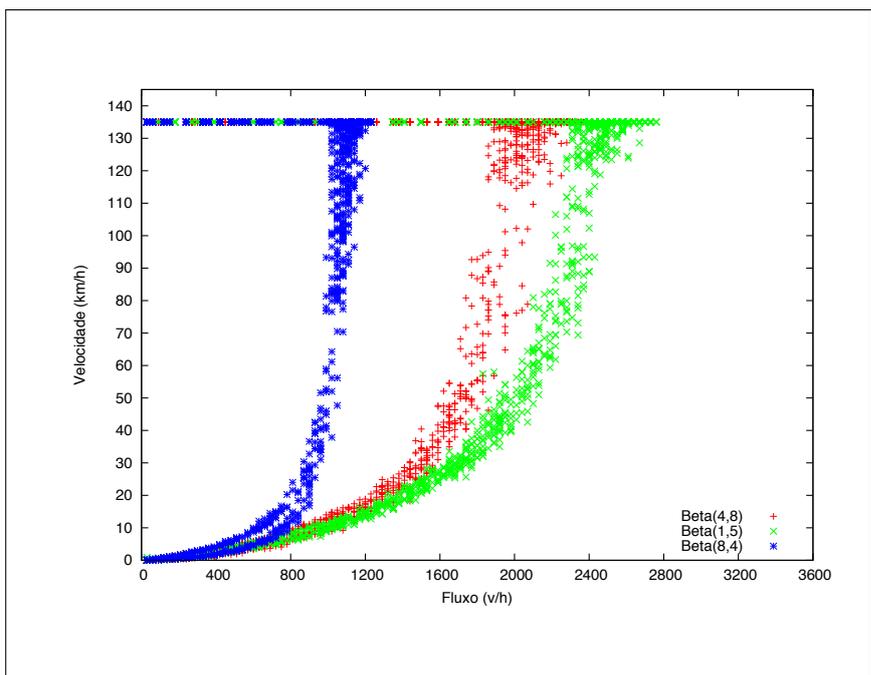


Figura 5.9: Diagrama velocidade-fluxo as três FDPs *Beta*.

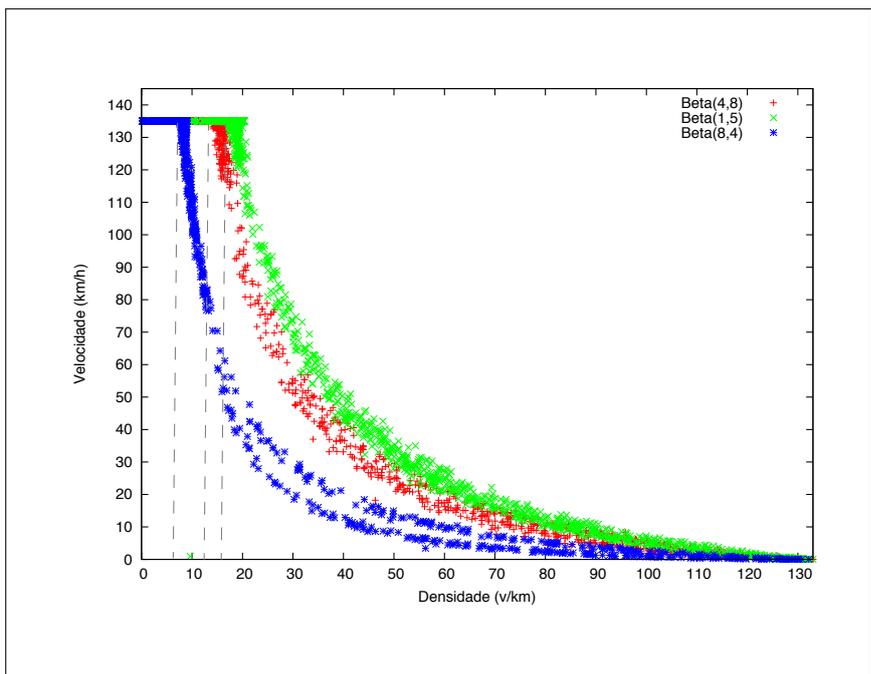


Figura 5.10: Diagrama velocidade-densidade com as três FDPs *Beta*.

velocidade média da via. Ademais, observa-se uma pequena região de meta-estabilidade, para a política que considera mais a distância entre os veículos $Beta(a = 8, b = 4)$, que acontece pela baixa influência na flutuação de velocidade que um veículo pode causar a outro que vem atrás, como já descrito.

Utilizando uma FDP $Beta(a = 1, b = 1)$ tem-se valor constante (Figura 5.1), ou seja,

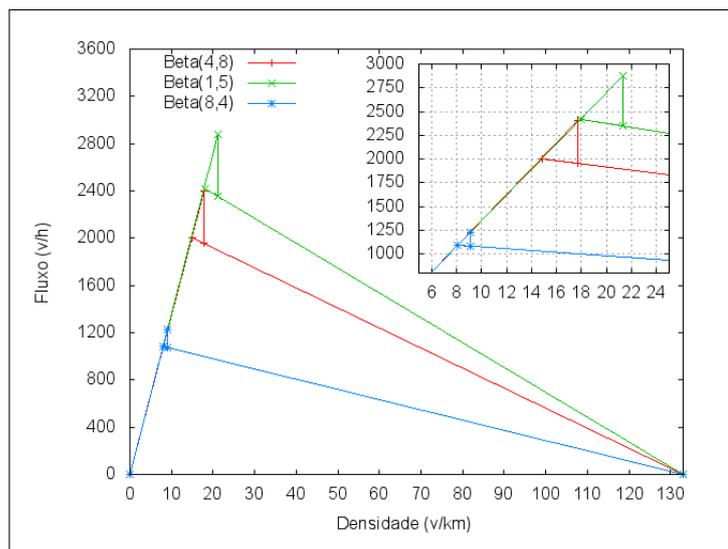


Figura 5.11: Diagrama velocidade-fluxo com as três FDPs *Beta*.

representa uma FDP uniforme. Com esta configuração da FDP *Beta*, observa-se na Figura 5.12 que, mesmo com uma FDP uniforme, as três fases do fluxo são representados bem como a região de meta-estabilidade. Isso é esperado uma que obtém-se sempre $\alpha \leq 0,35$, e com $\alpha \leq 1$. Este resultado mostra que a qualidade da simulação está no conjunto de regras de antecipação do modelo T-UFF e a forma como este emprega a FDP utilizada.

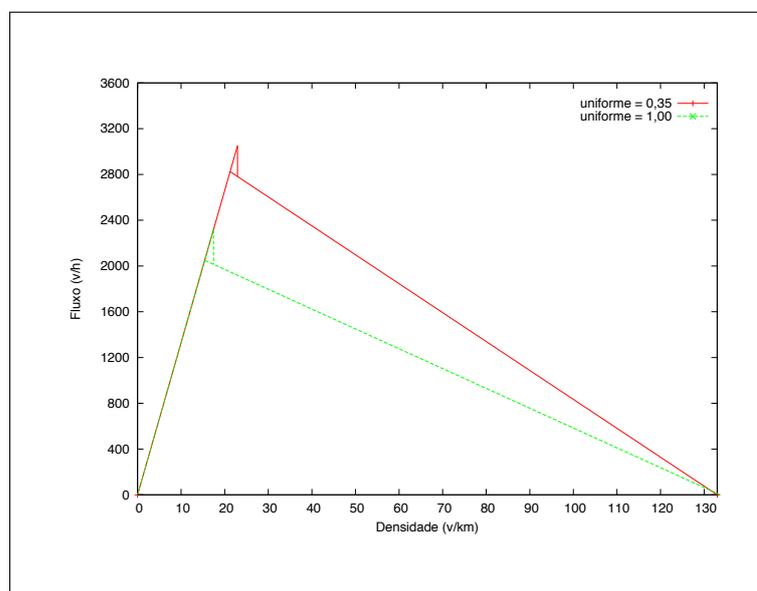


Figura 5.12: Diagrama fluxo-densidade para FDP *Beta*($a = 1, b = 1$).

Também como estes exemplos além de perceber que o T-UFF consegue reproduzir as três fases do fluxo, inclusive a região de meta-estabilidade, sem qualquer tipo de condição inicial especial ou combinação de probabilidades, como já apresentado no grupo de exemplos anterior, mostra-se também tanto os diagramas velocidade-fluxo quanto o di-

agrama velocidade-densidade. Apresentam resultados compatíveis com aqueles descritos na teoria.

GRUPO 3 - variação da velocidade máxima da via: A curva utilizada para a FDP *Beta*, neste grupo de testes, foi definida anteriormente pelos parâmetros $a = 4$ e $b = 8$ (Figura 5.2). Neste grupo de testes foram realizadas simulações com as velocidades máximas de 16, 18, 20 e 22 células por segundo, o que corresponde a 86,4km/h, 97,2km/h, 108km/h e 118,8km/h respectivamente, para comparar o resultado da simulação com os valores teóricos apresentados no HCM [16]. Assim sendo, comparando as Figuras 2.18 e 5.13, que apresentam modelo teórico do HCM e os resultados das simulações do modelo T-UFF respectivamente, nota-se que os resultados podem ser considerados qualitativamente e quantitativamente bons. O HCM apresenta resultados de um modelo teórico, que para garantir a distância de segurança com o aumento da quantidade de veículos na via, é necessário reduzir a velocidade média da via.

Vale ressaltar, como já anteriormente comentado, que o HCM [16] sugere a velocidade média da via em função do aumento do fluxo a fim de garantir o fluxo livre e uma distância de segurança entre os veículos. Pode-se considerar que pequenas diferenças dos resultados são devidos a consideração de fatores como a largura da faixa da via e conhecimento da pista por parte do motorista, que são considerados nos resultados apresentados no HCM. Estes fatores não são considerados no modelo T-UFF.

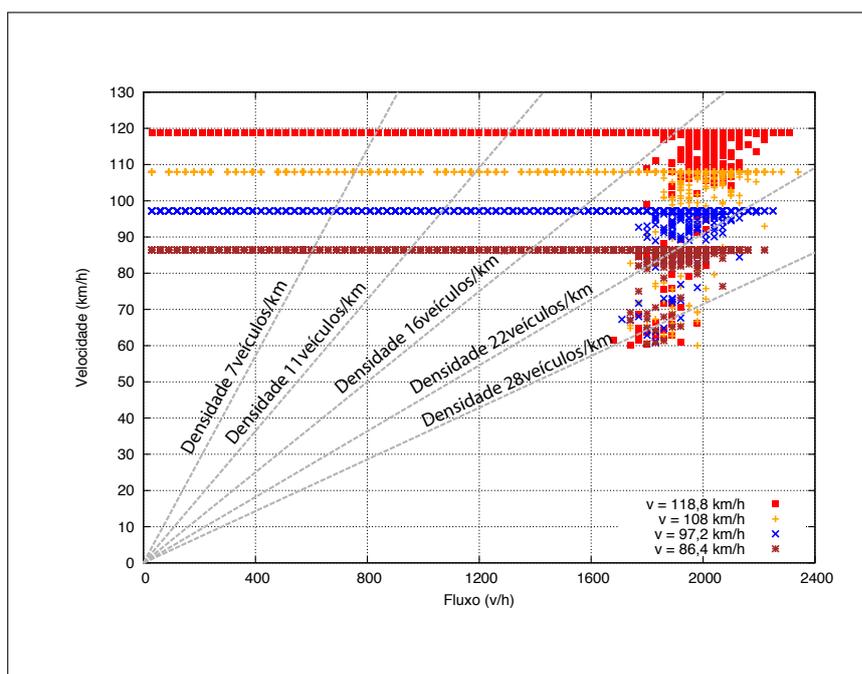


Figura 5.13: Diagrama velocidade-fluxo com diferentes velocidades.

A seguir é apresentado, na Figura 5.14, o diagrama velocidade-densidade para as diferentes velocidades máximas. Pode-se observar, neste caso, que ao reduzir a velocidade máxima da via, a velocidade média mantém-se próxima da máxima para maiores densidades da via.

A simulação com velocidade máxima de $v_{max} = 86,5\text{km/h}$ mantém a velocidade média igual à velocidade máxima aproximadamente para $0 < \rho < 20$ veículos/km, não reproduzindo este estado para a simulação que tem a velocidade máxima da via $v_{max} = 118,8\text{km/h}$. Neste caso, a velocidade média da via começa a ficar abaixo da máxima a partir de uma densidade menor ($\rho \approx 16$ veículos/km). Estes resultados mostram que o

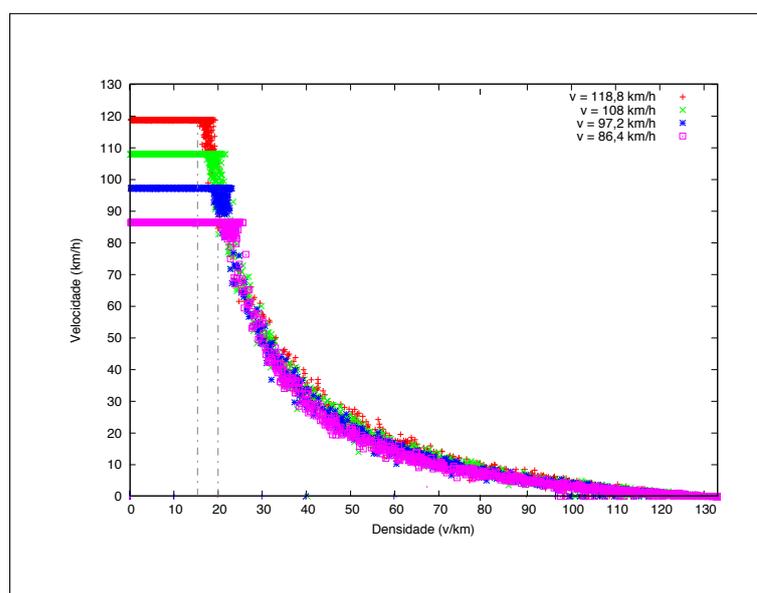


Figura 5.14: Diagrama velocidade-densidade com diferentes velocidades.

modelo reproduz um comportamento global da via que surge a partir de interação entre os veículos, pois como explicado na Seção 2.3, enquanto o fluxo é livre, este aumenta em função da densidade, conforme a relação $J = \rho \bar{v}$ (Equação 2.15) e a média da velocidade é igual a velocidade máxima. Contudo, à medida que outros veículos entram no sistema e a densidade aumenta, o espaçamento médio entre os veículos diminui (\bar{s}). Deste modo, haverá um momento que o \bar{s} será pequeno o suficiente para que a flutuação de velocidade de um veículo provoque um congestionamento.

No caso deste teste, o fluxo passa de livre para congestionado em diferentes densidades para diferentes velocidades, pois a distância de segurança não está definida em função da velocidade máxima. Para todos os casos, a média da distância de segurança é determinada pela mesma FDP *Beta*. Assim, conforme a Equação 2.13, a densidade pode ser dada em função da distância média dos veículos. Em outras palavras, garantindo a mesma média

de distância de segurança entre os veículos e sendo estes do mesmo tamanho, mudando a velocidade máxima da via, altera-se também o ponto onde o fluxo passa de livre para congestionado, como é mostrado no diagrama velocidade-densidade (Figura 5.14).

A Figura 5.15 apresenta os diagramas fluxo-densidade para os quatro valores de velocidade máxima da via. Em todos eles pode-se também observar que a redução da velocidade máxima provoca o fluxo congestionado em densidades maiores, onde em todas as quatro velocidades, a média da distância de segurança é a mesma, uma vez que esta é definida na etapa da percepção da distância com a mesma FDP.

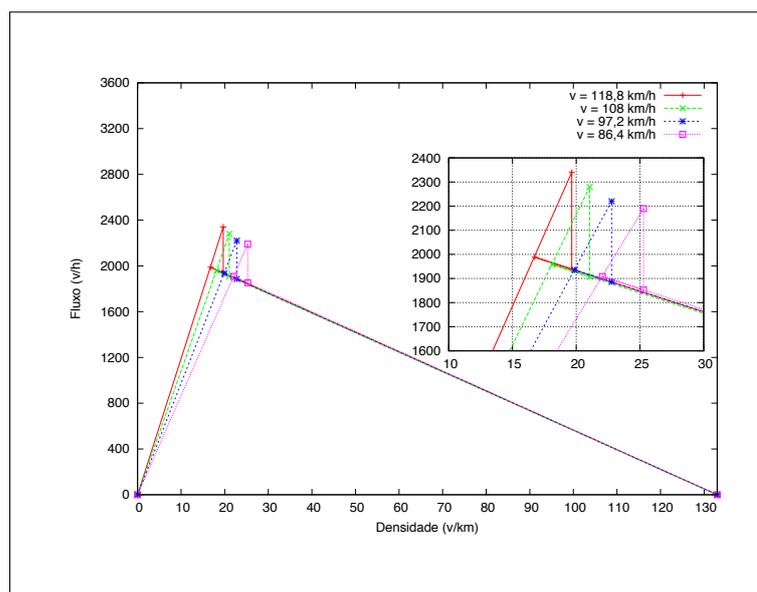


Figura 5.15: Diagrama fluxo-densidade com diferentes velocidades.

Por fim, a Figura 5.16 apresenta o resultado comparativos dos modelo T-UFF e Luz de Freio, que é o modelo apresentado na literatura com melhores resultados. Utilizou-se, para comparação a velocidade máxima da via definida em $20c/s$ ou $108km/h$. Neste exemplo observa-se que o modelo T-UFF apresenta um fluxo livre com um valor um pouco acima do Luz de Freio. Esta característica pode ter ocorrido porque o modelo T-UFF considera no momento de acelerar a distância efetiva, que o veículo $i + 1$ pode acelerar ou manter sua velocidade, caso o fluxo permita. O modelo Luz de Freio não considera esta possibilidade de aceleração.

5.6 Conclusão

Este Capítulo descreve o modelo T-UFF, que é um modelo de antecipação que considera para o cálculo da distância efetiva, que o veículo à sua frente pode, inclusive, acelerar

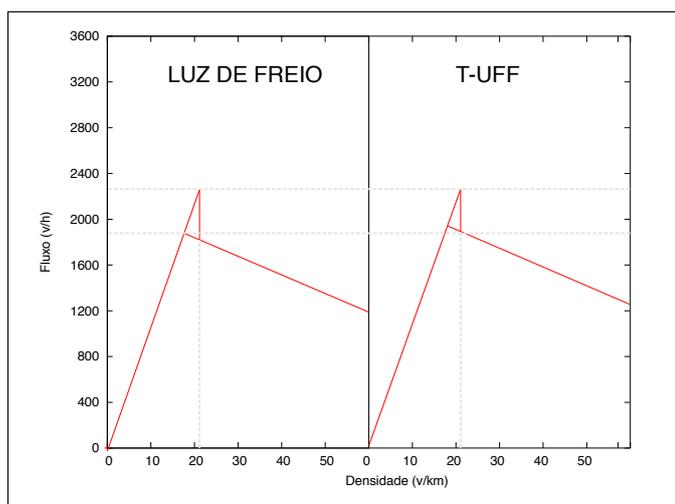


Figura 5.16: Diagrama fluxo-densidade modelo Luz de Freio versus T-UFF.

no instante de tempo atual. Além disso, a velocidade relativa entre os dois veículos e a proximidade entre eles interfere no cálculo desta distância, que é função de uma variável aleatória, que pode ser facilmente manipulada. A mesma estratégia é adotada na etapa de ajuste de velocidade. Além disso, o T-UFF utiliza a FDP *Beta* para descrever esta incerteza do comportamento do motorista tanto na percepção da sua distância quanto no ajuste de sua velocidade, possibilitando uma maior flexibilidade na configuração de diferentes políticas de antecipação.

O modelo T-UFF mostrou-se eficiente, conseguindo reproduzir as três fases do tráfego, incluindo a região de meta-estabilidade. Mostrou-se também capaz de simular diferentes estratégias de percepção da distância e de ajuste de velocidade, não necessitando de qualquer condição inicial especial. Além disso, em todos os casos, as modificações nos parâmetros da FDP são refletidas de forma coerente nos resultados, reproduzido nas simulações, ou seja, para descrever um comportamento global onde os veículos vão movimentar-se próximos uns dos outros, adota-se parâmetros para a FDP *Beta* de forma que mais valores próximos de zero (0) sejam sorteados. Esta flexibilidade de comportamentos é devido as diferentes formas que a FDP *Beta* pode assumir indica que o modelo é capaz de reproduzir diferentes comportamentos de veículos na via, como será apresentado no Capítulo 7.

Capítulo 6

Modelo T-UFF Aplicado em Múltiplas Faixas

A simulação do tráfego veicular em faixa única permite o correto entendimento do comportamento do tráfego e das relações existentes entre as variáveis envolvidas (fluxo, velocidade e densidade). Entretanto, algumas outras características inerentes ao fluxo veicular devem ser tratadas quando se deseja considerar vias com mais de uma faixa, tais como: *i*) inversão do uso da faixa, que acontece em razão da preferência por uma das faixas; e *ii*) frequência de troca de faixa em função da densidade (efeito *ping-pong*) [36, 60, 47].

Este Capítulo tem por objetivo descrever as regras necessárias para que o modelo T-UFF considere mais de uma faixa na via. Na Seção 6.1 são apresentadas algumas regras de mudança de faixa empregadas em modelos de TAC bem como as características anteriormente descritas, como a inversão do uso da faixa e o efeito *ping-pong*. As regras de mudança de faixa utilizadas no modelo T-UFF são descritas na Seção 6.2. Os testes são apresentados na Seção 6.3 e a conclusão do Capítulo é apresentada na Seção 6.4.

6.1 Autômato Celular e Regras de Mudança de Faixa

As regras de mudança de faixas definem o procedimento realizado pelo veículo para efetuar a troca de faixas. Estas regras são classificadas em simétricas ou assimétricas [10, 61]. As regras simétricas definem que não há uma preferência por uma das faixas, e a mesma regra é aplicada tanto para mudança da faixa da esquerda para direita quanto da direita para a esquerda. Por outro lado, a regra assimétrica define que há preferência por uma das faixas, isto é, a regra de mudança da faixa da esquerda para direita é diferente

da regra de mudança da direita para esquerda. No Brasil, por exemplo, utilizam as regras assimétricas, pois de acordo com o CTB (Código de Trânsito Brasileiro) "quando uma pista de rolamento comportar várias faixas de circulação no mesmo sentido são, as da direita, destinadas ao deslocamento dos veículos mais lentos e de maior porte, quando não houver faixa especial a eles destinada, e as da esquerda, destinadas à ultrapassagem e ao deslocamento dos veículos de maior velocidade"[62].

O procedimento para efetuar a mudança de faixas é baseado em um conjunto de regras que são aplicadas sobre cada veículo. Este conjunto de regras é composto por regras de motivação e de segurança. As regras de motivação são as que fazem o veículo analisado desejar efetuar a mudança de faixa. As regras de segurança são as responsáveis por verificar se o veículo analisado pode ir para a faixa de destino. A aplicação dessas regras de segurança tem o objetivo evitar que um dado veículo interfira na movimentação da faixa de destino, após efetuar a mudança de faixa. Logo, para que um veículo efetue a mudança de faixas, é necessário que os dois conjuntos de regras sejam satisfeitos.

Para trabalhar com as regras de mudança de faixas, essas devem ser acopladas às regras do modelo que descrevem o movimento dos veículos (regras de movimentação). A maioria dos modelos de TAC, para duas ou mais faixas, são divididos em dois passos independentes: *i*) aplica-se as regras de mudança de faixa, que são definidas pelas regras de motivação e segurança, sendo estas aplicadas simultaneamente para todos os veículos; *ii*) aplica-se as regras de movimentação do modelo de TAC em questão. Estes dois passos juntos compõem um passo de simulação.

Para descrever, neste capítulo, as regras de mudança de faixa utiliza-se para as distâncias, uma notação que é normalmente composta de dois índices, i e k : o primeiro deles, refere-se ao veículo i ou o que está à sua frente $i + 1$, e o segundo índice, k , é referente à faixa. Assim, $k = e$ refere-se à faixa da esquerda, $k = d$, a da direita e $k = o$ refere-se à faixa origem e, neste caso, é a distância entre dois veículos i e $i + 1$. Por exemplo, $d_{i,o}$ significa a distância do veículo i ao veículo $i + 1$ que estão na mesma faixa, faixa de origem. Além disso, uma vez que as regras de ultrapassagem do CTB são assimétricas, somente essas serão apresentadas no presente Capítulo e neste caso o fluxo da faixa da direita conforme descrito em Wagner et al. [63].

Em Wagner et al. [63] o motorista fica motivado a trocar da faixa da direita para esquerda sempre que não consegue movimentar-se na velocidade desejada. Neste caso, observa-se se a distância entre o veículo analisado e o veículo à sua frente, estando os dois na mesma faixa, é menor que a velocidade máxima da via, ou seja, $v_{max} > d_{i,o} - 1$, e a

faixa da esquerda apresenta um fluxo melhor ($d_{i,e} \geq d_{i,d}$). Para isto, o modelo verifica a distância entre o veículo analisado e o veículo à sua frente na faixa da direita ($d_{i,d}$) e também na faixa da esquerda ($d_{i,e}$). Por outro lado, o motorista fica motivado a retornar para a faixa direita (mudança da esquerda para direita) sempre que percebe que o veículo à sua frente na faixa da esquerda está distante ($v_{max} \leq d_{i,e} - 1$) e pode movimentar-se na faixa da direita na velocidade desejada ($v_i \leq d_{i,d}$). A regra de segurança verifica se o veículo pode efetuar a troca de faixa. Para tanto, compara a distância entre veículo analisado e o veículo à sua frente na faixa de destino com a velocidade máxima da via, incluindo na parcela uma distância de segurança (d_s), conforme: $v_{max} < d_{i,k} - 1 - d_s$. A constante 1 nas regras representa o tamanho de um veículo em células.

No trabalho desenvolvido por Rickert et al. [37] a motivação da mudança da faixa da esquerda para direita é dada quando o veículo não consegue mais acelerar ($d_{i,o} < v_i + 1$). Na motivação para o retorno à faixa da direita, este modelo considera que o veículo à frente do analisado está distanciando-se sempre que a velocidade desse é menor que sua distância, ou seja, $d_{i,o} \geq v_{i+1}$. A regra de segurança analisa a distância entre o veículo que vem atrás ($i - 1$) e o veículo à frente ($i + 1$) na faixa de destino, sendo esta distância dada por: $d_{i-1,d}$, se for a referente à faixa da direita e $d_{i-1,e}$ para esta distância na faixa da esquerda. Quando esta distância é menor que a velocidade máxima da via ($d_{i-1,k} < v_{max}$), então o veículo analisado pode efetuar a troca.

Kai et al. [36] propõem duas formulações em seu trabalho: a primeira trata das regras de mudança de faixa na Alemanha e a segunda refere-se à formulação das regras de mudança de faixa nos Estados Unidos.

Na regra Alemã, item (A) da Tabela 6.1, é proibida a ultrapassagem pela faixa da direita. Assim, quando há um veículo na faixa da direita que esteja mais rápido que um veículo na faixa da esquerda, ele é motivado a mudar para faixa da esquerda e ficar atrás deste veículo mais lento na faixa da esquerda e, com isso, forçando este veículo a mudar para a faixa da direita. Para isto, a regra de ultrapassagem adota duas expressões: $d_{i,e} \leq v_i$ ou $d_{i,d} \leq v_i$. Na motivação da mudança de faixa da esquerda para direita é considerado se o veículo à frente do analisado, na faixa da esquerda, está distanciando-se e também se o veículo à sua frente, na faixa da direita, está longe. Para isto, a velocidade do veículo analisado e a sua distância para os dois veículos são comparadas, conforme a regra: $d_{i,e} > v_i$ e $d_{i,d} > v_i$. Neste mesmo trabalho, a regra Americana, item (B) da Tabela 6.1, define que não há uma proibição expressa de ultrapassagem pela faixa da direita, embora a preferência seja pela faixa da esquerda. Neste caso, a motivação da mudança

de faixa, da direita para a esquerda, ocorre quando a distância entre o veículo analisado e o veículo à sua frente na faixa da direita ($d_{i,d}$) é menor que a velocidade do veículo analisado ($d_{i,d} \leq v_i$). Ademais, é observado se o fluxo na faixa da esquerda é melhor, ou seja: $d_{i,d} \leq d_{i,e}$. A regra de segurança é a mesma tanto para o item A quanto para o item B . Esta regra é dada por: $d_{i-1,o} > v_{max}$ e $d_{i,o} > v_{i+1}$. Então, a regra de segurança verifica se o veículo analisado cabe na faixa de destino, quando o espaço nesta é maior que a velocidade máxima da via e a distância ($d_{i,o}$) é maior que a velocidade do veículo $i + 1$ na faixa de destino v_{i+1} .

O modelo proposto por Knospe et al. [38], conhecido na literatura como Luz de Freio, utiliza a política de antecipação do modelo nas regras de motivação e segurança. Neste trabalho o motorista é incentivado a mudar de faixa quando não consegue movimentar-se na velocidade desejada, ou seja, $b_i = 0$ e $v_i > d_{i,o}$, onde b_i é uma variável que assume apenas dois valores: 0, que indica que o veículo está movimentado-se normalmente, sem frear, e 1, indicando que o veículo está reduzindo sua velocidade. Para indicar que um veículo i não tem espaço para mover-se o desejado, adota-se a relação $v_i > d_{i,o}$. Por outro lado a regra de motivação da esquerda para direita é dada por: ($b_i = 0$ e $t_{i+1,o}^h > 3$) e ($t_i^h > 6$ ou $v_{i-1} > d_{i-1,o}$). A regra emprega uma estratégia de percepção da distância. Esta percepção é dada pelo tempo que o veículo analisado demoraria para chegar ao veículo à frente, caso esse estivesse parado, ou seja: $t^h = \frac{d}{v}$. Assim, o motorista é motivado a mudar da faixa da esquerda para direita quando percebe que o veículo que vem atrás está mais rápido que ele ($v_{i-1} > d_{i-1}$) ou se o veículo à sua frente está distanciando-se ($t_i^h > 6$). É também observado se o veículo analisado está parado ($b_i = 1$) ou se o veículo à frente, em relação ao veículo analisado na faixa de destino, vai continuar movimentando-se pelos próximos 3 segundos ($t_{i+1,o}^h$). Em relação à regra de segurança, duas observações são consideradas: *i*) verifica se a velocidade do veículo analisado é menor que a distância entre ele e o veículo à sua frente na faixa de destino ($d_{is+1,o} \geq v_i$), onde $d_{is+1,o}$ é a distância efetiva entre dois veículos); *ii*) verifica se a velocidade do veículo na faixa de destino e que vem atrás é menor que a distância entre ele e o veículo analisado ($v_{i-1,o}$).

A Tabela 6.1 apresenta um resumo destas regras assimétricas de mudança de faixa e a sua referência, onde "**S. da troca**" define se o veículo deseja mudar da faixa da direita para esquerda (D. \rightarrow E.) ou ao contrário (E. \rightarrow D.).

Vale observar que nos trabalhos previamente descritos, as regras que consideram a velocidade máxima da via, tanto na regra de motivação quanto na regra de segurança, proíbem, de forma implícita, a ultrapassagem em médias e altas densidades, uma vez que

Tabela 6.1: Resumo das regras assimétricas.

S. da troca	Regra de motivação	Regra de segurança	Autor
D. → E.	$v_{max} > d_{i,o} - 1$ e $d_{i,e} \geq d_{i,o}$	$v_{max} < d_{i,o} - 1 - d_s$	Wagner et al. [63]
E. → D.	$v_{max} \leq d_{i,o} - 1$ e $v_i \leq d_{i,d}$		
D. → E.	$d_{i,o} < v_i + 1$	$d_{i-1,k} > v_{max}$	Rickert et al. [37]
E. → D.	$d_{i,o} \geq v_i + 1$		
D. → E.	$d_d \leq v_i$ ou $d_e \leq v_i^A$	$d_{i-1,o} > v_{max}$ e $d_{i,o} > v_{i+1}$	Kai et al. [36]
E. → D.	$d_d > v_i$ e $d_e > v_i^A$		
D. → E.	$d_d \leq v_i$ e $d_d \leq d_e^B$	$d_{i-1,o} > v_{max}$ e $d_{i,o} > v_{i+1}$	Kai et al. [36]
E. → D.	$d_d > v_i$ ou $d_e > v_i^B$		
D. → E.	$b_i = 0$ e $v_i > d_i$	$d_{is+1,o} \geq v_i$ e $d_{i-1,o} \geq v_{i-1,o}$	Knospe et al. [38]
E. → D.	$(b_i = 0$ e $t_{i+1,o}^h > 3)$ e $(t_i^h > 6$ ou $v_{i-1} > d_{i-1})$		

a medida que a densidade aumenta, o espaçamento médio dos veículos diminui. Nestes casos, as ultrapassagens vão acontecer enquanto a distância média entre os veículos for maior ou igual à velocidade máxima da via.

O modelo T-UFF adota, nas regras de motivação e segurança, o conceito apresentado por Knospe et al. [38], onde a política de antecipação é considerada na regra de segurança. Além das regras para mudança de faixas, os modelos de múltiplas faixas devem ser devidamente calibrados para que possam representar, de forma adequada, tanto a inversão do uso da faixa quanto evitar o efeito *ping-pong*, descritos a seguir.

6.1.1 Inversão do uso da faixa

A característica conhecida como inversão do uso da faixa acontece a partir da preferência dos veículos trafegarem em uma delas. Desta forma, considerando as três fases do fluxo apresentadas na Seção 2.3, pode-se observar na Figura 6.1 que em densidades mais baixas ($0 < \rho \leq 10$ veículos/km) os veículos movimentam-se na velocidade desejada e, portanto, não precisam realizar ultrapassagens, mantendo-se na faixa da direita. Entretanto, este é um estado que não é sustentado com o aumento da densidade, pois a medida que mais veículos entram no sistema, o espaço entre eles diminui e estes veículos são motivados a trocar de faixa. Este estado é mantido até que o uso da faixa da esquerda supere o uso da direita [38], sendo este o momento em que ocorre a inversão do uso da faixa. Em densidades mais elevadas, há uma tendência de equilíbrio entre o uso das faixas, uma vez que o espaço em ambas é reduzido. Esta característica é analisada no diagrama de uso da faixa [64], ilustrado na Figura 6.1.

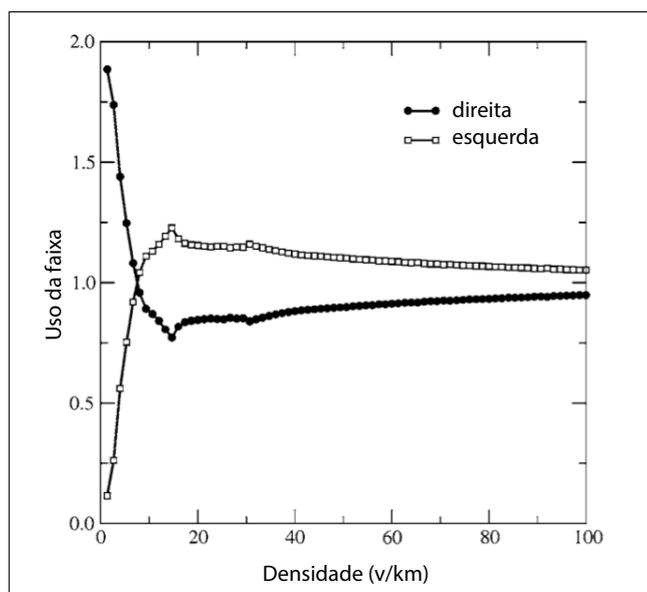


Figura 6.1: Diagrama do uso da faixa.
 Fonte: Adaptada de: Knospe et al. [38].

Vale ressaltar que os modelos que adotam regras simétricas não apresentam a inversão do uso da faixa, visto que não existe preferência por uma determinada faixa da via.

6.1.2 Efeito *ping-pong*

O efeito *ping-pong* surge em modelos multifaixa quando um veículo troca de faixa por sucessivos instantes de tempo, uma vez que as regras de mudança de faixa permitem que ele volte para sua faixa de origem no instante seguinte à mudança, e assim sucessivamente [65]. Quando isto ocorre, este veículo terá uma grande probabilidade de efetuar, novamente, uma outra mudança, caso as condições desta faixa não tenham sido alteradas. Uma estratégia para evitar este tipo de efeito é introduzir uma probabilidade de mudança de faixa, isto é, ainda que as regras de motivação e segurança sejam satisfeitas, existe a probabilidade do veículo realizar ou não a mudança [37].

6.2 Regras de mudança de faixa no modelo T-UFF

Para reproduzir situações do trânsito brasileiro, o modelo T-UFF adota regras assimétricas. Sendo assim, além das regras para mudança de faixas, ele deve ser calibrado para observar se as características do efeito *ping-pong* estão sendo devidamente consideradas e se a inversão do uso da faixa está acontecendo como previsto.

O modelo T-UFF adota, nas regras de motivação e segurança, o conceito apresentado

por Knospe et al. [38] de considerar a antecipação nestas regras. Desta forma, as regras apresentadas a seguir, motivação e segurança, são próprias do modelo T-UFF.

6.2.1 Regras de motivação

O T-UFF emprega regras que traduzem o que é definido no Código de Trânsito Brasileiro [62]. Considerando a mudança da faixa da direita para esquerda, o motorista do veículo i (veículo analisado) torna-se motivado sempre que estiver a menos de uma determinada distância, em metros, do veículo à sua frente, dada por $h_i \times v_{i,j} > d_{is,j}$ e, também, se a faixa à sua esquerda apresenta um fluxo melhor, ou seja, $v_{i,j} > d_{is,j-1}$. Além disso, o parâmetro h , que é definido segundo a FDP *Beta*, indica a partir de que momento veículo deve tornar-se motivado. Esta é uma regra que proporciona um comportamento mais realista, uma vez que o estado das duas faixas é analisado simultaneamente, além de aplicar a estratégia de percepção da distância de acordo com política de antecipação do modelo, ou seja:

$$(h_i \times v_{i,j} > d_{is,j}) \text{ e } (v_{i,j} > d_{is,j-1}) \quad (6.1)$$

onde o segundo índice indica a faixa da via. Assim, $j - 1$ refere-se à faixa à esquerda da faixa j , enquanto que $j + 1$ indica a faixa à direita. $d_{is,j}$ é a distância, considerando a política de antecipação descrita anteriormente (Equação 5.4) entre veículo i e o veículo $i + 1$, quando ambos estão na faixa j . No caso da distância a ser considerada seja a de um veículo que está em outra faixa, o índice da faixa (segundo índice) indica, através de um subíndice, a faixa a ser considerada. Assim, d_{is,j_e} é distância do veículo i ao veículo $i + 1$ que está na faixa $j - 1$ e d_{is,j_d} refere-se a esta mesma distância em relação ao veículo $i + 1$ na faixa $j + 1$. A velocidade do veículo i na faixa j é dada por $v_{i,j}$. $h \times v > d$, com $h > 1$, significa que o motorista está motivado, mesmo antes de não ter espaço para movimentar-se, h define a percepção da presença do veículo i , e tem o objetivo de motivar o motorista a trocar da faixa j para $j - 1$.

A regra para a mudança de faixa da esquerda para direita considera se o veículo analisado movimentar-se mais lentamente que os outros veículos na mesma faixa. Para isto, duas regras são necessárias para motivar o motorista: na primeira o veículo i é motivado sempre que um veículo que vem atrás ($i - 1$) está mais rápido e próximo de i , conforme:

$$(v_{i,j} < v_{i-1,j}) \text{ e } (d_{i-1,j} < h_b \times v_{i-1,j}) \quad (6.2)$$

A segunda regra motiva o motorista quando o veículo $i + 1$ está distanciando-se e é dada por:

$$d_{i,j} > h_a \times v_{i,j} \quad (6.3)$$

De forma similar à regra de motivação descrita pela Equação 6.1, a motivação para a mudança de faixa da esquerda para direita considera também a política de antecipação, onde o parâmetro h_b (Equação 6.2) é definido como: $h_b = \max[2h \times \alpha, 1]$ e parâmetro h_a (Equação 6.3) é dado por: $h_a = \max[h \times \alpha, 1]$. Assim, estas variáveis (h_b e h_a) também representam um tempo de percepção do motorista, que é definido de acordo com a FDP *Beta* da etapa de percepção da distância. A constante 1 usada na definição dos valores h_a e h_b garante a motivação do motorista de trocar de faixa e as constantes foram definidas em função do parâmetro h do modelo T-UFF, neste caso $h = 12$. Além disso, o retorno de um veículo lento para a faixa da direita é dado em função de duas situações, uma referente ao veículo que vem atrás e outra relacionada ao veículo à frente. Portanto, em relação ao veículo que vem atrás, espera-se que este não precise reduzir sua velocidade para que o veículo mais lento retorne para a faixa da direita.

6.2.2 Regras de segurança

As regras de segurança do modelo T-UFF, assim como os trabalhos previamente descritos, consideram as seguintes situações para um veículo i efetuar a mudança de faixa: verifica se há espaço suficiente, em células, para comportar o veículo i e observa se com esta troca de faixa ele vai bloquear algum outro veículo que está na faixa de destino.

As regras de segurança para a mudança da faixa da direita para esquerda são dadas por:

$$(d_{is-1,j-1} > v_{i,j}) \text{ e } (v_{i,j} < d_{is,j-1}) \quad (6.4)$$

Por outro lado, as regras de segurança para a mudança da faixa da esquerda para direita são definidas por:

$$(d_{is-1,j+1} > v_{i,j}) \text{ e } (v_{i,j} < d_{is,j+1}) \quad (6.5)$$

Na Equação 6.4, o veículo i verifica se há espaço suficiente na faixa de destino (faixa $j-1$), comparando sua velocidade $v_{i,j}$ com a distância entre ele e o veículo $i+1$, considerando que este vai acelerar no próximo instante de tempo. Para verificar se irá "bloquear" o

veículo $i - 1$ (o veículo que vem atrás) quando trocar de faixa, veículo i compara se o veículo $i - 1$ poderá movimentar-se na velocidade desejada, considerando a política de antecipação, isto é, se a distância de $i - 1$ ($d_{is-1,j+1}$) é maior do que a sua velocidade ($v_{i,j}$). A Figura 6.2 ilustra o cenário onde a Equação 6.4 é aplicada. A Equação 6.5, que trata da regra de segurança da mudança de faixa da esquerda para direita, é análoga à Equação 6.4.

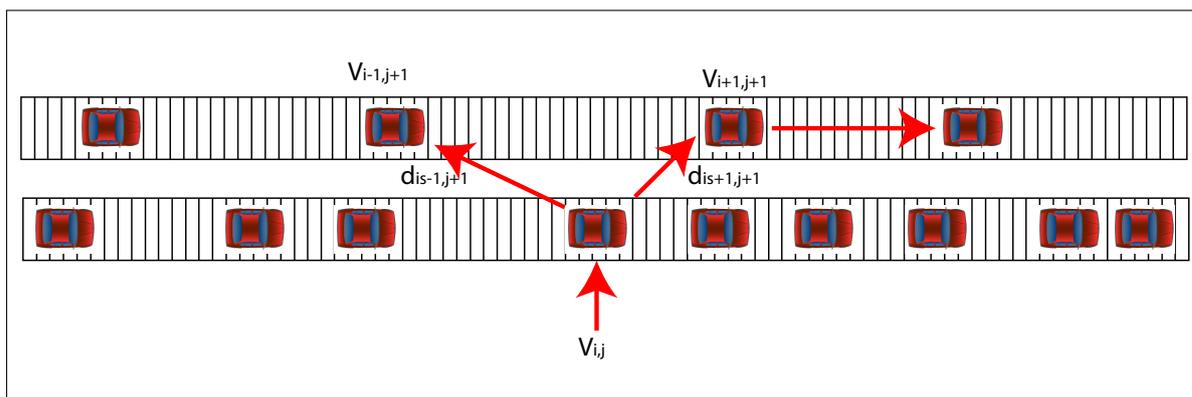


Figura 6.2: Regra de segurança (troca da direita para esquerda).

Vale ressaltar que os modelos encontrados na literatura aplicam a aleatoriedade na mudança de faixa apenas para evitar o efeito *ping-pong*. No modelo T-UFF, a incerteza do comportamento do motorista é aplicado também nas regras de motivação e segurança.

6.3 Testes de Validação Com Regras de Mudança de Faixa

As simulações apresentadas neste Capítulo são também divididas em dois grupos:

- **GRUPO 1:** validação e calibração do modelo, reproduzindo as características da simulação multifaixas, utilizando a FDP *Beta* utilizada para testar o modelo no Capítulo 5, *Beta* ($a = 4$, $b = 8$);
- **GRUPO 2:** influência dos parâmetros da FDP *Beta* na simulação em vias com duas faixas; e
- **GRUPO 3:** estudos de caso relacionados à via com multifaixa:
 - *i*) via com quatro faixas;
 - *ii*) simulação com veículo grande e lento; e

- *iii*) via com pista interditada e a influência da distância da placa de sinalização.

Em todos os testes aqui realizados foi considerada uma via com 10.000 células de 1,5m, ou seja, 15km, com $v_{max} = 25c/s$ (135km/h) e tempo de simulação de 14.400 segundos com medições a cada 2 minutos.

Inicialmente o modelo deve ser ajustado para evitar o efeito *ping-pong*. Para isso a Figura 6.3 apresenta o resultado do efeito *ping-pong* para diferentes probabilidades de troca. Pode-se observar que com o valor $p_{muda} = 0,5$, tem-se o valor máximo em 800 trocas por quilômetro por hora como sugerido por Knospe et al. [38] e por Rickert et al. [37]. Pode-se observar também que aumentando ou reduzindo esta probabilidade de mudança de faixas, há também um aumento ou redução na frequência de trocas por quilômetro por hora. Portanto, utiliza-se o valor da probabilidade de $p_{muda} = 0,5$ como utilizado em Wagner et. al [63].

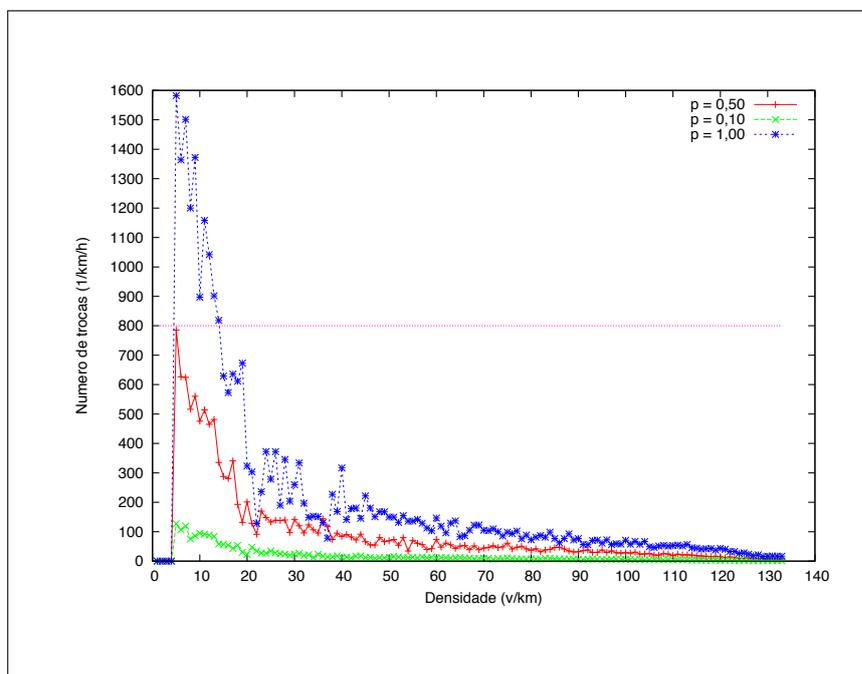


Figura 6.3: Frequência e troca de faixas com diferentes probabilidades (p_{muda}).

GRUPO 1: A Figura 6.4 apresenta o diagrama fluxo-densidade para via com duas faixas, quando são utilizados os parâmetros $a = 4$ e $b = 8$, para a FDP adotada. Nota-se que a faixa à esquerda apresenta fluxo melhor que a faixa da direita para todas as densidades. O fluxo mantém-se livre na faixa da direita até $J \approx 1.800$ veículos/hora e na da esquerda até $J \approx 2.200$ veículos/hora. O mesmo pode ser observado nos diagramas nas Figuras 6.5(a) e 6.5(b).

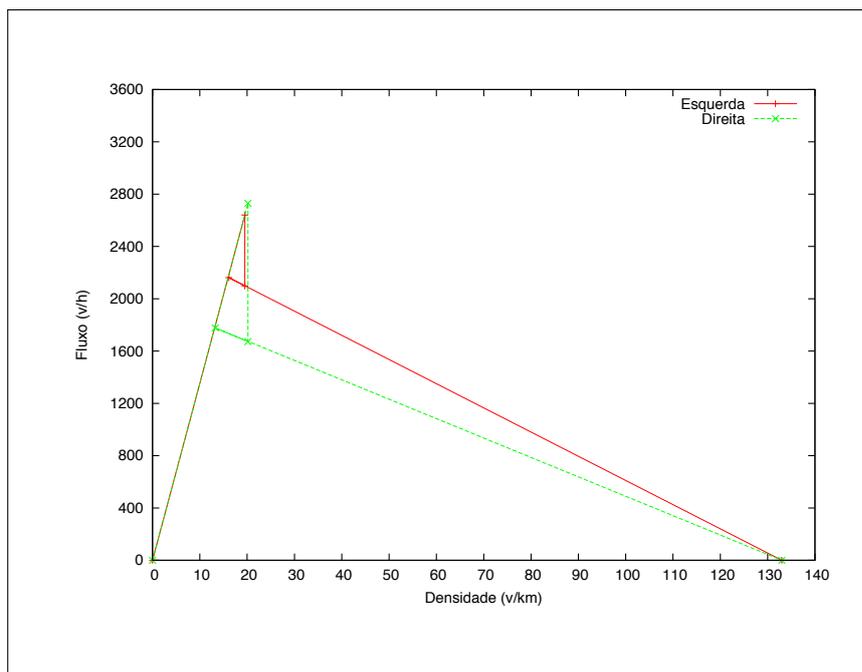
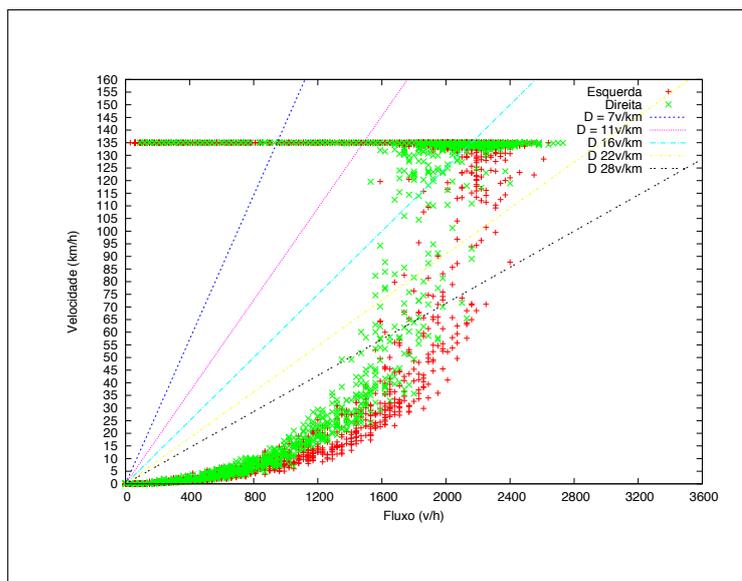


Figura 6.4: Diagrama fluxo-densidade - FDP $Beta(a = 4, b = 8)$ - regra assimétrica.

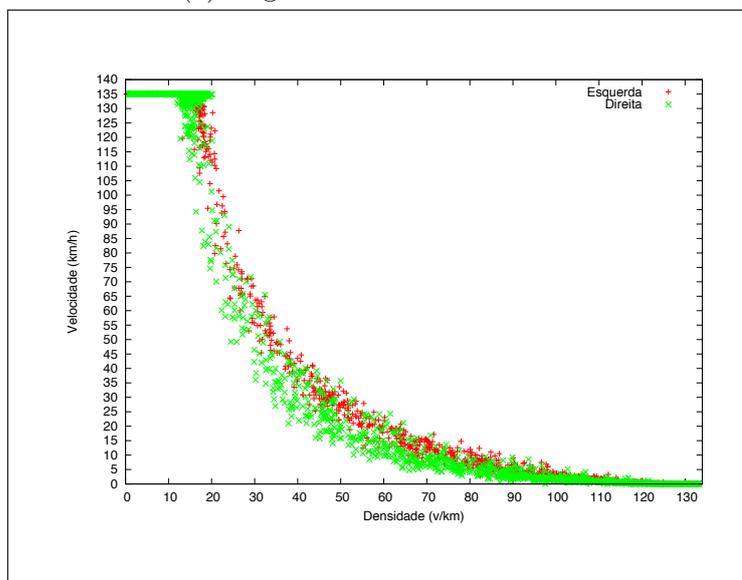
Pode-se observar nas Figuras 6.6(a) e 6.6(b) que a relação fluxo-densidade é dada de forma independente da probabilidade p_{muda} . Em síntese, a Figura 6.6(a) reproduz a simulação com baixo desejo de trocar de faixa, ainda que seja motivado com probabilidade $p_{muda} = 0,10$. Por outro lado, o diagrama fluxo-densidade apresentado na Figura 6.6(b) reproduz a simulação de um comportamento onde o motorista ultrapassa sempre que está motivado, ou seja, adota-se a probabilidade $p_{muda} = 1,00$.

Em relação à inversão do uso da faixa, a Figura 6.7 mostra que a inversão acontece em uma densidade $\rho \approx 16$ veículos/km, o que está de acordo com o apresentado no diagrama fluxo-densidade (Figura 6.4). Isto acontece porque até esta densidade o fluxo é livre e não há interação entre os veículos. Portanto, os veículos devem se manter na faixa da direita. A partir desta densidade, o espaço entre os veículos é menor e qualquer flutuação de velocidade pode provocar a formação de congestionamentos, ou seja, a via encontra-se no fluxo sincronizado. Assim, os veículos já não conseguem moverem-se na velocidade desejada e começam a realizar ultrapassagens, passando a ocupar mais a faixa da esquerda do que a faixa da direita. Acima deste ponto o fluxo é congestionado e à medida que a densidade aumenta, o espaço entre os veículos diminui e a mudança de faixa vai acontecendo com menos frequência e as duas faixas começam a apresentar uma taxa de utilização semelhante, em torno de 0,5.

GRUPO 2: Neste grupo são analisadas a influência de diferentes parâmetros da FDP $Beta$. Apresentam-se, a seguir, resultados para as FDPs $Beta(a = 1, b = 5)$ e



(a) Diagrama velocidade-fluxo.

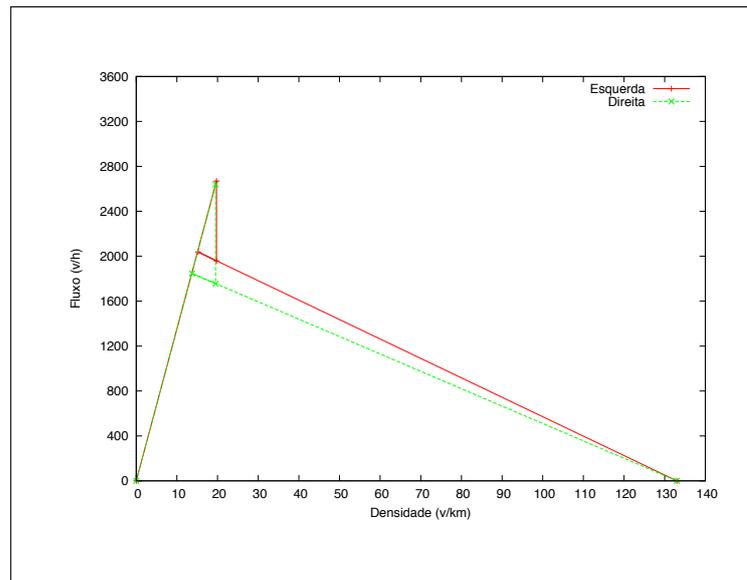
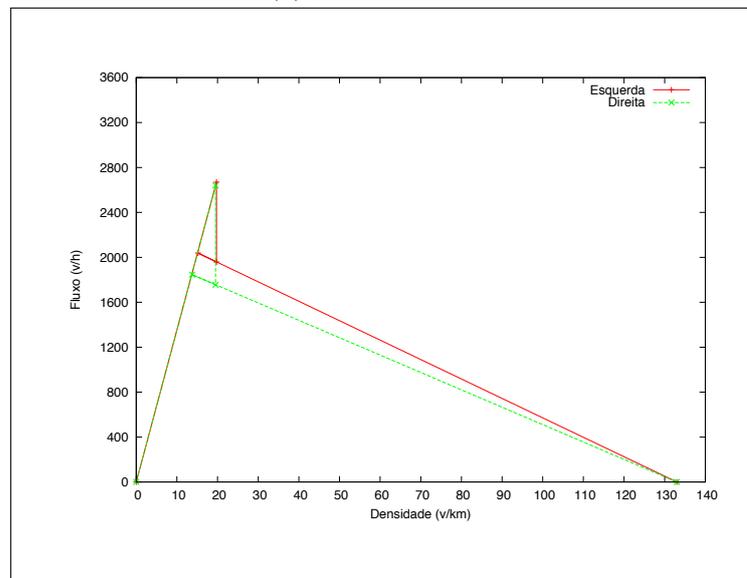


(b) Diagrama velocidade-densidade.

Figura 6.5: FDP $Beta(a = 4, b = 8)$ - regra assimétrica.

$Beta(a = 8, b = 4)$. Pode-se notar nas Figuras 6.8(a) e 6.8(b) que o uso de diferentes FPDs $Beta$, em uma via de duas faixas, continua reproduzindo o que já foi discutido no Capítulo 5. A simulação com a FDP $Beta$ configurada com $a = 1$ e $b = 5$ tem um fluxo melhor que a simulação onde o comportamento global da via é de veículos que movimentam-se mais distantes uns dos outros.

As Figuras 6.9(a) e 6.9(b) apresentam a influência da escolha dos parâmetros da FDP $Beta$ no diagrama de uso da faixa. Quando um veículo anda mais próximo do veículo à sua frente, ou seja, quando $a = 1$ e $b = 5$, como explicado anteriormente, o fluxo livre é mantido até uma densidade maior. Neste caso, o veículo também demora mais

(a) $p_{muda} = 0,10$.(b) $p_{muda} = 1,00$.Figura 6.6: Relação fluxo densidade com duas faixas e FDP $Beta(a = 4, b = 8)$.

para motivar-se, provocando a inversão do uso da faixa em uma densidade mais elevada, $\rho \approx 25$ veículos/km, do que quando os parâmetros usados são $a = 8$ e $b = 4$, onde os veículos desejam se movimentarem mais distantes. Neste caso, a inversão acontece em uma densidade menor ($\rho \approx 15$ veículos/km). O terceiro comportamento, com os parâmetros $a = 4$ e $b = 8$, mostra que a inversão do uso da faixa acontece em uma densidade $\rho \approx 16$ veículos/km que é intermediária às duas anteriores (Figura 6.7). Este mesmo resultado intermediário pode também ser observado nos diagramas fluxo-densidade apresentados pelas Figuras 6.4, 6.8(a) e 6.8(b).

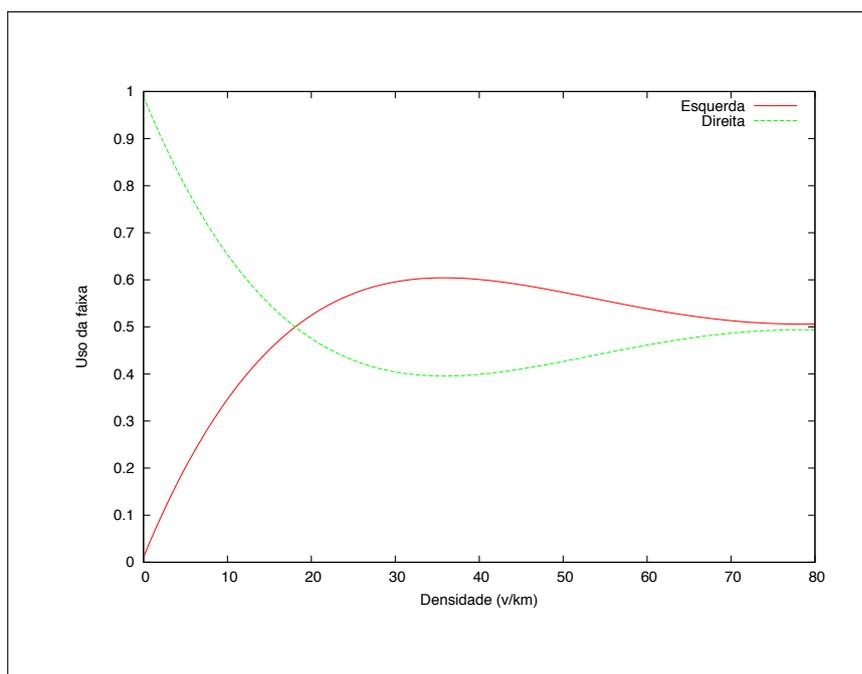


Figura 6.7: Inversão do uso da faixa com FDP $Beta(a = 4, b = 8)$.

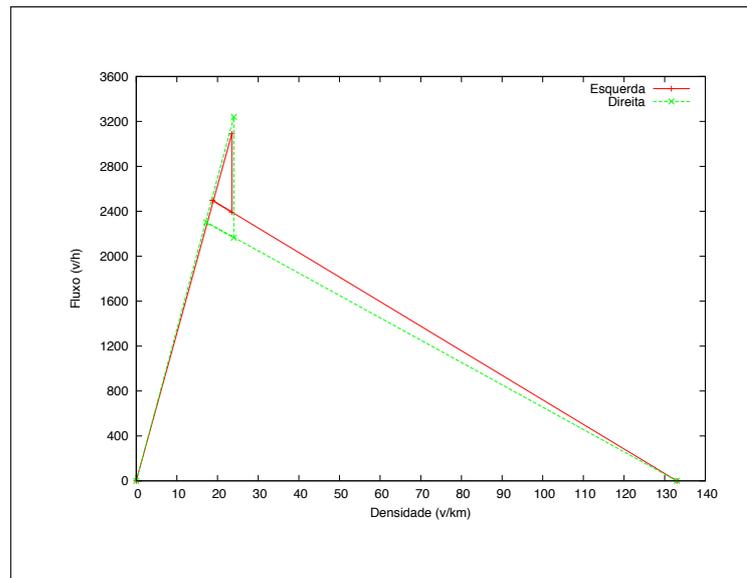
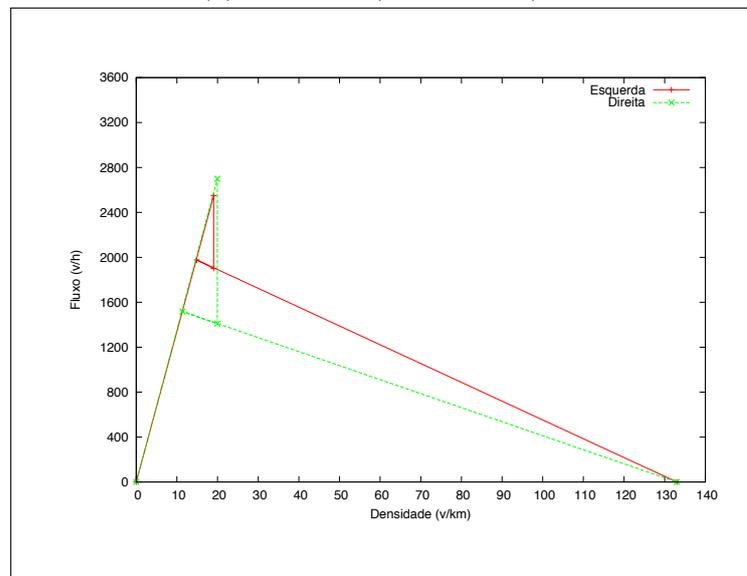
Portanto, o mesmo resultado observado no Capítulo 5 é reproduzido em vias de duas faixas, onde as variáveis envolvidas são diretamente influenciadas pela política de antecipação definida.

GRUPO 3: i) O primeiro estudo de caso simula uma via com quatro faixas, as outras configurações da via são as mesmas já apresentadas neste Capítulo.

A Figura 6.10, para melhor entendimento do resultado, ilustra o esquema das faixas, onde as faixas são numeradas de 0 a 3, sendo a faixa 0 a mais à esquerda e 3 a mais à direita.

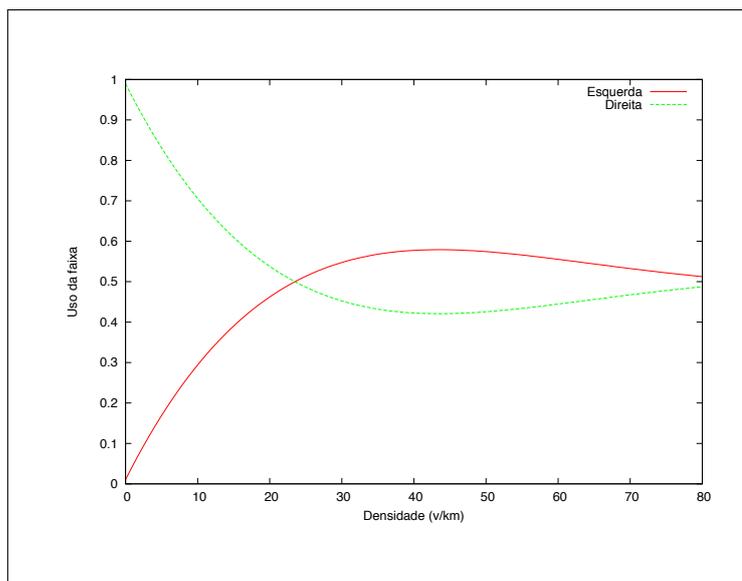
O diagrama fluxo-densidade desta simulação afirma o que já anteriormente foi discutido, ou seja, a faixa da esquerda apresenta um valor de fluxo maior que a faixa da direita 6.11, ou seja, veículos mais rápidos movimentando-se na faixa da esquerda, enquanto que os veículos mais lentos trafegam na faixa da direita.

A Figura 6.13 mostra o diagrama espaço tempo de duas das quatro faixas em um intervalo de 20 minutos, onde a faixa da esquerda é a faixa 0 e a outra faixa é a 3. Nota-se que como esperado, a faixa mais à esquerda apresenta alguns pequenos congestionamentos que são, em seguida, dissolvidos. Observado na faixa da direita, esses pontos são mais difíceis de formarem-se, uma vez que nesta faixa trafegam os veículos que estão mais lentos.

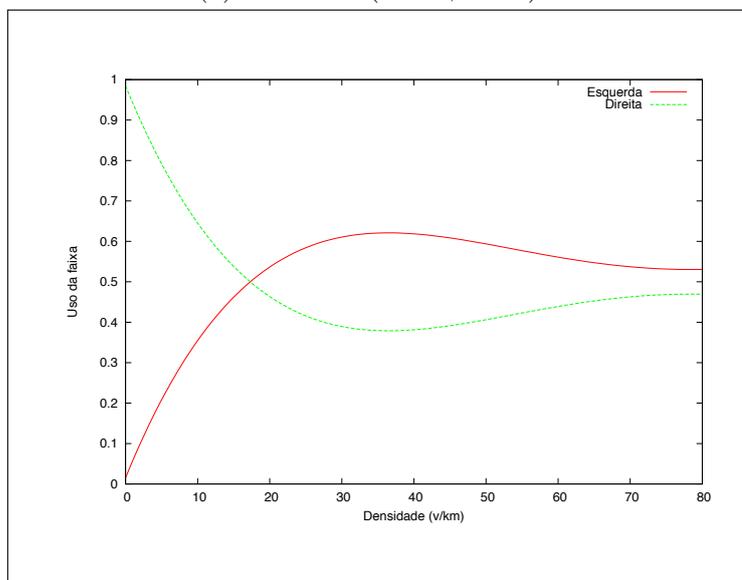
(a) FDP $Beta(a = 1, b = 5)$.(b) FDP $Beta(a = 8, b = 4)$.Figura 6.8: Relação fluxo densidade com diferentes valores para FDP $Beta$.

Portanto, como esperado, o modelo T-UFF reproduz nas quatro faixas o mesmo que em duas, isto é, a faixa mais à esquerda apresenta um fluxo um pouco melhor que a faixa da direita para todas as densidades. Ademais, observa as três fases do fluxo, inclusive com a região de meta-estabilidade, em todas as faixas.

ii) Neste estudo de caso apresenta-se a simulação de ônibus e carros em um mesmo domínio, onde os ônibus são maiores e mais lentos, em relação aos carros, porém, são em menor quantidade.



(a)FDP $Beta(a = 1, b = 5)$.



(b)FDP $Beta(a = 8, b = 4)$.

Figura 6.9: Inversão do uso da faixa para diferentes FPDs Beta.

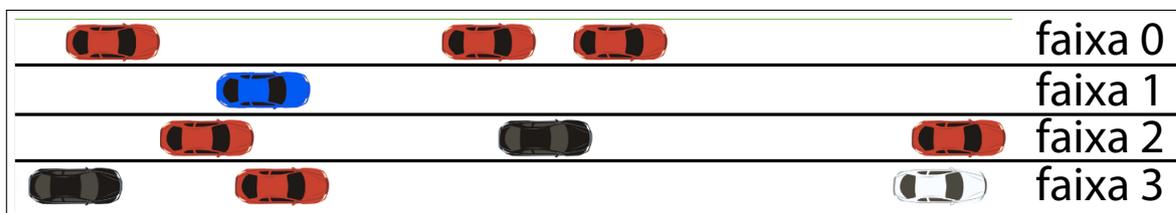


Figura 6.10: Disposição da via em função do fluxo.

Nestas simulações, o ônibus ocupa 10 células de 1,5m e tem velocidade máxima de 15 células por segundo, conforme sugerido por Knospe et al. [38] e Liu e Niu [59]. Na distribuição dos veículos, os ônibus representam 10% dos veículos conforme mostrado em

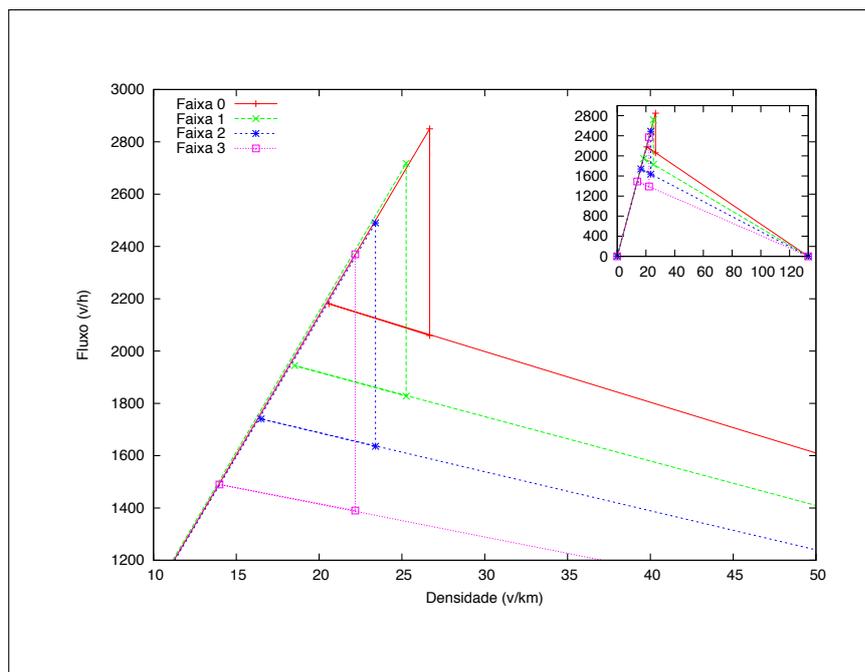


Figura 6.11: Diagrama fluxo-densidade das quatro faixas.

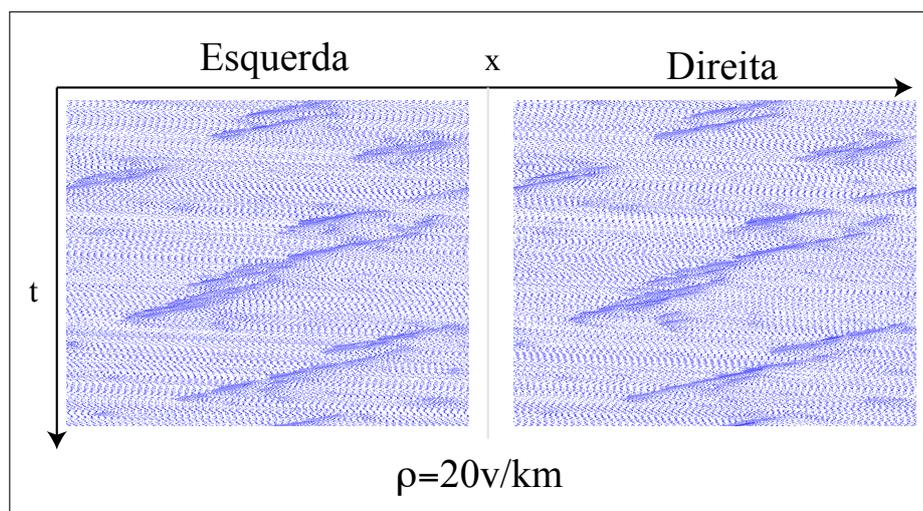


Figura 6.12: Diagrama espaço tempo das quatro faixas.

Knospe et al. [38]. Além disso, para investigar a influência de veículos maiores e mais lentos, propõe-se aumentar o percentual de ônibus. Portanto, duas simulações que são realizadas, onde a primeira tem 10% dos veículos sendo do tipo ônibus, e na segunda este percentual sobre para 40%.

A Figura 6.13 apresenta o diagrama-fluxo densidade para as faixas da esquerda e direita com 10 e 40% de veículos do tipo ônibus. Nota-se que com o aumento do percentual de ônibus, há uma queda na velocidade do fluxo livre.

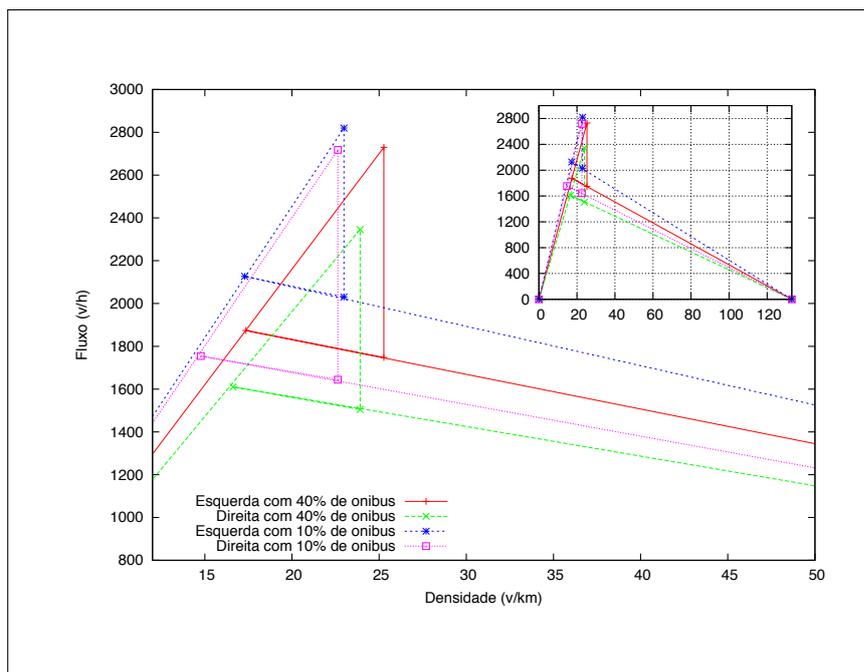
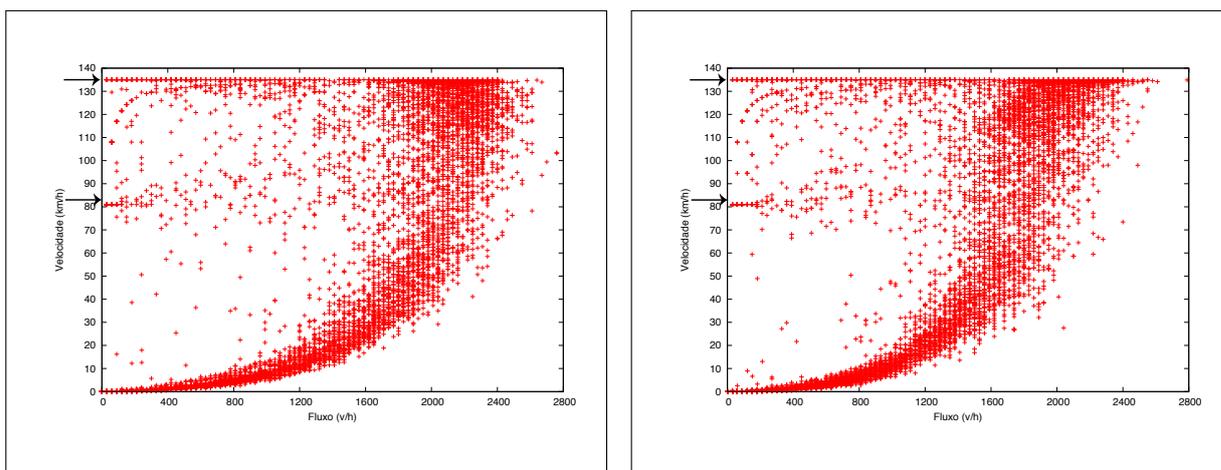


Figura 6.13: Diagrama fluxo-densidade com 10% e 40%.

Observando os digramas velocidade-fluxo apresentados pelas Figuras 6.14 e 6.15, nota-se duas faixas bem definidas de velocidade no fluxo livre, uma referente a média de velocidade dos carros e está próxima da máxima da via 135km/h (25/c), e uma segunda faixa que refere-se a média de velocidade dos ônibus no fluxo livre, que é de 81km/h (15c/s). Esta segunda faixa é mais evidente, como esperado, quando aumenta-se o número de ônibus na via (Figura 6.15).



(a) Faixa da esquerda.

(b) Faixa da direita.

Figura 6.14: Diagrama velocidade-fluxo com 10% de ônibus.

Em síntese, nas duas simulações, a faixa da esquerda apresenta um fluxo melhor, pois além de manter o fluxo livre com um valor maior, a densidade é também maior.

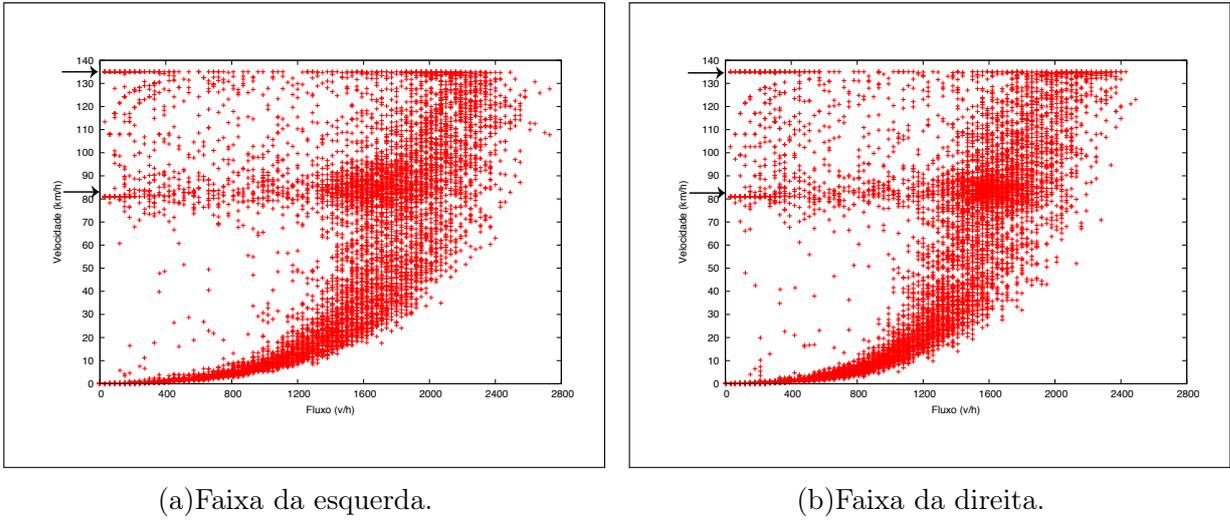


Figura 6.15: Diagrama velocidade-fluxo com 40% de ônibus.

iii) Este estudo de caso tem por objetivo analisar o impacto de uma faixa interditada em uma via com duas faixas. Ademais, é possível minimizar o congestionamento, que é formado pela faixa interditada, com duas ações: a primeira refere-se à distância que a sinalização deve estar para motivar o motorista a mudar de faixa, e este deve ser motivado imediatamente após ser informado pela sinalização, observando as regras de segurança.

Para motivar um veículo a mudar de faixa, em razão de uma interdição, é necessário que o motorista fique motivado a mudar de faixa independentemente das regras de motivação existentes. O motorista deve mudar de faixa de forma a minimizar o impacto da interdição da faixa, que pode acontecer em qualquer uma das faixas. Neste sentido, a regra de motivação de mudança por interdição da faixa deve estar acoplada as regras já definidas, de forma que uma não interfira na outra, pois acabaria por motivar a mudança pela razão errada. Em outras palavras, a motivação de mudança da faixa interditada não pode afetar a motivação da mudança por ultrapassagem, ou por um veículo estar movimentando-se mais lento que os demais veículos da mesma faixa.

Portanto, as Equações 6.1 e 6.2 devem ser reescritas de forma a acoplar a expressão $(d_{i,j} \leq d_{sin})$ às regras existentes. A variável $d_{i,j}$ representa a distância entre o veículo i e o obstáculo, que interdita a faixa; d_{sin} indica a distância de sinalização para o bloqueio da faixa. Logo, as regras de motivação são reescritas na forma:

- Regra de motivação da direita para esquerda:

$$\left((h_i \times v_{i,j} > d_{is,j}) \text{ e } (v_{i,j} > d_{is,j-1}) \right) \text{ ou } (d_{i,j} \leq d_{sin}) \quad (6.6)$$

- Regra de motivação da esquerda para direita:

$$(d_{i,j} > h_a \times v_{i,j}) \text{ ou } (d_{i,j} \leq d_{sin}) \quad (6.7)$$

Assim, através dessa estratégia, independente da regra de motivação, estando o veículo dentro da faixa de sinalização, este vai tornar-se motivado a sair da faixa. Além disso, deve-se garantir que os motoristas, que estão movimentam-se na faixa livre, não fiquem motivados a mudar para a faixa interdita, e o motorista da faixa interdita deve mudar de faixa assim que for possível. Desde modo, os veículos, que estão na faixa interdita, têm a probabilidade $p_{muda} = 1$. Os veículos, que estão na outra faixa, têm a probabilidade $p_{muda} = 0$. Por fim, ao passarem pelo ponto de interdição, os veículos voltam a ter a probabilidade $p_{muda} = 0,5$, conforme ilustra a Figura 6.16.

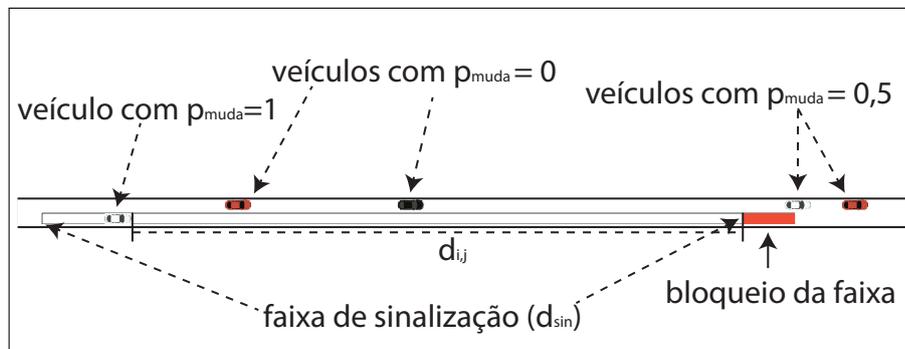


Figura 6.16: Esquema da faixa da direita interdita.

Para as simulações deste estudo de caso, a configuração é de uma via com 1.500 células de $1,5m$ ($2.250km$) com duas faixas, o tempo simulado é de 1 hora (3.600 segundos). A densidade simulada é de ($\rho = 11$ veículos/km), sendo uma densidade baixa e que apresenta fluxo livre em vias sem bloqueios. Adota-se condições de contorno periódicas (pista fechada). A velocidade máxima da via é de $20c/s$ ($108km/h$). Por fim, a distância de sinalização (d_{sin}) é testada para valores de 1, 67, 134 e 200 células representando as distâncias de 1, 5, 100, 5, 201 e 300 metros de comprimento. O ponto de interdição ocupa 10 células está posicionada no meio do domínio na faixa da direita.

A Figura 6.17 apresenta o resultado e como esperado, à medida que a sinalização fica mais distante do ponto bloqueado da via, menor é o congestionamento que forma-se na faixa interdita. Nota-se que a via apresenta um estado similar para $d_{sin} = 1$ e $d_{sin} = 67$. Contudo, para $d_{sin} = 134$ e $d_{sin} = 300$, a faixa interdita (direita) apresenta um congestionamento menor, sendo ainda menor para $d_{sin} = 300$. Por outro lado, note-se também um pequeno aumento do comprimento dos congestionamento na faixa da

esquerda, como esperado, pois a capacidade da via, na seção interdita, é reduzida para a metade.

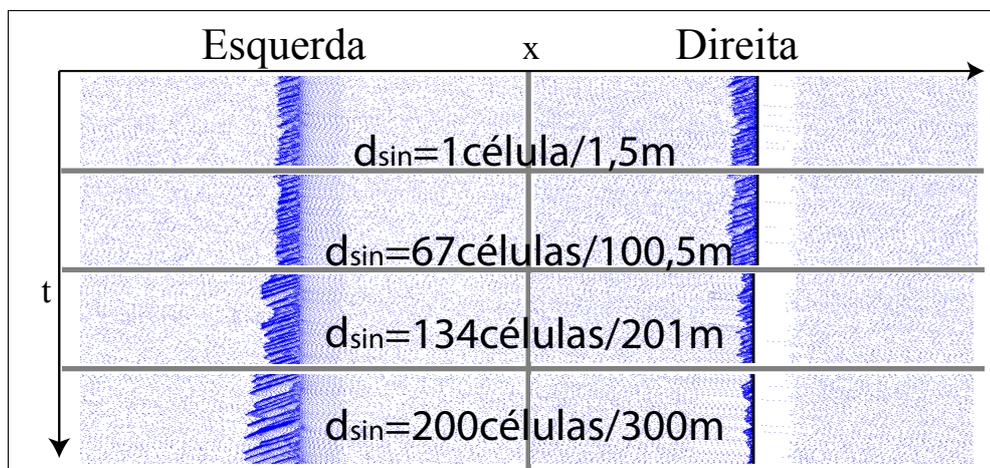


Figura 6.17: Faixa interdita com ($\rho = 11$ veículos/km) e ($V_{max} = 108\text{km/h}$).

6.4 Conclusão

Embora as vias com uma faixa sejam empregadas para validar as regras de TAC, quando se deseja fazer uma simulação do tráfego em uma via com mais de uma faixa, deve-se representar as regras para mudança de faixas e observar o comportamento do modelo tendo em vista outras características que devem ser observadas nessas vias, para que o modelo reproduza, de forma realista, o fenômeno que se quer representar.

De forma geral as regras de mudança de faixas (motivação e segurança) propostas na literatura, não utilizam nenhuma aleatoriedade no comportamento do motorista. Somente para calibração do modelo, em relação ao efeito *ping-pong*, é que se considera a probabilidade de não haver troca da faixa, mesmo as regras de motivação e segurança, tendo sido verificadas. No modelo T-UFF adota-se a mesma distribuição de probabilidades utilizada na política de antecipação, para definir a aleatoriedade no comportamento do motorista. Isso significa que um veículo pode realizar várias ultrapassagens, de diferentes formas, embora com a mesma tendência, ou seja, com uma flutuação no comportamento do motorista. Além disso, as regras de motivação foram alteradas para melhor representar o comportamento de um motorista em uma via.

As três fases do fluxo foram representadas de forma coerente, incluindo a inversão do uso da faixa, também reproduzida, variando os seus resultados de acordo com as diferentes curvas obtidas pelas diferentes configurações da FDP *Beta* e o efeito *ping-pong* foi prevenido utilizando probabilidades recomendadas da literatura sobre o tema.

Capítulo 7

O Comportamento do Motorista e o Modelo T-UFF

Através da definição de regras que descrevem a interação local entre veículos, os modelos de AC aplicados ao tráfego veicular, conseguem simular a dinâmica do tráfego aplicando essas regras a todos os veículos. Com isso, conseguem reproduzir o comportamento global de uma via. No entanto, os modelos de AC descritos na literatura definem um comportamento médio da via, não sendo capazes de representar características específicas de comportamentos ou de combinações destes.

Em relação a diferentes comportamentos de motoristas, Fancher et al. [66] realizaram um trabalho de relevância no campo de sistemas de navegação automática de veículos, que trata dessa questão. Esse é um relatório técnico, resultante de um acordo de cooperação entre a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) e a *University of Michigan Transportation Research Institute* (UMTRI), relativo a um teste operacional de campo para fornecer subsídios para um sistema de controle de cruzeiro inteligente - *Intelligent Cruise Control* (ICC). Este trabalho fornece significativas contribuições no desenvolvimento de um sistema conhecido como controle adaptativo de cruzeiro (*Adaptive Cruise Control* - ACC). O ACC é um sistema de condução automática do veículo, com o objetivo de fornecer ao usuário, o motorista, mais conforto e segurança e é citado por vários outros trabalhos que tratam desse tema [67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75].

A principal característica do ACC é a possibilidade do motorista escolher o comportamento que o sistema vai assumir na condução do veículo. A necessidade de implementar diferentes comportamentos reside no fato de que os motoristas tinham a tendência de desativar o sistema de navegação automática, pois não sentiam-se confortáveis com comportamento (padrão) de direção normalmente disponibilizado. Portanto, com o objetivo

de evitar o desligamento do sistema e torná-lo mais eficiente, foi proposto o ACC para que fosse capaz de conduzir o veículo de acordo com o comportamento de direção do motorista. Para isso, foi preciso identificar comportamentos de diferentes motoristas, que foram definidos por Fancher et al. [76] considerando a tendência do motorista analisado de andar devagar ou rápido, e de andar próximo ou distante do veículo que está à sua frente.

Tendo em vista as variáveis utilizadas por Fancher et al. [66] para fazer essa classificação (distância e velocidade) e as variáveis que são utilizadas no modelo T-UFF para simular a antecipação (distância e velocidade) propõe-se neste trabalho, ajustes na curvas definidas pela FDP Beta para que o modelo T-UFF possa captar, qualitativamente, as principais características identificadas no trabalho citado. Assim, a Seção 7.1 apresenta como Fancher et al. [66] identifica os diferentes comportamentos dos motoristas analisados. Em seguida, a Seção 7.2 propõe uma adaptação na metodologia proposta por Fancher et al. [66] para simular, qualitativamente, os diferentes perfis de motoristas e esses comportamentos adaptados, definidos através de parâmetros da FDP *Beta*, são utilizados no Modelo T-UFF. Finalmente, a conclusão do Capítulo é apresentada na Seção 7.4.

7.1 Identificação e Classificação dos Comportamentos

Descreve-se, a seguir, os diferentes tipos de comportamentos de motoristas especificados em Fancher et al. [66] e a metodologia usada para classifica-los, uma vez que os conceitos descritos neste trabalho são adaptados ao modelo T-UFF. A metodologia para classificação de comportamentos consistiu na realização de testes de campo, com uma frota de dez veículos, da marca *Chrysler*, que foram modificados para incorporar um sistema responsável por monitorar a direção do motorista. Estes veículos foram distribuídos entre 108 motoristas selecionados aleatoriamente, de forma que 84 deles foram monitorados por duas semanas e 24 motoristas, por cinco semanas. Aproximadamente 79.011 milhas foram registradas pelo sistema de monitoramento dos motoristas, representado um total de 8.728 trajetos individuais monitorados. Durante todos os percursos, o sistema de monitoramento do motorista registrou tanto as distâncias entre o veículo monitorado e o veículo à sua frente quanto suas velocidades.

Para classificar, este estudo considerou-se apenas quando o motorista dirigiu o veículo em vias com velocidade superior a 55mph ou 88,51km/h. O comportamento foi definido pela proporção do tempo que cada motorista dirigiu seu veículo fora dos quatro limites (A ,

B , C e D) determinados no diagrama distância versus velocidade da Figura 7.1. Como pode ser observado na Figura 7.1, ambos os eixos foram divididos pela velocidade V de referencia.

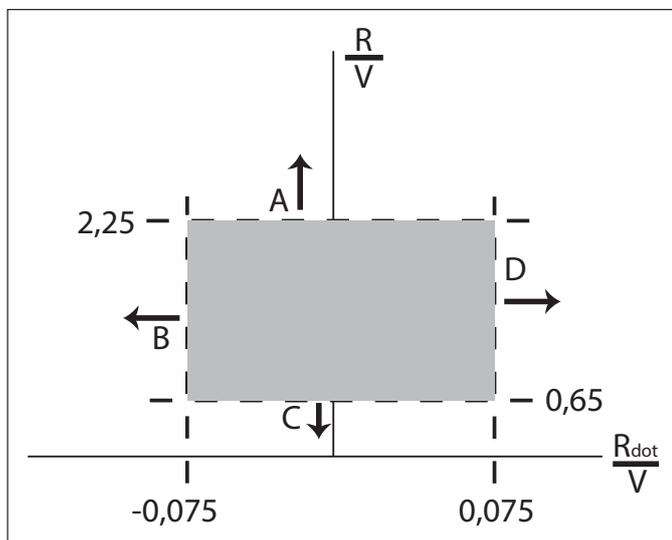


Figura 7.1: Diagrama alcance-versus-taxa-alcance *range-versus-range-rate*.

O comportamento do veículo i é obtido através do registro das variáveis distância e velocidade durante o tempo de viagem. Considerando a interação do veículo i com o veículo à sua frente $i + 1$, estas variáveis são obtidas por:

$$R = x_{i+1} - x_i \quad (7.1)$$

$$R_{dot} = \frac{dR}{dt} = v_{i+1} - v_i \quad (7.2)$$

onde a variável x_i indica a posição do veículo i .

Portanto, quando $\frac{v_{i+1}-v_i}{V} < -0,075$ classifica-se o motorista como rápido, pois o veículo analisado está andando mais veloz que o veículo à sua frente, ao passo que o contrário, veículo lento, é dado por $\frac{v_{i+1}-v_i}{V} > 0,075$. De forma semelhante, a classificação de longe e perto é dada pelas relações $\frac{x_{i+1}-x_i}{V} > 2,25$ e $\frac{x_{i+1}-x_i}{V} < 0,65$, respectivamente.

Para fazer essas medições foi feita uma adaptação no veículo para registrar a variação de velocidades $(v_{i+1} - v_i)$ e de distâncias $(x_{i+1} - x_i)$ entre dois veículos a cada segundo, e foram contabilizadas quantas vezes o motorista estava em cada uma das faixas descritas. Assim, dada a frequência que um motorista manteve-se em um dos quatro limites (A , B , C e D) do diagrama distância versus velocidade, é construído um gráfico que representa

a classificação do comportamento do motorista, ilustrado na Figura 7.2, que relaciona as distâncias (eixo das ordenadas) com a velocidade (eixo das abcissas) na forma de frequência. x

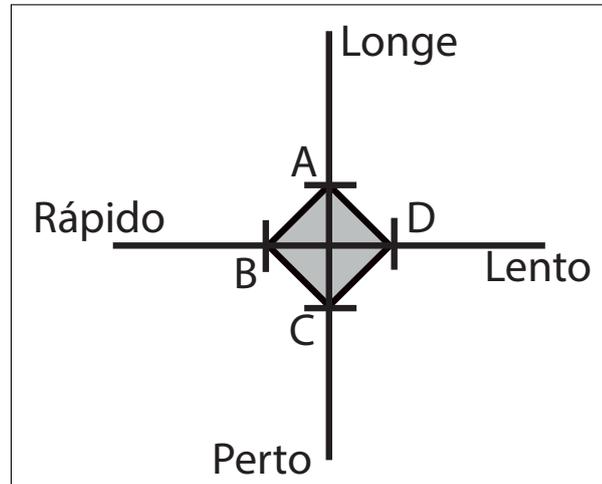


Figura 7.2: Modelo para classificação do comportamento do motorista.

Para configurar os comportamentos no modelo T-UFF houve a necessidade de empregar modificações no valor da variável relativa à velocidade de referência, em razão de não conseguir reproduzir os cenários utilizados no trabalho de Fancher et al. [66]. Portanto, em vez de utilizar a velocidade de referência $V = 88,51\text{km/h}$, optou-se por usar a velocidade máxima da via e o veículo à frente tinha o comportamento médio da via (FDP $Beta(a = 4, b = 8)$). Além disso, como posteriormente discutido, apenas dois veículos foram considerados. Assim, as regras para configurar a FDP $Beta$ para reproduzir o comportamento desejado são:

- **Perto** : $\frac{x_{i+1}-x_i}{v_{max}} < 0,65$;
- **Longe** : $\frac{x_{i+1}-x_i}{v_{max}} > 2,25$;
- **Rápido**: $\frac{v_{i+1}-v_i}{v_{max}} < -0,075$ e
- **Lento** : $\frac{v_{i+1}-v_i}{v_{max}} > 0,075$.

Dependendo do momento, um motorista pode estar em uma faixa ou outra. Ele pode, por exemplo, em um momento andar longe e em um outro momento, perto. No entanto, a definição do perfil será dado pelo comportamento preponderante, ou seja, aquele obtido com maior frequência.

7.1.1 Tipos de Comportamentos

Baseado nos diagramas distância versus velocidade e nos dados armazenados durante a direção dos 108 motoristas analisados, cinco diferentes tipos de comportamentos foram identificados por Fancher et al. [66]:

- *Hunter e Tailgater*: descreve o comportamento de um motorista que deseja andar perto do veículo à frente e rápido, que é aqui chamado de motorista *ousado*;
- *Ultraconservative*: é o motorista com o perfil oposto ao anterior, ele procura andar distante e devagar, chamado motorista *conservador*;
- *Planner*: é o comportamento do motorista que gosta de andar distante, embora, sempre que possível, rápido. É o motorista *estrategista*;
- *Extremist*: este perfil descreve o motorista que é classificado em mais de um dos comportamentos anteriores, ou seja, às vezes procura andar rápido e perto, outras vezes lento e distante e ainda, em outros momentos, rápido mas mantendo distância. Chamou-se esse motorista de *Extremista*; e
- *Flow Conformist*: define o motorista que procura andar conforme o fluxo, e não é caracterizado por nenhum dos perfis anteriores. Este é o motorista *padrão*.

Segundo o trabalho de Fancher et al. [66] esses comportamentos são distribuídos da seguinte forma: *Flow Conformist* representa 27% da amostra; 23% corresponde aos motoristas com perfil *Hunter/Tailgater*; os perfis *Planner* e *Ultraconservative* constituem 18% cada um; e o comportamento *Extremist* compõe os 14% restantes da amostra. O trabalho de Fancher et al. [66] também é utilizado como base para outros trabalhos como em Nishiwaki, Y. et al. [77] e Rosenfeld et al. [78], que adota apenas três destes cinco comportamentos: *Hunter/Tailgater*, *Ultraconservative* e *Flow Conformist* para desenvolvimento de um ACC.

7.2 Modelo T-UFF e o Comportamento do Motorista

Como apresentado no Capítulo 5, o modelo T-UFF proposto neste trabalho, considera uma determinada FDP para ajustar distância e velocidades de todos os veículos. Na política de antecipação, o comportamento do motorista é configurado utilizando a FDP

Beta para que mantenha-se perto ou longe. Da mesma forma a etapa de ajuste de velocidade pode determinar se um veículo vai acelerar predominantemente de forma rápida ou lenta, dependendo dos parâmetros utilizados na FDP Beta. Dessa forma, adaptou-se a metodologia proposta no trabalho de Fancher et al. [66], a fim de definir os parâmetros necessários à configuração qualitativa dos comportamentos, para que possam ser utilizados no modelo T-UFF.

Assim, para reproduzir estas classificações, foram considerados apenas dois veículos: o primeiro é o veículo i , que é objeto da análise e terá seus parâmetros da FDP Beta definidos. O segundo, é veículo $i + 1$ que estará sempre à frente do primeiro. O veículo $i + 1$ utiliza os mesmos parâmetros dos testes do Capítulo 5, ou seja, $Beta(a = 4, b = 8)$. Adotou-se esta estratégia com a finalidade de que as curvas do primeiro veículo possam ser ajustadas de forma a reproduzir qualitativamente os cinco comportamentos, usando para fazer esse ajuste, uma curva que representa o comportamento médio da via.

Para configurar esses comportamentos utilizou-se a seguinte metodologia: foram realizadas 10 simulações e para cada simulação foi utilizada 1 hora (3.600 passos de tempo) em uma via fechada, de faixa única, com 15 quilômetros (10.000 células de 1,5m), e o veículo percorreu 90km, dando 6 voltas na pista. A via tem velocidade máxima de 135km/h (25 células por segundo) e o veículo $i + 1$ foi posicionado seis células à frente do veículo i , ou seja, os dois veículos estão próximos um do outro. Considerou-se a velocidade inicial máxima, isto é $v = 25$ c/s, para os dois veículos. Portanto, para obter os parâmetros da FDP Beta para definição dos comportamentos, obteve-se a média aritmética das 10 simulações, do número de instantes de tempo que o veículo manteve-se perto ou longe, rápido ou lento em relação ao veículo $i + 1$.

Vale ressaltar que para classificar um comportamento deve-se observar as regras do modelo T-UFF, ou seja, o veículo sempre vai acelerar, quando houver espaço para isto, até atingir a velocidade máxima da via e, eventualmente, mantendo-se na mesma velocidade, do instante de tempo anterior, quando não tem espaço para acelerar. O comportamento, que é definido pela política de antecipação, vai influenciar o motorista em relação ao quanto ele acelera em um instante de tempo, pois primeiro ele percebe a distância e em razão dela ajusta sua velocidade.

Para definir as faixas partiu-se dos seguintes princípios:

- **perto:** considera-se que um veículo está perto do veículo à sua frente quando o intervalo de tempo entre eles for menor que 0,65 segundos. Considerando a velo-

cidade máxima da via em 25 células por segundo (135km/h), tem-se que o veículo está perto quando encontra-se a menos de 21 células de distância do veículo à sua frente, ou seja, $x_{i+1} - x_i < \lfloor 0,65 \times v_{max} \rfloor$;

- **longe**: para definir que um veículo está distante do veículo à sua frente, considera-se que $\frac{x_{i+1}-x_i}{v_{max}} > 2$. No caso da velocidade máxima da via ser de 135km/h (25 células por segundo), é considerado que um veículo está longe, quando encontra-se a mais de 25 células de distância.
- **rápido** : um veículo é classificado como rápido quando: $\frac{v_{i+1}-v_i}{v_{max}} < -0,075$; e
- **lento** : um veículo é considerado lento quando: $\frac{v_{i+1}-v_i}{v_{max}} > 0,075$.

Na variável velocidade pode-se observar que foi mantida a mesma relação apresentada em Fancher et al. [66] para classificar um motorista como lento ou rápido. Portanto, considerando a velocidade máxima da via de 25 c/s, o modelo T-UFF classifica como lento o veículo que apresenta uma diferença de velocidade maior que 2 c/s do veículo à sua frente. De forma análoga, quando esta diferença for menor que -2 c/s, então o veículo é classificado como rápido.

Definidas as faixas para classificar o motorista (perto, longe, rápido e lento) verifica-se, a cada simulação, quantos instantes de tempo o veículo analisado manteve-se em cada uma das faixas.

7.2.1 Motorista *Ousado*

O comportamento do Motorista Ousado é definido por um motorista que deseja andar perto do veículo que está à frente e rápido. Dessa forma, os valores dos parâmetros estão definidos, tanto na etapa de percepção da distância quanto da etapa de ajuste de velocidade, por uma FDP que tem a maioria de seus valores próximos à zero (0), como apresentado na Figura 7.3, como por exemplo, a FDP $Beta(a = 1, b = 6)$. Logo, na percepção da distância, como anteriormente já apresentado, valores de $\alpha \approx 0$ indicam que o veículo considerará, ao máximo, o movimento do veículo à frente (Equação 5.4).

Da mesma forma, na etapa de ajuste de velocidades, conforme mostra a Equação 5.8, os valores de $\alpha \approx 0$ fazem o veículo analisado acelerar o máximo definido por δv , que nestas simulações tem o valor quatro células ($\delta v = 4$).

Pode-se observar na Figura 7.4 que o resultado representa, qualitativamente, o comportamento desejado: uma predominância do veículo analisado movimentar-se rápido e

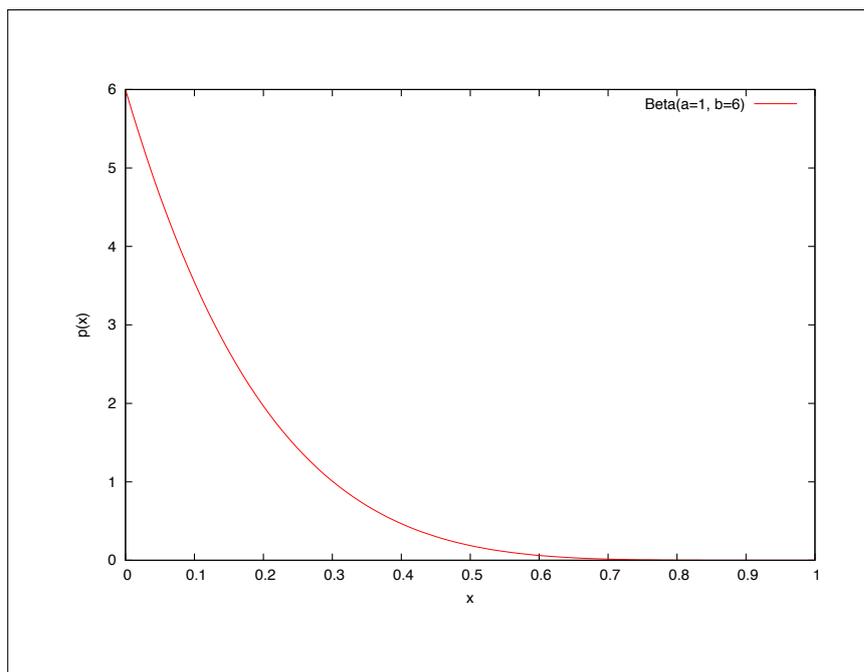


Figura 7.3: Curva do Comportamento do Motorista *Ousado*.

próximo ao outro veículo à sua frente.

Para validar esse comportamento apresenta-se na Figura 7.5 os diagramas fluxo-densidade e velocidade-densidade. Nota-se na Figura 7.5(a), diagrama fluxo-densidade, que a via apresenta fluxo livre alto, onde $0 < J < 2.520$ veículos/hora, conforme ilustrado pela Figura 7.5(a). Este fato ocorre porque os veículos mantêm-se próximos dos que estão à sua frente e, conseqüentemente, a velocidade média da via mantêm-se próxima da máxima permitida até a densidade de aproximadamente 0,16 de ocupação da via ($\rho \approx 21$ veículos/km) (Equação 2.13), conforme ilustra a Figura 7.5(b).

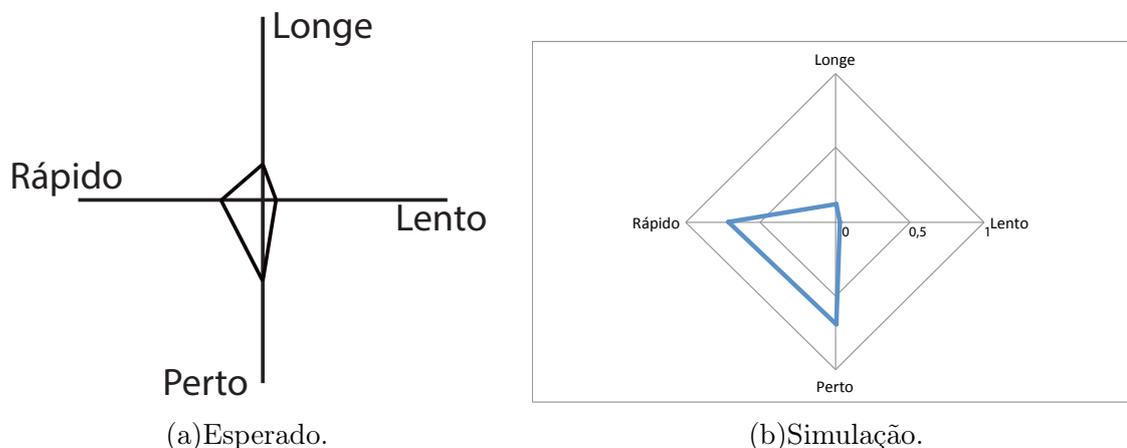
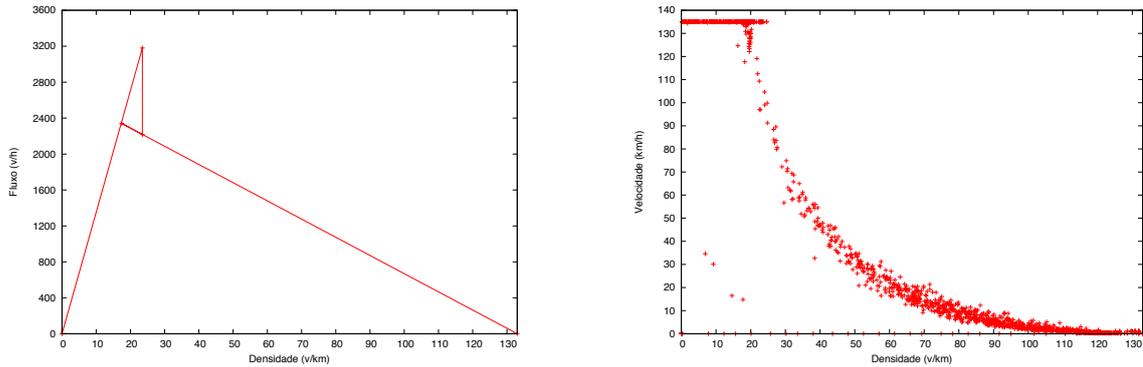


Figura 7.4: Diagrama distância versus velocidade do Motorista *Ousado*.



(a) Diagrama fluxo-densidade.

(b) Diagrama velocidade-densidade.

Figura 7.5: Fluxo, densidade e velocidade média do Motorista *Ousado*.

7.2.2 Motorista *Conservador*

O Motorista *Conservador* é definido como o motorista que deseja andar longe do veículo que está à frente e acelera mais lentamente que este. Neste sentido, as curvas podem ser ilustradas pela Figura 7.6 e definidas pela FDP Beta com parâmetros: $a = 15$ e $b = 1$ para a etapa de percepção da distância, onde a maioria dos valores escolhidos para α está próxima a 1 e, portanto, os veículos com este comportamento vão considerar menos que o veículo à frente irá movimentar-se no tempo atual, mantendo-se distantes uns dos outros.

Na outra etapa, a de ajuste de velocidade, os parâmetros aplicados para a FDP Beta são: $a = 6$ e $b = 6$. Neste caso, a maioria dos valores definidos para α estão próximos à 0,5, o que determina uma taxa de aceleração em torno de $2c/s^2$, metade do valor máximo (δv). Ainda na etapa de ajuste de velocidade, após perceber a distância, o motorista *Conservador*, mesmo tendo uma taxa de aceleração em torno de $2c/s^2$, tem uma tendência de manter-se na mesma velocidade, visto que d_s irá receber aproximadamente seu valor máximo (12), quando os valores de $\alpha \approx 1$ na etapa de percepção da distância, conforme Equações 5.5, 5.7 e 5.8. Portanto, este motorista só vai aumentar sua velocidade quando estiver a mais de 12 segundos de distância do veículo à sua frente, acelerando sempre a uma taxa menor ($2c/s^2$) em relação ao Motorista *Ousado*. Desta forma, nota-se na Figura 7.7(b) que o resultado expressa, qualitativamente, o desejado: um motorista que anda mais lento e que anda longe do veículo à sua frente.

A Figura 7.8(a) mostra o diagrama fluxo-densidade da simulação e observa-se que a relação fluxo-densidade é baixa em relação a um comportamento médio global, conside-

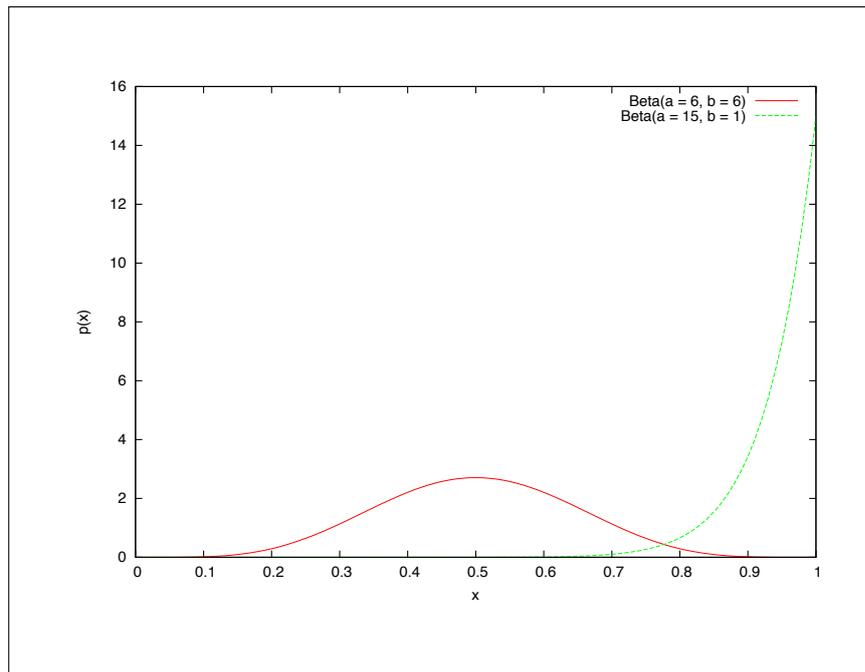


Figura 7.6: Curva do Motorista Conservador.

rando que todos os motoristas da via são motoristas *Conservadores*. Deste modo, esta característica do motorista em manter-se distante do veículo à sua frente, acaba por aumentar o espaço entre os veículos e, assim sendo, o fluxo congestiona em uma densidade menor (Equação 2.13). Neste caso, o fluxo mantém-se livre até uma taxa de ocupação da via de $\rho \leq 0,10$ ($\rho \approx 13$ veículos/km). A partir desta densidade a média de velocidade começa a cair, como mostrado pela Figura 7.8(b).

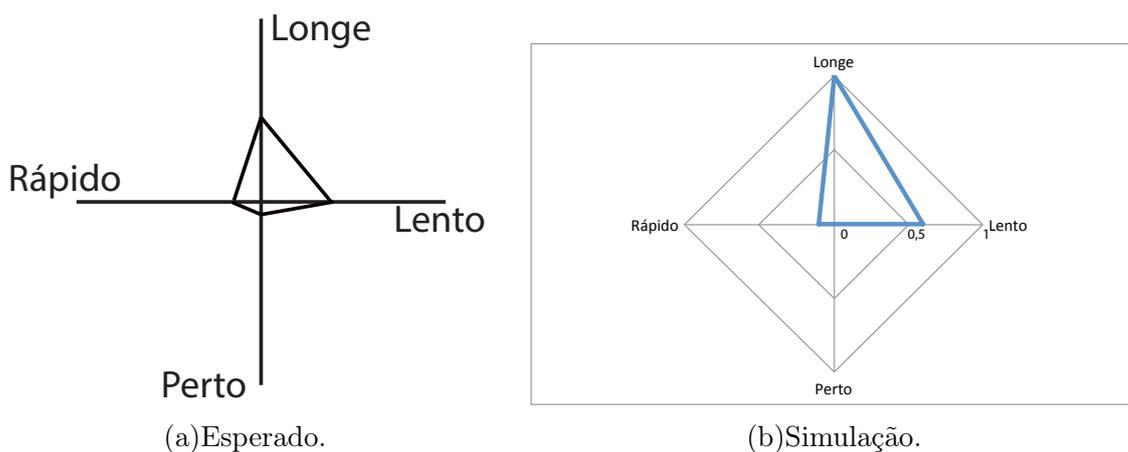
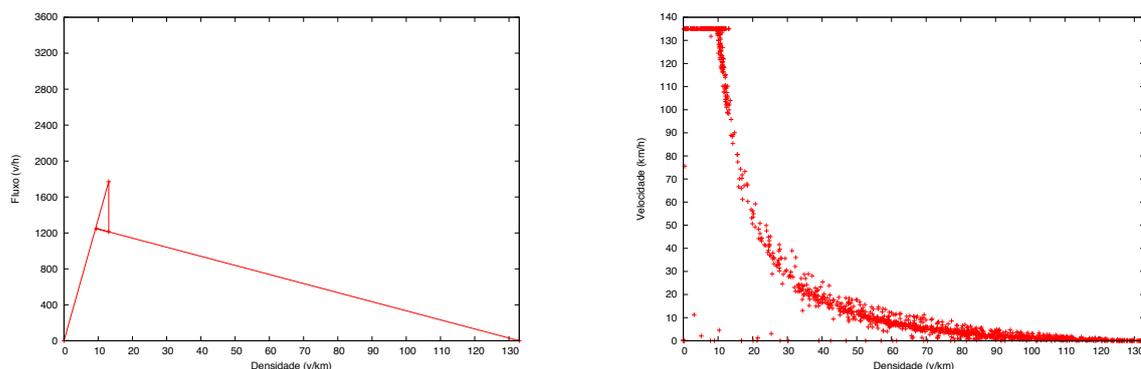


Figura 7.7: Diagrama distância versus velocidade do Motorista *Conservador*.



(a) Diagrama fluxo-densidade.

(b) Diagrama velocidade-densidade.

Figura 7.8: Fluxo, densidade e velocidade média do Motorista *Conservador*.

7.2.3 Motorista *Estrategista*

O Motorista *Estrategista* almeja andar rápido, porém, pretende manter-se distante do veículo à sua frente, sempre que possível. Para isto, os parâmetros usados na etapa de percepção da distância são $Beta(a = 15, b = 1)$, de forma que os valores sorteados para α estejam mais próximos de 1 e, conseqüentemente, este motorista vai considerar menos que o veículo à sua frente irá acelerar no instante de tempo atual.

Na etapa de ajuste da velocidade, foi utilizada um FDP $Beta$ com os parâmetros $a = 1, b = 15$, que conduzem a valores de α mais próximos de 0 e neste caso, o motorista vai acelerar o máximo que pode ($\delta v = 4$), quando estiver distante o suficiente do veículo à sua frente.

A distância de segurança (d_s) vai ter valores próximos ao seu máximo (12), fazendo com que o veículo mantenha sua velocidade, no instante de tempo atual, quando estiver a menos de 12 segundos do veículo à sua frente, de forma semelhante ao que acontece no comportamento do motorista *Conservador*. A Figura 7.9 apresenta as curvas da FDP $Beta$ utilizadas na política de antecipação. O resultado do teste para definir os parâmetros da política de antecipação é ilustrado na Figura 7.10(b), conseguindo reproduzir o comportamento predominante desejado.

O diagrama fundamental (Figura 7.11(b)) mostra que este comportamento apresenta um fluxo livre até $J \leq 0,50$ ($J = 1880$ veículos/hora) e a região de meta-estabilidade bem definida. Dentre os perfis analisados e configurados, este apresenta a maior região de meta-estabilidade. Este fato acontece devido ao desejo do motorista de andar distante e ao mesmo tempo rápido em relação ao veículo à sua frente. Dessa forma, enquanto a

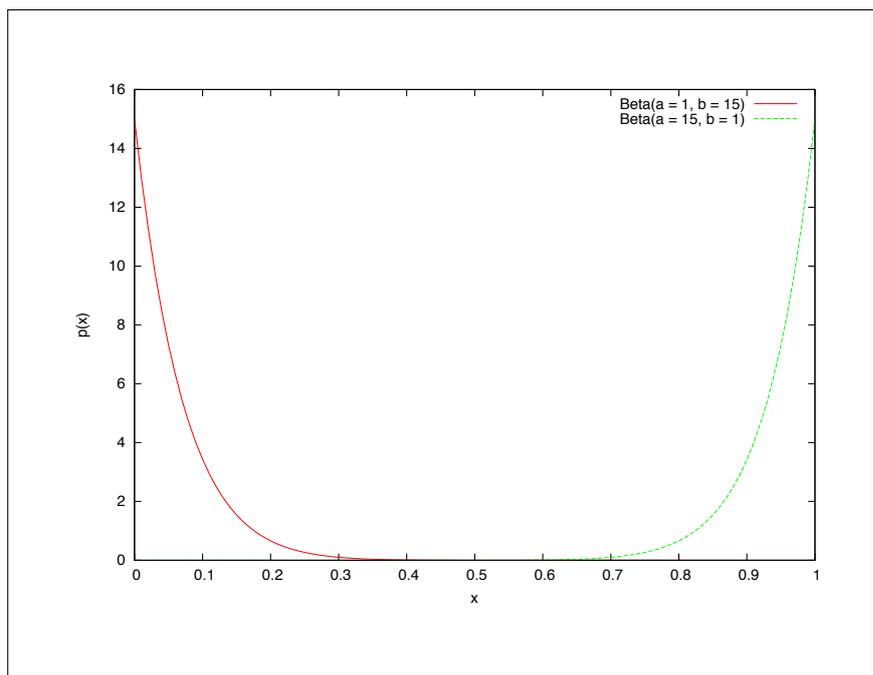


Figura 7.9: Curva do Motorista Estrategista.

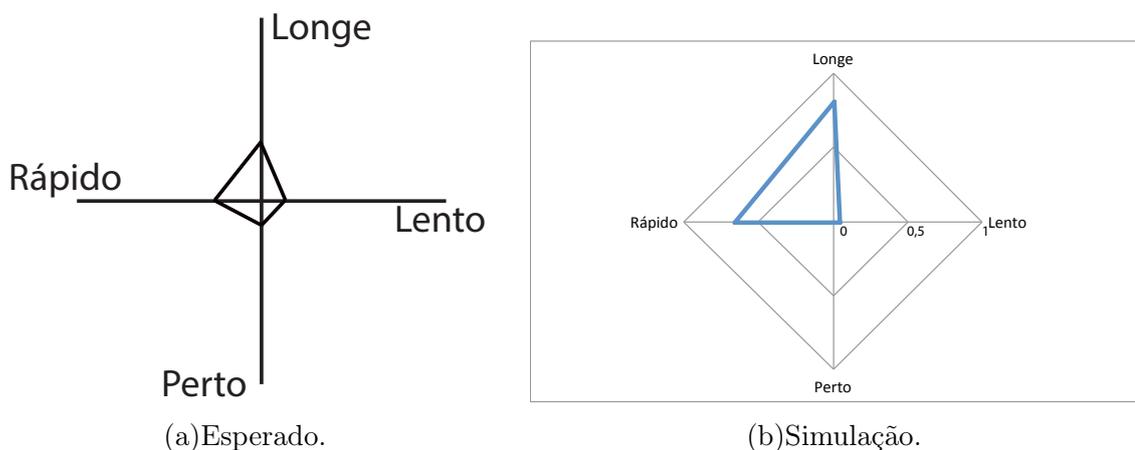
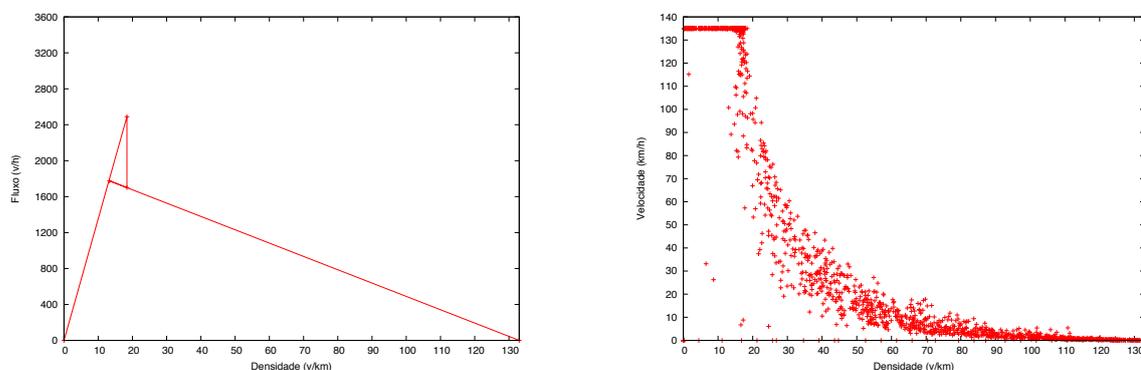


Figura 7.10: Diagrama distância versus velocidade do Motorista *Estrategista*.

grande distância entre os veículos é garantida, qualquer flutuação de velocidade do veículo à frente não afeta rapidamente a direção do veículo atrás. Quando entrarem mais veículos no sistema, a distância definida no perfil não é mais garantida e quando um veículo i para por causa do veículo à sua frente, $i + 1$, o mesmo veículo i , tem uma inércia maior para retomar sua velocidade, uma vez que vai esperar estar aproximadamente, 12 segundos de distância do veículo à sua frente para acelerar.

No diagrama velocidade-densidade apresentado na Figura 7.11(b), nota-se que o fluxo mantém-se livre para uma faixa de densidade $0 < \rho < 16$ veículos/km. Em seguida, a média de velocidade da via começa a cair em relação a velocidade máxima, a medida

que outros veículos entram no sistema. Da mesma forma que acontece com o Motorista *Conservador*, o Motorista *Estrategista* ao tentar manter-se distante do veículo à sua frente, acaba por aumentar o espaço entre os veículos (Equação 2.13).



(a) Diagrama fluxo-densidade.

(b) Diagrama velocidade-densidade.

Figura 7.11: Fluxo, densidade e velocidade média do Motorista *Estrategista*.

7.2.4 Motorista *Extremista* e Motorista *Padrão*

Neste caso houve maior dificuldade na representação destes perfis. A Figura 7.12 apresenta as características destes comportamentos definidos em Fancher et al. [66] e pode-se observar que não há predominância de uma característica específica mudando somente a frequência de ocorrência de cada valor. A Figura 7.13 apresenta resultados de simulações para o diagrama de distância versus velocidade resultado de dois conjuntos de funções *Beta*: *i*) com parâmetros $a = 12$ e $b = 5$, utilizada na etapa da percepção da distância, e $a = 5$ e $b = 12$, adotada na etapa de ajuste de velocidade (Figura 7.14), e *ii*) $a = 4$ e $b = 13$ utilizada tanto na etapa de percepção da distância quanto na etapa de ajuste de velocidade, apresentados na Figura 7.15.

As Figuras 7.16 e 7.17 apresentam os diagramas fluxo-densidade e velocidade-densidade para esses dois conjuntos de FDPs. Embora os gráficos distância versus velocidade não apresentem muita diferença, no primeiro conjunto de FDPs a relação máxima fluxo-densidade é mais baixa em relação ao comportamento do segundo conjunto. Este, que é o segundo caso, apresenta um resultado quantitativo semelhante ao encontrado pela literatura que trata dos modelos de TAC [8, 23, 27]. Desta forma, assume-se que este é o comportamento médio da via.

Embora no caso desses comportamentos o resultado qualitativo não conseguir apre-

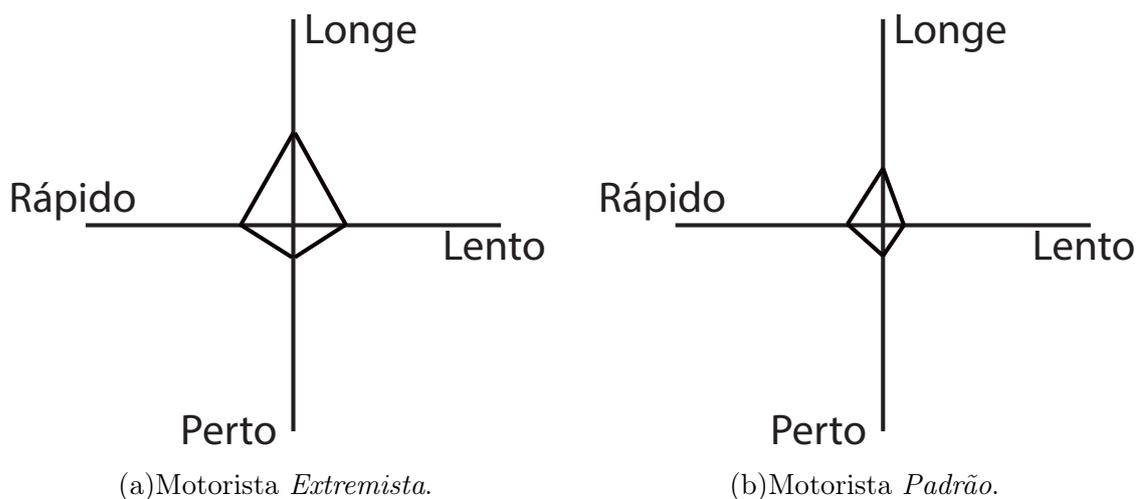


Figura 7.12: Diagrama distância versus velocidade esperado.

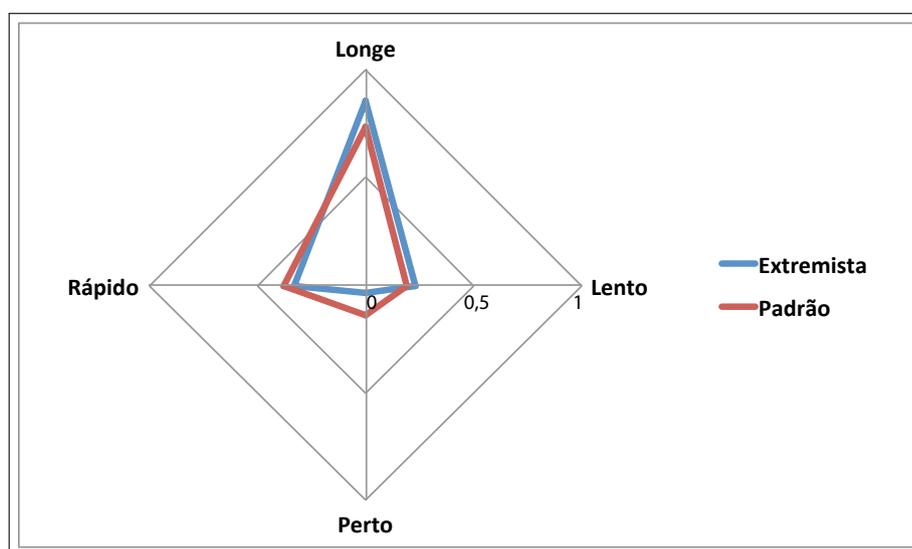


Figura 7.13: Diagrama distância versus velocidade do Motorista *Extremista* e Motorista *Padrão*.

sentar a mesma acurácia dos outros comportamentos definidos por Fancher (Motorista *Ousado*, Motoristas *Conservador* e *Estrategista*), ele colaborou na confirmação da definição do comportamento do Motorista *Padrão*, já utilizado em resultados anteriores.

7.3 Teste: Simulação com os comportamentos

Neste Capítulo são apresentados dois exemplos que simulam os comportamentos anteriormente descritos. O primeiro exemplo apresenta a evolução no tempo dos comportamentos do Motorista *Ousado*, *Conservador* e *Estrategista*, pois estes têm características melhor definidas. O segundo exemplo mostra uma simulação com a distribuição percen-

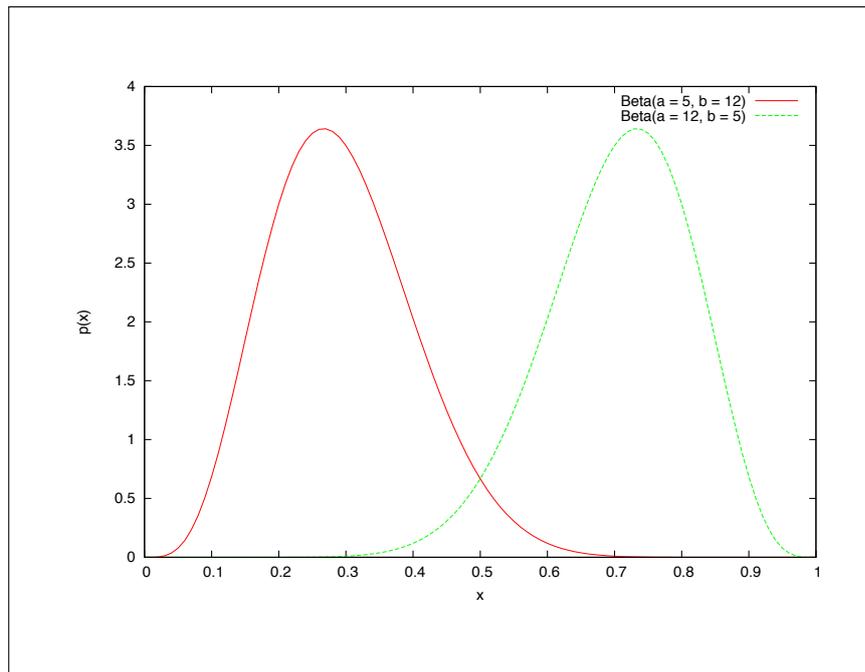
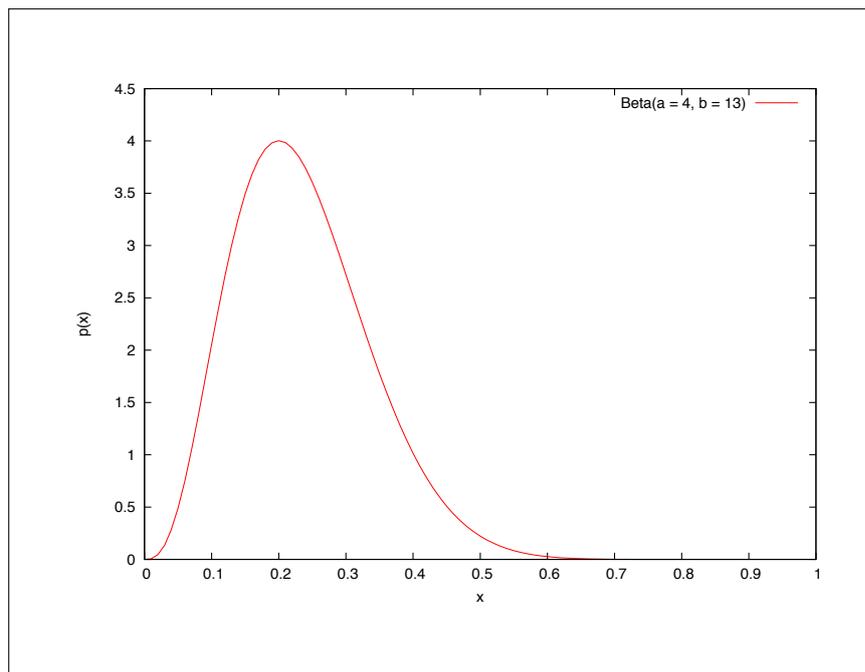
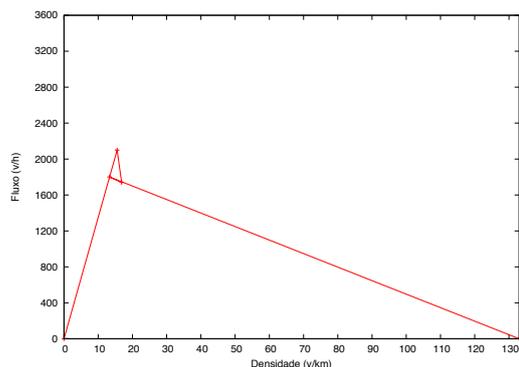


Figura 7.14: Curva do Motorista Extremista.

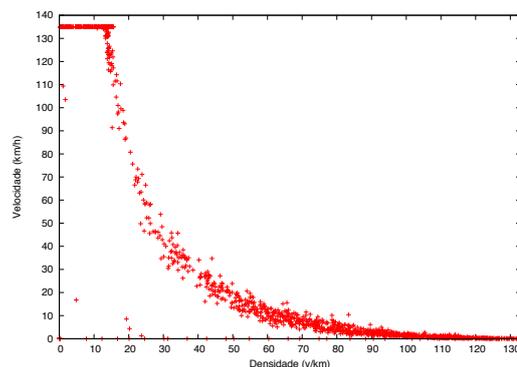
Figura 7.15: Curva do Motorista *Padrão*.

tual de comportamentos em uma via de duas faixas conforme apresentado no trabalho de Fancher et al. [66].

Exemplo 1: Para avaliar os diferentes comportamentos e verificar se as FDPs *Beta*, escolhidas, foram adequadas, apresentam-se nas Figuras 7.18 a 7.20 a evolução no tempo dos três comportamentos com características melhor definidas: *Ousado*, *Conservador* e

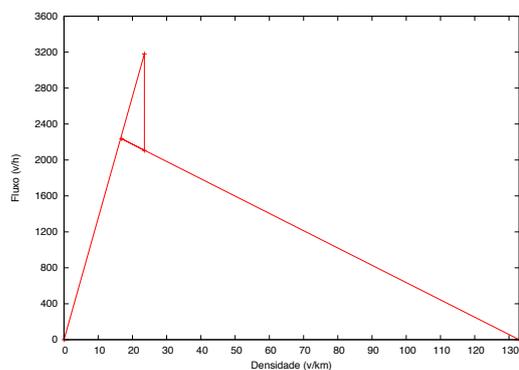


(a) Diagrama fluxo-densidade.

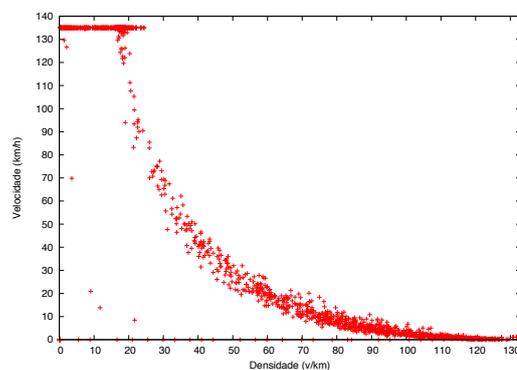


(b) Diagrama velocidade-densidade.

Figura 7.16: Motorista Extremista.



(a) Diagrama fluxo-densidade.



(b) Diagrama Velocidade-densidade.

Figura 7.17: Motorista Padrão.

Estrategista.

Todos partem da mesma condição inicial, onde os veículos estão uniformemente distribuídos na via com uma distância de 15 células entre eles. Os veículos têm a velocidade inicial igual a $15c/s$. As configurações do domínio são as mesmas apresentadas nos exemplos anteriores. Além disso, a seção da via observada tem comprimento de 1.500 células (2.250 quilômetros), para os tempos de $t = 0s$, $t = 5s$ e $t = 15s$.

Pode-se notar que cada um dos comportamentos, como esperado, apresenta uma distribuição dos veículos diferente. A Figura 7.18 mostra a evolução destes comportamentos para os instantes de tempo iniciais: $t = 5$, $t = 10$ e $t = 15$. Observa-se, como esperado, que cada comportamento apresenta um padrão conforme a configuração definida, isto é, os motoristas com o comportamento *Ousado* andam bem mais próximos que os demais e

estão mais adiantados. Os motoristas com comportamento *Conservador* aceleram mais lentamente e tendem a manterem-se distantes. O comportamento do motorista *Estrategista* mostra que os veículos movem-se a uma certa distância entre eles, porém, com uma velocidade maior que o comportamento *Conservador* e isto é observado nos instante $t = 30$ e $t = 60$ (Figuras 7.19 e 7.20), pois o primeiro veículo está mais à frente que o primeiro veículo do comportamento *Conservador*.

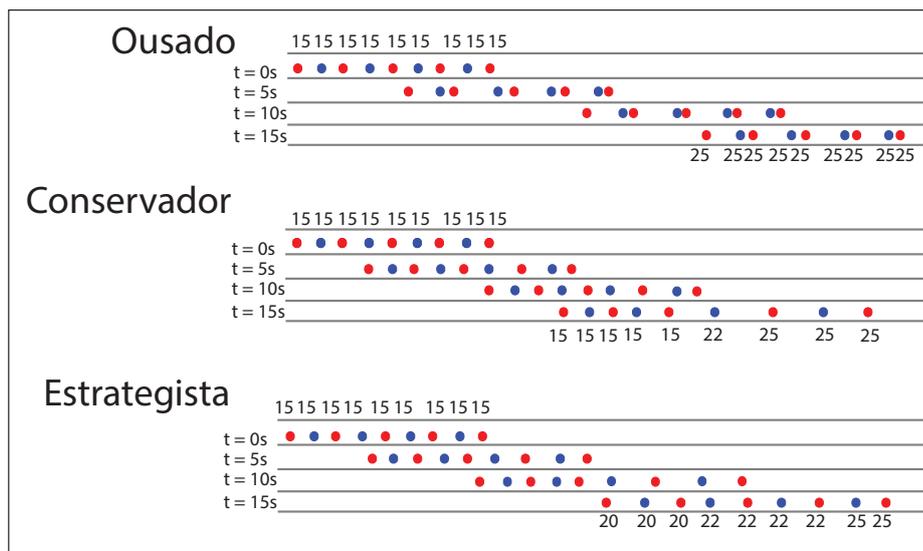
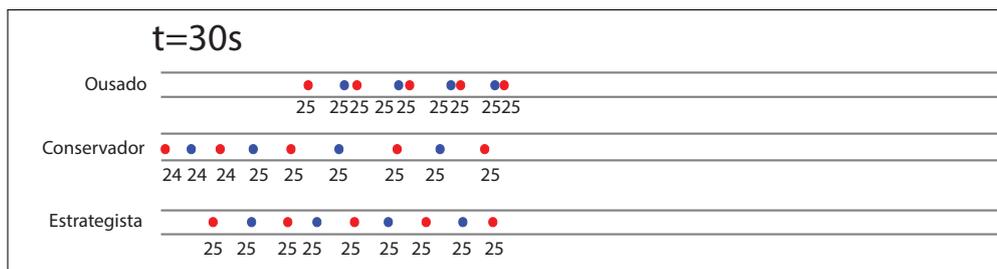
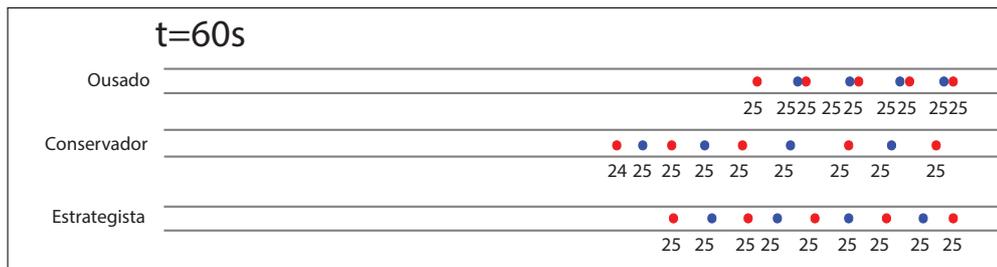


Figura 7.18: Espaço tempo de três comportamentos.

A medida que o tempo passa, todos os veículos atingem a velocidade máxima da via, considerada a mesma para os três comportamentos: Os motoristas com o comportamento *Ousado* tem uma tendência de andarem mais próximos e no tempo $t = 60s$, todos estão na velocidade máxima da via; o mesmo é observado para o comportamento *Estrategista*, porém, estes veículos estão mais distantes uns dos outros em relação do comportamento *Ousado*; finalmente, o comportamento conservador mostra que com $t = 60s$, nem todos os veículos alcançaram a velocidade máxima da via. Ademais, é possível observar que este veículos têm uma tendência de manterem-se mais distantes uns dos outros. Este exemplo mostra claramente que o modelo T-UFF, associado à FDP adequada, é capaz de simular diversos comportamentos.

Exemplo 2: Para o segundo exemplo, os motoristas estão distribuídos conforme a Tabela 7.1, que mostra o percentual que cd cada tipo de motorista ocupa na via e um resumo das configurações definidas para a FDP *Beta* nas etapa de percepção da distância (coluna **Distância**) e de ajuste da velocidade (coluna **Velocidade**).

O diagrama fluxo-densidade, ilustrado pela Figura 7.21, apresenta um resultado intermediário aos comportamentos dos quadro motoristas considerados. Ademais, as três fases

Figura 7.19: Espaço tempo de três comportamentos em $t = 30s$.Figura 7.20: Espaço tempo de três comportamentos em $t = 60s$.

do fluxo estão presentes nas duas vias e a faixa da esquerda apresenta um fluxo melhor que a faixa da direita, contudo, a faixa da direita apresenta uma região de meta-estabilidade maior.

A maior região de meta-estabilidade que surge na faixa da direita é caracterizada por veículos que movimentam-se, em média, mais próximos uns dos outros, em relação aos veículos da faixa da esquerda. Porém, estes veículos da faixa da direita, quando reduzem suas velocidades, gastam mais instantes de tempo para retornarem à velocidade em que estavam. Portanto, pode-se concluir que o fluxo da faixa da esquerda tem uma contribuição maior dos motoristas com o comportamento *Ousado*, *Estrategista* e *Padrão* em relação ao motorista *Conservador*, pois o fluxo é melhor em quase todas as densidades, exceto na região de meta-estabilidade. Na outra faixa, da direita, a maior contribuição é dada por motoristas com comportamento *Estrategista*, *Padrão* e *Conservador*, uma vez que o fluxo é maior que o fluxo da simulação do motorista com comportamento *Conservador* (Figura 7.8(a)) e porque sustenta um fluxo máximo maior que a faixa da esquerda na região de meta-estabilidade. Em resumo, os comportamentos *Estrategista*, *Padrão* e *Conservador*

Tabela 7.1: Distribuição e configuração dos comportamentos

Perfil	Distância	Velocidade	Percentual
Motorista <i>Estrategista</i>	$a = 15, b = 1$	$a = 1, b = 15$	18,00%
Motorista <i>Conservador</i>	$a = 15, b = 1$	$a = 6, b = 6$	18,00%
Motorista <i>Ousado</i>	$a = 1, b = 6$	$a = 1, b = 6$	23,00%
Motorista <i>Padrão</i>	$a = 4, b = 13$	$a = 4, b = 13$	41,00%

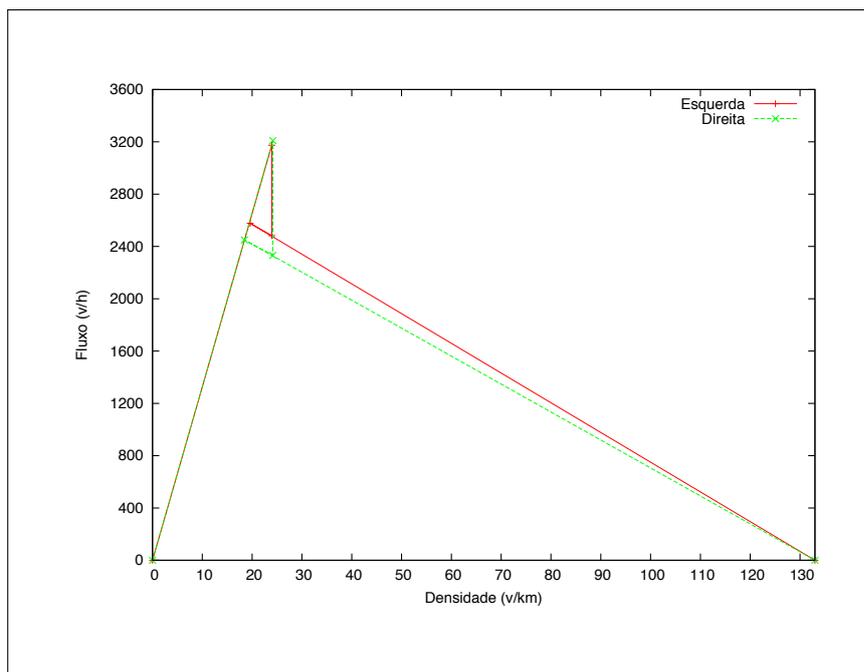


Figura 7.21: Diagrama fluxo-densidade dos quatro comportamentos.

acarreta um movimento médio dos veículos, na faixa da esquerda, mais próximo, quando a via tem velocidade média igual a da máxima.

A Figura 7.22 ilustra o diagrama espaço-tempo das duas faixas da via 20 minutos de simulação. Nota-se que como uma densidade $\rho = 16$ veículos/km há a formação de pequenos pontos de congestionamentos, que em seguida são rapidamente dissolvidos.

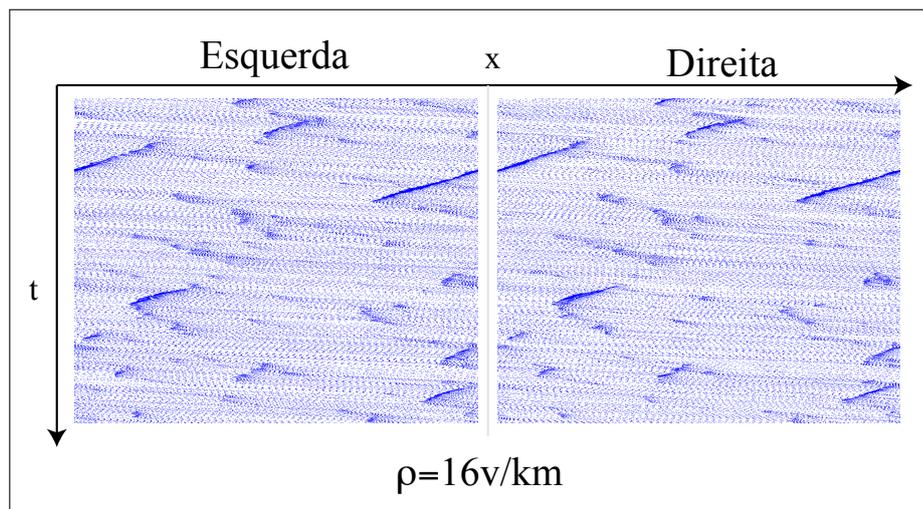


Figura 7.22: Diagrama espaço-tempo em duas faixas e com os quatro comportamentos.

7.4 Conclusão

De forma geral os modelos de TAC conseguem representar a dinâmica do tráfego viário para um comportamento médio de uma via, não conseguindo representar comportamentos específicos ou combinações desses comportamentos. Fancher et al. [66], em seu trabalho para o desenvolvimento de um sistema conhecido como controle adaptativo de cruzeiro (*Adaptive Cruise Control- ACC*), que é um sistema de condução automática do veículo, identifica cinco comportamentos de motoristas. Analisando o trabalho de Fancher, foi proposta uma estratégia para configurar estes comportamentos no modelo T-UFF através da utilização de diferentes FDP *Beta* utilizadas na política de antecipação, como descrito neste Capítulo. Esse perfis foram definidos e aplicados no modelo T-UFF. O modelo proposto foi capaz de representar, qualitativamente, os diferentes comportamentos de motoristas, particularmente aqueles que têm comportamentos com características predominantes bem definidos. Além disso, estes comportamentos têm influência nas regras de mudança de faixa, uma vez que, como descrito no Capítulo 6, a FDP considerada altera o comportamento do motorista no momento de troca de faixa.

Concluindo, o modelo T-UFF que apresentou bons resultados representando a dinâmica do tráfego nas diferentes situações apresentadas nos capítulos anteriores, é também capaz de representar diferentes comportamentos de motoristas no trânsito, bastando para isto, utilizar a FDP adequada.

Capítulo 8

Conclusão

Muitos modelos de TAC encontrados na literatura procuram melhorar a representação da dinâmica do tráfego, quer seja obtendo uma boa relação fluxo-densidade, ou representando o fluxo sincronizado. Estes modelos consideram sempre o comportamento médio da via para definir suas regras de transição. Além disso, de forma geral, utilizam a combinação de diferentes valores de probabilidades e diferentes condições iniciais para reproduzir tanto a inércia do motorista quanto as fases do fluxo veicular.

Neste trabalho propõe-se um modelo de AC, o modelo T-UFF, que utiliza uma política de antecipação composta de duas etapas. A primeira etapa é responsável por definir a percepção da distância que um determinado veículo tem em relação ao movimento do veículo que está à sua frente, considerando, inclusive, a velocidade relativa entre eles. A partir desta percepção de distância a velocidade do veículo considerado é ajustada. A incerteza do comportamento do motorista, no modelo T-UFF, é utilizada em toda política de antecipação, de forma integrada, tanto na etapa de percepção da distância quanto no momento do ajuste de velocidades. Isso permite, por exemplo, que na etapa de definição da distância prevista, ou seja, a distância que o veículo tem para se movimentar no momento atual, considere-se que o veículo à frente possa acelerar. Possibilita também que a cada passo de simulação, o veículo considerado possa acelerar de forma diferenciada. A utilização de uma função de densidade de probabilidade (FDP) contínua e que não seja necessariamente constante, permite definir essas acelerações de forma coerente e integrada pois, possibilita que o comportamento não seja determinístico, mas define uma tendência para esse comportamento. A utilização da FDP Beta permite ajustar diferentes curvas para definir essa aleatoriedade no comportamento do motorista, permitindo também representar uma FDP uniforme. Com isso, não há necessidade da utilização de condições iniciais especiais e nem de haver diferentes combinações de valores de probabilidades para

representar, com qualidade, a dinâmica do tráfego viário. A combinação das regras, a forma de aplicar a FDP e a própria função de densidade de probabilidade são responsáveis por fazerem surgir o fluxo sincronizado e por possibilitarem diferentes ajustes na forma como cada veículo pode perceber a distância que está do veículo à frente e determinar a quantidade de células que pode acelerar no instante de tempo atual, impedindo que haja colisões geradas pelo algoritmo. Assim sendo, a política de antecipação proposta no modelo T-UFF é capaz de fazer o veículo perceber que aproxima-se do veículo à sua frente, pois considera a velocidade relativa entre eles e a possível aceleração que o veículo à frente pode ter no instante de tempo atual. Isso permite que o modelo preveja, com mais realidade, o movimento do veículo à frente.

Embora as vias com faixa única sejam empregadas para validar as regras de TAC, quando se deseja fazer uma simulação de uma via com mais de uma faixa deve-se simular as regras para mudança de faixas e observar o comportamento do modelo, tendo em vista outras características que devem ser observadas nessas vias, para que o modelo reproduza o fenômeno que se quer representar. Assim, o modelo foi estendido para uma versão de múltiplas faixas que incorpora, na definição das regras de mudança de faixa, tanto as características da política de antecipação quanto os aspectos relacionados a função de densidade de probabilidade utilizada. Em relação às regras de mudança de faixas, regras de motivação e segurança, observou-se que os trabalhos encontrados na literatura, não aplicam qualquer aleatoriedade no comportamento do motorista nesse momento. No modelo T-UFF emprega-se a mesma distribuição de probabilidades utilizada na política de antecipação, nas regras de motivação e segurança, afim de caracterizar a aleatoriedade do comportamento do motorista também no momento da troca de faixas.

A utilização de FDP Beta e o modelo de antecipação proposto nesse trabalho, permitiu que se modelasse diferentes comportamentos dos motoristas no trânsito. Para isso utilizou-se apenas diferentes funções de densidade de probabilidade, quer seja na etapa de percepção da distância que o veículo tem para movimentar-se, quer seja no momento do ajuste de sua velocidade. Para esta adaptação do modelo utilizou-se os perfis de motoristas definidos em Fancher et al. [66], que classifica esse comportamentos considerando as variáveis distância e velocidade, também ajustadas pela FDP Beta no modelo T-UFF. Assim, para definir esses diferentes comportamentos, utilizam-se diferentes formatos da função de densidade de probabilidade. Com isso esses comportamentos podem ser qualitativamente definidos, particularmente aqueles que têm características predominantes bem definidas, permitindo ao modelo T-UFF simular e avaliar a influência dos diferentes comportamentos, isoladamente ou em conjunto, em vias expressas. Com isso o modelo T-

UFF mostrou-se robusto, conseguindo representar qualitativamente e quantitativamente as três fases do fluxo viário nas diferentes simulações realizadas. A utilização de uma FDP que não seja necessariamente uniforme, permite também, com facilidade, representar diferentes comportamentos dos motoristas ao conduzirem seus veículos em vias expressas.

Essa flexibilidade do modelo T-UFF indica, como possibilidade de trabalhos futuros, outras possíveis investigações para melhor definir outros comportamentos dos motoristas no trânsito, bem como simulações que resultem da adoção desses comportamentos. Além disso, outro aspecto a ser considerado em futuros estudos, é a adaptação do presente modelo, que teve um excelente comportamento em vias expressas, em cidades. Para isto deve-se incluir, nesta proposta de antecipação e de definição de comportamentos através da definição de diferentes curvas de densidade de probabilidade, outros fatores tais como: opções de percurso; a simulação do comportamento do pedestre e a influência dele no trânsito, considerando, inclusive, a faixa de pedestre; sincronização dos sinais de trânsito; a questão da otimização da faixa exclusiva para ônibus bem como a localização dos pontos ou paradas.

Referências

- [1] R7. *Frota de veículos nas capitais quase dobra em dez anos.* [Http://noticias.r7.com/brasil/noticias/frota-de-veiculos-nas-capitais-quase-dobra-em-dez-anos-20121002.html](http://noticias.r7.com/brasil/noticias/frota-de-veiculos-nas-capitais-quase-dobra-em-dez-anos-20121002.html), acessado em: 11/02/2013.
- [2] TERRA. *Congestionamento em São Paulo bate recorde do ano.* [Http://noticias.terra.com.br/brasil/com-295-km-sao-paulo-registra-maior-congestionamento-da-historia,0e1ae7948c1da310VgnCLD200000bbceeb0aRCRD.html](http://noticias.terra.com.br/brasil/com-295-km-sao-paulo-registra-maior-congestionamento-da-historia,0e1ae7948c1da310VgnCLD200000bbceeb0aRCRD.html), acessado em: 19/03/2013.
- [3] CHOWDHURY, D.; SANTEN, L.; SCHADSCHNEIDER, A. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Physics Reports*, v. 329, p. 199, 2000.
- [4] LIGHTHILL, M.; WHITHAM, G. On kinematic waves. *Proc. Roy. Soc. A*, v. 229, n. 281-345, 1955.
- [5] PIPES, L. A. An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, v. 24, p. 274–281, 1953.
- [6] NRW. *Verkehrsinformationssystem autobahn.NRW.* [Http://www.autobahn.nrw.de](http://www.autobahn.nrw.de), acessado em: 19/07/2010.
- [7] NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, v. 2, p. 2221–2229, dez. 1992.
- [8] TAKAYASU, M.; TAKAYASU, H. 1/f Noise in a Traffic Model. *Fractal 1*, v. 5, p. 860–866, 1993.
- [9] BENJAMIN, S.; JOHNSON, N.; HUI, P. Cellular Automata Models of Traffic flow Along a Highway Containing a Junction. *Journal of Physics A*, v. 5, p. 3119–3127, 1996.
- [10] KNOSPE, W. et al. *Disorder Effects in Cellular Automata for Two-Lane Traffic.* 1999.
- [11] WOLFRAM, S. A new kind of science. Wolfram media Champaign, IL, 2002.
- [12] KERNER, B. S.; KLENOV, S. L.; SCHRECKENBERG, M. Simple cellular automaton model for traffic breakdown, highway capacity, and synchronized flow. *Phys. Rev. E*, American Physical Society, v. 84, p. 046110, Oct 2011.
- [13] TIAN, J. et al. Cellular automaton model within the fundamental-diagram approach reproducing some findings of the three-phase theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 391, n. 11, p. 3129 – 3139, 2012. ISSN 0378-4371. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437112000167>>.

- [14] DAGANZO, C. F. *Fundamentals of transportation and traffic operations*. Ed. limitada. [S.l.]: Pergamon Press, 1997.
- [15] KERNER, B. S. The physics of traffic. *Physics World Magazine*, v. 12, p. 25–30, Aug 1999.
- [16] National Research Council - U.S.; Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. [S.l.], 2000.
- [17] PARANÁ, D. D. T. D. *Habilitação - Direção Defensiva - Comportamentos seguros no trânsito*. [Http://www.detran.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=108](http://www.detran.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=108), acessado em: 22/02/2013.
- [18] FRED, L. H.; BRIAN, L. A.; MARGOT, A. G. Empirical analysis of freeway flow-density relationships. *Transportation Research Part A: General*, v. 20, n. 3, p. 197 – 210, 1986.
- [19] WAHLE, J. et al. A cellular automaton traffic flow model for online simulation of traffic. *Parallel Computing*, v. 27, n. 5, p. 719–735, 2001.
- [20] HELBING, D. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of modern physics*, v. 73, p. 1067–1141, October 2001.
- [21] SCHADSCHNEIDER, A. Traffic flow: a statistical physics point of view. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 313, n. 1 - 2, p. 153 – 187, 2002.
- [22] MAERIVOET, S.; MOOR, B. D. Cellular automata models of road traffic. *Physics Reports*, v. 419, n. 1, p. 1 – 64, 2005.
- [23] BARLOVIC, R. et al. Metastable states in cellular automata for traffic flow. *The European Physical Journal B*, v. 5, n. 3, p. 793–800, 1998.
- [24] TIAN, R. The mathematical solution of a cellular automaton model which simulates traffic flow with a slow-to-start effect. *Discrete Applied Mathematics*, v. 157, n. 13, p. 2904–2917, 2009.
- [25] BO-HAN, Z. et al. A realistic cellular automaton model for synchronized traffic flow. *Chinese Physics Letters*, v. 26, n. 11, p. 118902, 2009.
- [26] EMMERICH, H.; RANK, E. An Improved Cellular Automaton Model for Traffic Flow Simulation. *Journal of Physics A*, v. 234, p. 676–686, 1997.
- [27] NISHINARI, K.; FUKUI, M.; SCHADSCHNEIDER, A. A stochastic cellular automaton model for traffic flow with multiple metastable states. *Journal of Physics A*, v. 37, n. 3101-3110, 2004.
- [28] KOKUBO, S.; TANIMOTO, J.; HAGISHIMA, A. A new cellular automata model including a decelerating damping effect to reproduce kerner's three-phase theory. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 390, n. 4, p. 561 – 568, 2011.
- [29] KNOSPE, W. et al. Towards a realistic microscopic description of highway traffic. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, v. 33, n. 48, 2000.

- [30] GOLDBACH, M.; EIDMANN, A.; KITTEL, A. Simulation of multilane freeway traffic with detailed rules deduced from microscopic driving behavior. *Phys. Rev. E*, v. 61, p. 1239–1246, Feb 2000.
- [31] CHEYBANI, S.; KERTESZ, J.; SCHRECKENBERG, M. Nondeterministic nagel-schreckenberg traffic model with open boundary conditions. *Physical Review E*, APS, v. 63, n. 1, p. 016108, 2000.
- [32] JIANG, R.; WU, Q. Open boundaries in a cellular automata model for synchronized flow: effects of nonmonotonicity. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, v. 68, n. 2, p. 1539–3755, 2003.
- [33] NASSAB, K. et al. $1/f$ noise in a cellular automaton model for traffic flow with open boundaries and additional connection sites. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 354, p. 597–605, 2005.
- [34] YI, Z.; HOULI, D. Modeling mixed traffic flow at crosswalks in micro-simulations using cellular automata. *Tsinghua Science & Technology*, v. 12, n. 2, p. 214–222, 2007.
- [35] LUO, Y. et al. A realistic cellular automata model of bus route system based on open boundary. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 25, n. 0, p. 202 – 213, 2012.
- [36] KAI, N. et al. Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach. *Physical Review E*, American Physical Society, v. 58, n. 2, p. 1425–1437, 1998.
- [37] RICKERT, M. et al. Two lane traffic simulations using cellular automata. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 231, n. 4, p. 534 – 550, 1996.
- [38] KNOSPE, W. et al. A realistic two-lane traffic model for highway traffic. *J. Phys. A*, v. 35, p. 3369–3388, 2002.
- [39] BRUNET, L. G.; GONÇALVES, S. Cellular automaton block model of traffic in a city. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 237, n. 1-2, p. 59 – 66, 1997.
- [40] WATANABE, M. S. Dynamical behavior of a two-dimensional cellular automaton with signal processing. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 324, n. 3-4, p. 707 – 716, 2003.
- [41] IN-NAMI, J.; TOYOKI, H. A two-dimensional ca model for traffic flow with car origin and destination. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 378, n. 2, p. 485 – 497, 2007.
- [42] SPYROPOULOU, I. Modelling a signal controlled traffic stream using cellular automata. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 15, n. 3, p. 175 – 190, 2007.
- [43] MU, R.; YAMAMOTO, T. An analysis on mixed traffic flow of conventional passenger cars and microcars using a cellular automata model. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 43, n. 0, p. 457 – 465, 2012. 8th International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS 2012).

- [44] LIMA, E. *Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2007.
- [45] KALOS, M.; WHITLOCK, P. *Monte Carlo Methods*. 2. ed. [S.l.]: Wiley=Blackwell, 1986.
- [46] ZAMITH, M. et al. A probabilistic cellular automata model for highway traffic simulation. *Procedia CS*, v. 1, n. 1, p. 337–345, 2010.
- [47] HALL, L. F.; LAM, N. T. The characteristics of congested flow on a freeway across lanes, space, and time. *Transportation Research Part A: General*, v. 22, n. 1, p. 45 – 56, 1988.
- [48] ZAMITH, M.; LEAL-TOLEDO, R.; CLUA, E. A novel cellular automaton model for traffic freeway simulation. In: SIRAKOULIS, G.; BANDINI, S. (Ed.). *Cellular Automata*. [S.l.]: Springer Berlin / Heidelberg, 2012, (Lecture Notes in Computer Science, v. 7495). p. 524–533. ISBN 978-3-642-33349-1.
- [49] BARLOVIC, R. et al. Open boundaries in a cellular automaton model for traffic flow with metastable states. *Phys. Rev. E*, v. 66, n. 4, p. 046–113, 2002.
- [50] TIAN, J. et al. Synchronized flow in a cellular automata model with speed variation dependent randomization. *International Conference on Natural Computation*, IEEE Computer Society, Los Alamitos, CA, USA, v. 6, p. 433–437, 2009.
- [51] YUAN, Y.-M. et al. Traffic flow characteristics in a mixed traffic system consisting of acc vehicles and manual vehicles: A hybrid modelling approach. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 388, n. 12, p. 2483–2491, 2009.
- [52] AESCHBACHER, H. et al. Use of the beta-binomial distribution in dominant-lethal testing for 'weak mutagenic activity' part 1. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, v. 44, n. 3, p. 369 – 390, 1977.
- [53] VUATAZ, L.; SOTEK, J. Use of the beta-binomial distribution in dominant-lethal testing for 'weak mutagenic activity': Part 2. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, v. 52, n. 2, p. 211 – 230, 1978.
- [54] JONES, M. C. Kumaraswamy's distribution: A beta-type distribution with some tractability advantages. *Statistical Methodology*, In Press, Accepted Manuscript, 2009.
- [55] YANG, X. et al. The relations of 'go and stop' wave to car accidents in a cellular automaton with velocity-dependent randomization. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 384, n. 2, p. 589 – 599, 2007.
- [56] SUN, T.; WANG, J. A traffic cellular automata model based on road network grids and its spatial and temporal resolution's influences on simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 15, n. 7, p. 864 – 878, 2007.
- [57] LÁRRAGA, M.; ALVAREZ-ICAZA, L. Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 389, n. 23, p. 5425 – 5438, 2010.

- [58] TIAN, J. et al. Synchronized traffic flow simulating with cellular automata model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 388, n. 23, p. 4827 – 4837, 2009.
- [59] LIU, Y.; NIU, H. Simulation and analysis of traffic flow model on multi-platform harbor-style bus stop. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, v. 12, n. 5, p. 97 – 102, 2012.
- [60] CHANG, G.; KAO, Y. An empirical investigation of macroscopic lane-changing characteristics on uncongested multilane freeways. *Transportation Research Part A: General*, v. 25, n. 6, p. 375 – 389, 1991.
- [61] MAERIVOET, S.; MOOR, B. D. Transportation planning and traffic flow models. *Katholieke Universiteit Leuven, Department of Electrical Engineering ESAT-SCD (SISTA)*, n. 5-155, 2005.
- [62] BRASIL. *Lei No. 9.503, DE SETEMBRO DE 1997, Código de Trânsito Brasileiro*. [S.l.], 1997.
- [63] WAGNER, P.; NAGEL, K.; WOLF E., D. Realistic multi-lane traffic rules for cellular automata. *Physica A*, v. 234, p. 697–698, 1997.
- [64] KERNER, B. S.; KLENOV, S. L. Microscopic theory of spatial-temporal congested traffic patterns at highway bottlenecks. *Phys. Rev. E*, American Physical Society, v. 68, p. 036130, Sep 2003.
- [65] NAGATANI, T. Dynamical jamming transition induced by a car accident in traffic-flow model of a two-lane roadway. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 202, n. 3-4, p. 449 – 458, 1994.
- [66] FANCHER, P. et al. *Intelligent cruise control field operational test*. [S.l.], 1998. [Http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/1241](http://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/1241).
- [67] MARSDEN, G.; MCDONALD, M.; BRACKSTONE, M. Towards an understanding of adaptive cruise control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 9, n. 1, p. 33 – 51, 2001.
- [68] MARTIN, P. G.; BURGETT, A. L. Rear-end collision events: Characterization of impending crashes. In: *Proceedings of the 1st Human-Centered Transportation Simulation Conference, The University of Iowa, Iowa City, Iowa*. [S.l.: s.n.], 2001.
- [69] PENG, H. Evaluation of driver assistance systems—a human centered approach. *AVEC Proceedings*, 2002.
- [70] RUDIN-BROWN, C. M.; PARKER, H. A. Behavioural adaptation to adaptive cruise control (acc): implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 7, n. 2, p. 59 – 76, 2004.
- [71] KANGWON, L.; HUEI, P. Identification and verification of a longitudinal human driving model for collision warning and avoidance systems. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, v. 2, n. 1, p. 3–17, 2004.

- [72] FARIDA, S. Some critical issues when studying behavioural adaptations to new driver support systems. *Cognition, Technology & Work*, Springer, v. 8, n. 3, p. 175–181, 2006.
- [73] BRACKSTONE, M.; MCDONALD, M. Driver headway: How close is too close on a motorway? *Ergonomics*, Taylor & Francis, v. 50, n. 8, p. 1183–1195, 2007.
- [74] LIN, T.; HWANG, S.; GREEN, P. A. Effects of time-gap settings of adaptive cruise control (acc) on driving performance and subjective acceptance in a bus driving simulator. *Safety Science*, v. 47, n. 5, p. 620 – 625, 2009.
- [75] BRACKSTONE, M.; WATERSON, B.; MCDONALD, M. Determinants of following headway in congested traffic. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, v. 12, n. 2, p. 131 – 142, 2009.
- [76] FANCHER, P. et al. *A Comparison of Manual Versus Automatic Control of Headway as a Function of Driver Characteristics*. [S.l.: s.n.], 1996.
- [77] NISHIWAKI, Y. et al. Driver modeling based on driving behavior and its evaluation in driver identification. *Proceedings of the IEEE*, v. 95, n. 2, p. 427–37, 2007. ISSN 0018-9219.
- [78] ROSENFELD, A. et al. Learning driver’s behavior to improve the acceptance of adaptive cruise control. In: *IAAI*. [S.l.]: AAAI, 2012.