

JOÃO PAULO DE SOUSA

**ESTUDO DO CONTROLE DE ACESSO EM
RODOVIAS ATRAVÉS DE UM MODELO DE
INSERÇÃO PARA SIMULADORES
MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO**

**FLORIANÓPOLIS
2006**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO DO CONTROLE DE ACESSO EM
RODOVIAS ATRAVÉS DE UM MODELO DE
INSERÇÃO PARA SIMULADORES
MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

JOÃO PAULO DE SOUSA

Florianópolis, abril de 2006.

ESTUDO DO CONTROLE DE ACESSO EM RODOVIAS ATRAVÉS DE UM MODELO DE INSERÇÃO PARA SIMULADORES MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO

João Paulo de Sousa

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Controle, Automação e Informática Industrial*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

Prof. Werner Kraus Junior, Dr.
Orientador

Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. José Reynaldo A. Setti, Dr.

Prof. Augusto Humberto Bruciapaglia, Dr.

Prof. Eduardo Camponogara, Dr.

*“ Só há sentido na vida com luta.
O triunfo ou a derrota está nas mãos dos deuses...
Então, celebremos a Luta! ”*

Canção de Guerra Suaili

AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir que eu viva todos estes bons momentos na minha vida. Ao meu orientador, Werner Kraus Junior, por ter me apoiado e aceitado o desafio de me orientar durante o desenvolvimento deste trabalho científico. Aos professores do Departamento de Automação e Sistemas, que agregaram a mim um maior conhecimento durante o período de créditos.

Aos meus professores da graduação Elídio de Carvalho Lobão e Roberto Cayetano Lotero, que me apoiaram durante a decisão de continuar meus estudos após minha formação em Engenharia Elétrica. A todos os meus colegas de laboratório (Luciano, Rodrigo, Tiago, Wagner, Jomar, Flávio, Daniel, Frederico e Rodrigo), pela amizade e o bom ambiente de trabalho criado durante todo o período da pós-graduação.

Aos meus tios Walmor e Elia, primos Giovani, Patrícia e Lucas, por toda a ajuda disponibilizada, que foi de grande valia durante a etapa de mudança e correções. A Sidney da Silva (*in memoriam*), colega fiel e companheiro. Finalmente, aos meus pais Antônio e Cladir e à minha namorada Solange, que sempre foram compreensivos, pacientes e ofereceram apoio incondicional às minhas decisões.

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ESTUDO DO CONTROLE DE ACESSO EM RODOVIAS ATRAVÉS DE UM MODELO DE INSERÇÃO PARA SIMULADORES MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO

João Paulo de Sousa

Abril/2006

Orientador: Werner Kraus Junior

Área de Concentração: Controle, Automação e Informática Industrial

Palavras-chave: Engenharia de Tráfego. Controle de Acesso em Rodovias. Simuladores Microscópicos. Modelo de Inserção. ALINEA.

Número de Páginas: xii + 83

As rodovias próximas aos centros urbanos caracterizam-se por um fluxo intenso e um número relativamente grande de acessos laterais para a entrada e saída de veículos. Nos momentos de pico, algumas regiões próximas a esses acessos tornam-se congestionadas, pois o fluxo de veículos que sai do trecho de rodovia que possui o acesso é menor do que a capacidade desse trecho. Esse congestionamento ocorre em virtude de dois motivos: restrição física da capacidade da rodovia e restrição temporária em razão da dinâmica do tráfego. A restrição temporária em virtude da dinâmica do tráfego pode ser evitada com o uso do controle do tráfego de veículos em rodovias por meio do controle de acesso (*ramp metering*), que faz o fluxo de veículos na rodovia atingir o seu valor ótimo. Esta dissertação apresenta um estudo do controle de acesso em rodovias. Com base na análise de deficiências do comportamento de um simulador microscópico comercial, é feita a proposição de um modelo microscópico de simulação capaz de representar o fenômeno da redução dinâmica de capacidade. Usando como ferramenta o modelo de simulação proposto, é estudada a aplicação do algoritmo ALINEA em diferentes situações de entrada de veículos em rodovia de pista simples. Os resultados da simulação indicam que o controle de acesso em rodovias pode evitar ou amenizar o fenômeno da redução dinâmica da capacidade.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

STUDY OF RAMP METERING IN HIGHWAYS THROUGH A MODEL OF INSERTION FOR MICROSIMULATORS

João Paulo de Sousa

April/2006

Advisor: Werner Kraus Junior

Area of Concentration: Control, Automation and Industrial Computing

Key words: Ramp Metering. Insertion Model. ALINEA

Number of Pages: xii + 83

Highways in urban areas are characterized by an intense flow of vehicles and a relatively large number of ramps for the entrance and exit of vehicles. During peak periods of traffic, some regions next to ramps become congested, with the consequence that the flow of vehicles that enter the highway section with a ramp is bigger than the output flow of the same section. This congestion occurs due to two reasons: physical restriction of the capacity of the highway and a temporary restriction due to the dynamics of traffic. The temporary restriction can be prevented with the use of ramp metering, which tries to control the flow of vehicles in the highway near its capacity value. This master dissertation presents a study of ramp metering. Starting from deficiencies observed in a commercial microsimulation tool in representing temporary dynamic restrictions, a simulation model is proposed. Using this model, the ALINEA ramp metering algorithm is applied to different flow situations in a single lane highway with a lateral ramp. Simulation results confirm that ramp metering can avoid or mitigate the dynamic restriction problem that affects traffic performance.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Divisões do estudo	3
2	Conceitos Básicos	5
2.1	Medida de fluxo, velocidade e concentração	5
2.1.1	Concentração	5
2.1.2	Velocidade	6
2.1.3	Fluxo de tráfego	7
2.2	Modelos de comportamento do tráfego	7
2.2.1	Relação velocidade-concentração	7
2.2.2	Relação fluxo-concentração	9
2.3	Modelo de perseguição e aceleração	11
2.4	Transição do modelo de perseguição para o modelo de comportamento do tráfego	14
3	Controle de Acesso em Rodovias	17
3.1	Ações de controle	19
3.2	Estratégias de controle de acessos	20
3.2.1	Controle estático	20
3.2.2	Demanda-capacidade	20
3.2.3	Porcentagem-concentração	21
3.2.4	ALINEA	22

4	O Simulador Microscópico SITRA-B+	24
4.1	O modelo de perseguição de veículos	24
4.2	Avaliação do controle de acesso através de simulador microscópico de tráfego SITRA-B+	29
4.3	Resultados obtidos	31
4.4	Conclusões	34
5	Modelo de Inserção para Simuladores Microscópicos	36
5.1	Conceitos usados no modelo de mudança de faixa	38
5.1.1	Critério de viabilidade	38
5.1.2	Critério de viabilidade para mudança de faixa livre	39
5.1.3	Critério de viabilidade para mudança de faixa cooperativa	39
5.1.4	Critério de viabilidade para mudança de faixa forçada	40
5.2	Cálculo da aceleração de inserção	41
5.2.1	Mudança de faixa forçada	42
5.2.2	Mudança de faixa cooperativa	43
5.3	Modelo de inserção proposto	43
5.3.1	Verifica a entrada de veículos na rodovia	44
5.3.2	Verifica a entrada de veículos no acesso	44
5.3.3	Atualização dos estados	44
5.4	Diferenças Entre as Propostas	49
6	Resultados das Simulações	56
6.1	Validação do Modelo de Perseguição	57
6.1.1	Experimento 1: diagrama velocidade-concentração	57
6.1.2	Experimento 2: Diagrama fluxo-concentração	58
6.2	Validação do Modelo de Inserção Proposto	59
6.2.1	Mudança de faixa forçada	59

6.2.2	Mudança de faixa cooperativa	60
6.3	O Fenômeno da Restrição Temporária	61
6.4	A Implementação do Controle de Acesso	63
7	Conclusões	65
A	Código da Entrada de Veículos na Rodovia e Acesso	67
B	Código do Modelo Implementado no MatLab	72

Lista de Figuras

2.1	Relação linear velocidade-concentração de Greenshields (Gerlough e Huber, 1975)	8
2.2	Relação logarítmica velocidade-concentração de Greenberg (Gerlough e Huber, 1975)	9
2.3	Relação Velocidade-Concentração de Edie (Gerlough e Huber, 1975)	9
2.4	Relação Velocidade-Concentração de Dick (Gerlough e Huber, 1975) (Note a escala logarítmica no eixo da abscissa)	10
2.5	Diagrama fluxo X concentração.	11
2.6	Conceitos básicos para modelos de perseguição.	12
3.1	Rede de Tráfego	17
3.2	Rede de Tráfego Estudada	18
3.3	Congestionamento devido a restrição temporária causada pela entrada desordenada de veículos pelo acesso na rodovia	18
3.4	Estado da rodovia após a implementação da estratégia do controle de acesso	19
3.5	Estratégia de controle de acesso: Controle Estático	20
3.6	Estratégia de controle de acesso: Demanda-Capacidade	21
3.7	Estratégia Porcentagem-Concentração	22
3.8	Estratégia ALINEA	22
4.1	Rede de tráfego simulada	29
4.2	Posição dos sensores na simulação	30
4.3	Diagrama fluxo-ocupação da rede de tráfego	30

4.4	Tempos de verde (ação de controle)	33
4.5	Variação do fluxo de entrada da rodovia	33
4.6	Colisões toleradas pelo SITRA-B	34
5.1	Descrição dos elementos necessários para uma de mudança de faixa	36
5.2	Diagrama tempo distância, adaptado de (Hidas, 2004)	38
5.3	Localização do ponto de inserção para o veículo sujeito.	41
5.4	Fluxograma do calculo da aceleração de inserção.	51
5.5	Fluxograma geral do modelo de inserção aplicado ao modelo de perseguição	52
5.6	Fluxograma da etapa da atualização dos estados (a)	53
5.7	Fluxograma da etapa da atualização dos estados (b)	54
5.8	Fluxograma da etapa da atualização dos estados (c)	55
6.1	Representação gráfica do ambiente simulado no MatLab	56
6.2	Diagrama velocidade-concentração do modelo implementado no MatLab .	58
6.3	Diagrama fluxo-concentração do modelo implementado no MatLab	58
6.4	Diagrama de velocidade dos veículos durante a inserção forçada no modelo implementado no MatLab	60
6.5	Diagrama tempo-distância entre os veículos durante a inserção forçada no modelo implementado no MatLab	61
6.6	Diagrama de velocidade dos veículos durante a inserção cooperativa no mod- elo implementado no MatLab	61
6.7	Diagrama tempo-distância entre os veículos durante a inserção cooperativa no modelo implementado no MatLab	62
6.8	Queda da capacidade da rodovia devido ao fluxo de veículos do acesso. . .	62

Lista de Tabelas

4.1	Resultado das simulações	32
6.1	Parâmetros Usados na Estratégia ALINEA	63
6.2	Resultados do uso do controle de acesso	63
6.3	Resultados sem o uso do controle de acesso	64
6.4	Comparativo entre os resultados com controle e sem controle:	64

Capítulo 1

Introdução

As rodovias próximas aos centros urbanos caracterizam-se por um fluxo intenso de veículos e um número relativamente grande de acessos laterais para a entrada e saída de veículos. Com isso, nos momentos de pico, algumas regiões próximas a esses acessos tornam-se congestionadas, pois o fluxo de veículos que entra na rodovia é maior do que a capacidade desse trecho, logo após o acesso. Esse efeito ocorre em virtude de dois motivos:

- restrição física da capacidade da rodovia e
- restrição temporária em razão da dinâmica do tráfego.

A solução do problema da restrição física depende da expansão da capacidade física da rodovia e não será tratada neste estudo. Já a restrição temporária em virtude da dinâmica do tráfego pode ser evitada com o uso do controle do tráfego de veículos em rodovias por meio do controle de acesso (*ramp metering*), que aproxima as condições do tráfego à capacidade da rodovia (Kotsialos e Papageorgiou, 2001).

O controle de acesso ordena a entrada de veículos na rodovia (Hadj-Salem et al., 1991). O objetivo dessa ordenação é fazer os veículos entrarem na rodovia sem causar uma onda de choque que, por sua vez, inicia o congestionamento. Essa forma de controle, já aplicada em alguns países, possui várias estratégias testadas, dentre elas: restrições físicas (barreiras físicas); controle semafórico de tempos fixos; estratégias de controle de tempo real (Zhang et al., 2001).

Este trabalho realizou um estudo do controle de acesso em rodovias. O estudo ocorreu com base na análise das deficiências do comportamento de um simulador de tráfego comercial. Com isso, também foi feita a proposição de um modelo microscópico de simulação. O simulador utilizado foi o SITRA-B+, que é um software que simula o tráfego de veículos dentro de áreas urbanas, por meio de uma perspectiva denominada microscópica. O uso da simulação é útil para realizar estudos e possíveis melhorias em redes de tráfego reais. Suas

vantagens tornaram-se mais evidentes diante das restrições que prejudicam a realização de estudos de campo. Assim, os profissionais responsáveis por melhorar o tráfego de veículos podem estudar várias estratégias de controle para melhorar o desempenho viário (Crowther, 2001).

Para a realização das simulações de redes de tráfego, são utilizadas ferramentas computacionais. Dentre esses simuladores, destacam-se os simuladores microscópicos também denominados microssimuladores. Estes auxiliam na modelagem de redes de tráfego e suas complexidades, realizando a simulação da progressão de forma discretizada, a partir de pequenos intervalos de tempo. As principais características dos simuladores microscópicos são (Algers et al., 1997):

- determinação de rota (*route building*);
- geração de veículos (*vehicle generation*);
- seleção de rota, com base nas características individuais do motorista;
- progressão do veículo, baseado em um modelo de perseguição (*car-following*) e teoria de mudança de faixas (inserção).

Os veículos trafegam, nesses simuladores, entre pontos de origem e destino, selecionando suas rotas de acordo com as condições de tráfego e as características do comportamento dos motoristas. Dessa forma, estratégias semafóricas de tempo-fixo, coordenadas e adaptativas podem ser programadas no modelo de rede simulado (Hidas e Behbahanzadeh, 1998)

Contudo, é necessário o uso racional desses simuladores, pois, em alguns casos, o tempo consumido pelas simulações desencoraja o seu uso (Crowther, 2001), ou há a ocorrência de resultados distorcidos, em virtude das dificuldades de calibração dos parâmetros dos simuladores microscópicos.

Existem situações em que essas dificuldades não permitem a observação de um fenômeno que se deseja estudar. Por exemplo, quando uma rodovia opera próxima da sua capacidade, a entrada de veículos por um acesso dessa rodovia pode causar o fenômeno da restrição temporária. Tal fenômeno é caracterizado pela redução do fluxo de saída do trecho observado a valores inferiores ao valor da capacidade da rodovia se não existisse o acesso. Isso geralmente acontece no trecho da rodovia localizado a montante do acesso. Dependendo do tempo de duração da restrição temporária, há o aparecimento de um congestionamento no trecho onde a restrição ocorre. Mesmo que a entrada de veículos na rodovia através do acesso seja suspensa, esse congestionamento eventualmente será dissipado e, a partir daí, a capacidade da rodovia volta ao seu valor máximo. Esse fenômeno da restrição temporária na rodovia por meio da redução do fluxo de saída ocorre no simulador microscópico SITRA-B+, porém de forma insatisfatória, pois essa redução da capacidade é muito baixa. Por isso,

a modelagem de rodovias em que se deseja observar o comportamento do tráfego onde o controle de acesso é implementado torna-se inviável ao utilizar o SITRA-B+.

Para que o fenômeno da restrição temporária no SITRA-B+ seja mais evidente, é necessário que a redução da capacidade seja maior. Portanto, compreender o comportamento da inserção (*merging*) de veículos em rodovias é importante, pois o estudo dessa manobra auxilia na análise da capacidade da via (Toledo et al., 2003). A inserção de veículos, que acontece mediante a mudança de faixa, é um componente vital de qualquer modelo de simulação de tráfego. Ela envolve alto grau de interação entre os veículos, pois o comportamento de cada veículo é influenciado pelo comportamento do veículo precedente. Assim, cada veículo precisa reagir e tomar decisões baseadas nas intenções do outro veículo e do ambiente de tráfego (Hidas, 2004).

Um modelo de entrelaçamento (*merging*) foi desenvolvido para simulador microscópico, incorporando procedimentos para mudança de faixa “forçada” e “cooperativa”. Esse modelo de mudança de faixa que foi proposto implementa novos conceitos baseados em dados coletados a partir de gravações de vídeos de mudanças de faixas (Hidas, 2004).

Neste trabalho, foi simulado, por intermédio da ferramenta computacional MatLab, uma combinação do modelo de perseguição do simulador microscópico SITRA-B+ com o modelo de entrelaçamento proposto por Hidas. Para isso, foi montado um modelo microscópico de tráfego em que é observado a atuação do controle de acesso, concretizando o estudo a respeito do controle de acesso em rodovias.

1.1 Divisões do estudo

Este estudo foi dividido em seis etapas, em que são apresentadas neste documento na forma de capítulos que abordam os seguintes assuntos:

- no segundo capítulo há introdução aos conceitos básicos que foram usados durante a execução das tarefas de implementação do modelo de entrelaçamento, da estratégia de controle de acesso escolhida e para a análise dos resultados alcançados;
- no terceiro capítulo, é apresentada a teoria de controle de acesso em rodovias, em que são mostradas, de forma resumida, as estratégias de controle existentes para a implementação do controle de acesso;
- a seguir, no capítulo quatro, encontram-se mais informações a respeito do simulador microscópico SITRA-B+ e do modelo de perseguição utilizado por essa ferramenta computacional. Além disso, também há as simulações que foram feitas, em que é demonstrada a dificuldade do SITRA-B+ em realizar o fenômeno da restrição temporária em virtude da dinâmica do tráfego;

- concluindo a apresentação dos modelos estudados, no capítulo cinco, há o modelo de entrelaçamento desenvolvido por Hidas e o modelo de entrelaçamento proposto, baseado no modelo de Hidas (Hidas, 2004), que foi combinado com o modelo de perseguição do simulador SITRA-B+;
- após a implementação da combinação entre o modelo proposto e o modelo de perseguição, no capítulo seis, estão apresentados os resultados dos experimentos realizados para validar o modelo implementado no MatLab e também a análise das melhoras obtidas com a implementação do controle de acesso. Sendo assim, no capítulo sete, estão as conclusões e as perspectivas que foram observadas tomando por base a análise dos resultados obtidos no capítulo anterior.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

Os conceitos básicos presentes neste estudo são abordados de forma sucinta neste capítulo. Aqui, encontram-se as relações, os modelos e as definições utilizadas tanto para a implementação do modelo de perseguição quanto para o modelo de inserção. Além disso, tais conceitos também são empregados na estratégia de controle de acesso, auxiliando na análise dos resultados.

2.1 Medida de fluxo, velocidade e concentração

As três características mais importantes do tráfego de veículos são fluxo (q), velocidade (u) e concentração (k) (Gerlough e Huber, 1975). Antes de aplicar o modelo de perseguição, devem-se definir essas características importantes de forma clara e concisa.

2.1.1 Concentração

Concentração é definida como o número de veículos por unidade de comprimento da via onde se encontram esses veículos. Ou seja, pode-se medir a concentração mediante a contagem do número de veículos em certo trecho de rodovia durante um instante de tempo. Os engenheiros de tráfego desenvolveram formas de estimar o valor da concentração em um determinado ponto da rede de tráfego. Uma das formas mais utilizadas para estimar a concentração é o cálculo da ocupação ou “ocupância” da pista. Uma forma de se adquirir tal informação é por meio do uso de sensores de presença ou laços indutivos. Com o uso de laços indutivos, a ocupação será a porcentagem de tempo em que o sensor permaneceu “ocupado” dentro de um período de amostra determinada. Ou seja,

$$\phi = \frac{T_{SO}}{T_{PA}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

onde TSO é o tempo em que o sensor permaneceu “ocupado” e TPA é o período tempo de amostragem do sensor.

Portanto, a concentração estimada para aquele ponto somente será obtida caso se saiba o comprimento dos veículos,

$$k_{est} = \frac{\phi}{100} \cdot \frac{1}{L_e} \quad (2.2)$$

onde L_e é o comprimento efetivo do veículo em metros e ϕ é a ocupância calculada em 2.1.

Concentração ao longo de um trecho

A concentração ao longo de um trecho é calculada a partir de uma distância conhecida, (por exemplo, um trecho da rede de tráfego) e o número de veículos que estão dentro desse trecho observado:

$$k = \frac{N}{L} \quad (2.3)$$

em que N é o número de veículos e L é o comprimento da seção da rodovia observada. Contudo, é possível ser mais específico se for considerado s_i como a distância entre o n -ésimo veículo e o veículo à sua frente, ou seja, o espaçamento entre os veículos (*spacing*). Nesse caso, a concentração entre esses dois veículos será:

$$k_i = \frac{1}{s_i} \quad (2.4)$$

Para que seja possível encontrar o valor da concentração de todo o trecho com base em cada concentração individual k_i , é necessário saber a quantidade de espaços contados dentro do trecho observado. Esse valor, é apresentado na equação pela variável N , então:

$$k = \frac{N}{\sum_{i=1}^N s_i} = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum s_i} \quad (2.5)$$

ou

$$k = \frac{1}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{k_i}} \quad (2.6)$$

É possível perceber na Equação 2.6 que a concentração do trecho observado é a média harmônica das concentrações individuais de cada veículo, k_i .

2.1.2 Velocidade

Para calcular a velocidade dos veículos em uma via, é observado um trecho da rodovia, do qual são tiradas duas fotografias aéreas, com diferença de tempo Δt entre as fotos. A

velocidade individual de cada veículo no trecho é dada por:

$$u_i = \frac{s_i}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Embora cada veículo atravesse o trecho com distâncias diferentes entre si, todos são observados para um mesmo instante e, com isso, a velocidade média no trecho é calculada conforme mostrado na Equação 2.8:

$$\bar{u}_s = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \frac{s_i}{\Delta t} = \frac{1}{N' \cdot \Delta t} \sum_{i=1}^{N'} s_i \quad (2.8)$$

onde N' , assim como no cálculo da concentração do trecho observado, é a quantidade de espaços contados dentro do trecho observado. Nota-se que a velocidade média do trecho é o valor harmônico obtido a partir da velocidade individual de cada veículo.

2.1.3 Fluxo de tráfego

As unidades de medida do fluxo de tráfego são, geralmente, expressas em veic/h e veic/s. O fluxo relaciona-se com a concentração e a velocidade por intermédio da seguinte expressão:

$$q = k \cdot \bar{u}_s \quad (2.9)$$

onde k é a concentração média do trecho observado e u_s é a velocidade média desse mesmo trecho. Essa relação é conhecida como equação fundamental do tráfego e é importante para a descrição do comportamento do tráfego em rodovias, e será abordada direta ou indiretamente nas discussões apresentadas nas seções seguintes.

2.2 Modelos de comportamento do tráfego

A caracterização de um trecho de via de tráfego veicular pode ser feita com base na obtenção de curvas que descrevem as relações entre as três variáveis fundamentais do tráfego; tais relações são usadas para a definição da capacidade máxima dessa rede. A relação entre essas três variáveis (fluxo, velocidade e concentração) é denominada de modelos de comportamento do tráfego (Gerlough e Huber, 1975).

2.2.1 Relação velocidade-concentração

É um fato concreto que os motoristas reduzem a velocidade de seus veículos conforme aumenta a quantidade de carros ao seu redor. Em virtude dessa interação entre a concentração

e a velocidade e sabendo que tomando por base essas duas variáveis é possível obter o fluxo, muitas relações entre velocidade e concentração surgiram. A mais simples é a relação linear proposta por Greenshields, que foi um dos primeiros a estudar as características do tráfego (Gerlough e Huber, 1975). Ele propôs uma relação linear entre o fluxo e a concentração:

$$u = u_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) \quad (2.10)$$

em que u_f é a velocidade de trânsito livre (*free-flow speed*) e k_j é a concentração em congestionamento. A Figura 2.1 mostra os dados plotados para um certo trecho de via que apresenta comportamento linear (Gerlough e Huber, 1975).

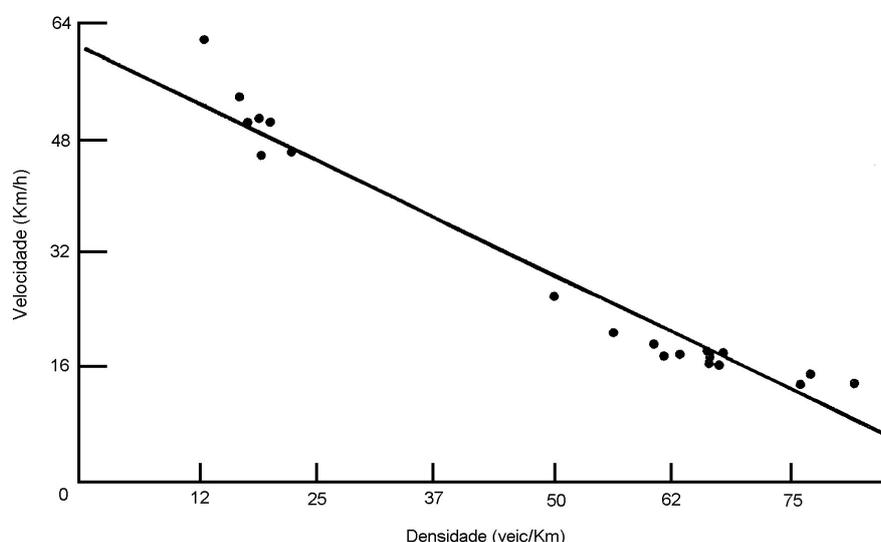


Figura 2.1: Relação linear velocidade-concentração de Greenshields (Gerlough e Huber, 1975)

Greenberg sugeriu uma relação velocidade-concentração dada por:

$$u = u_m \ln \left(\frac{k_j}{k} \right) \quad (2.11)$$

na qual u_m é a velocidade quando o fluxo é máximo. Essa relação é mais adequada para altas concentrações (Figura 2.2), contudo deixa de representar adequadamente a realidade em baixas concentrações (para verificar isso, basta tender k a zero na equação 2.11).

Para melhor capturar o comportamento do tráfego em baixas concentrações, Underwood apresentou uma nova relação na forma (Gerlough e Huber, 1975):

$$u = u_f e^{-\frac{k}{k_m}} \quad (2.12)$$

onde k_m representa a concentração sob fluxo máximo. Como o modelo de Underwood não representa o comportamento em altas concentrações, pois a velocidade não se torna zero para $k = k_j$, Edie apresentou uma relação composta pelas equações 2.11 e 2.12, em que a equação 2.11 é utilizada para altas concentrações e a equação 2.12 para baixas concentrações.

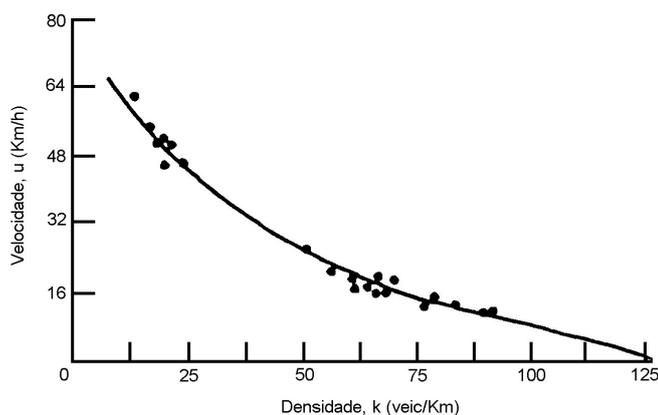


Figura 2.2: Relação logarítmica velocidade-concentração de Greenberg (Gerlough e Huber, 1975)

Quando uma velocidade normalizada e uma concentração normalizada são representadas num gráfico, os dois modelos tangenciam-se no meio do eixo da abscissa, (Gerlough e Huber, 1975), como é mostrado na Figura 2.3

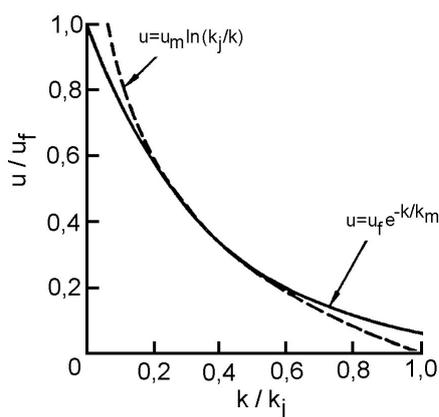


Figura 2.3: Relação Velocidade-Concentração de Edie (Gerlough e Huber, 1975)

Para criar uma relação que representasse o comportamento do tráfego em regiões urbanas, Dick considerou que há um valor máximo de velocidade que pode ser atingido pelos veículos, (Gerlough e Huber, 1975). Ele combinou as suas considerações com o modelo de Greenberg e obteve o modelo conforme mostrado na Figura 2.4.

2.2.2 Relação fluxo-concentração

A relação entre fluxo e concentração foi proposta inicialmente por Lighthill e Whitham por causa da grande utilidade dessa relação para o estudo de uma rede de tráfego. Haight denominou essa relação como o diagrama básico de uma rede de tráfego (Gerlough e Huber, 1975). Algumas características sobre essa relação devem ser destacadas:

1. Na ausência de concentração não haverá fluxo. Assim, a curva deverá passar pela

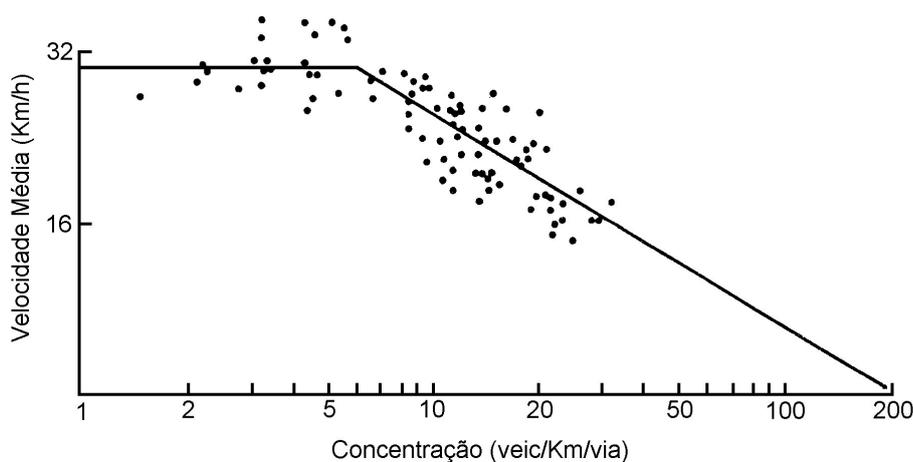


Figura 2.4: Relação Velocidade-Concentração de Dick (Gerlough e Huber, 1975) (Note a escala logarítmica no eixo da abscissa)

origem. Além disso, como a velocidade média é obtida com base na relação fluxo/concentração, a inclinação com a qual a curva se afasta da origem será a "velocidade de trânsito livre".

2. Um fato observável é que há concentração máxima para a qual não há fluxo, a concentração de congestionamento, para a qual a velocidade é nula. Nessa situação, o líder de um pelotão de veículos pára e faz com que os veículos logo atrás dele sejam forçados a parar. Assim, a curva que demonstra a relação fluxo-concentração terá um ponto que representa a máxima concentração (congestionamento) com fluxo zero.
3. Visto que são observados fluxos a valores de concentrações intermediárias, poderá haver um ou mais pontos de fluxo máximo entre os dois pontos de fluxo zero (origem e congestionamento), conforme mostrado na Figura 4.3.
4. Não é necessário que a curva fluxo-concentração seja contínua.

As características da relação fluxo-concentração mencionadas anteriormente podem ser visualizadas na Figura 2.5.

A Figura 2.5 ilustra as características medidas por veículos viajando a uma velocidade média de 40 km/h (11,17 m/s), a um fluxo de 1200 veic/h e uma concentração de 30 veic/km-/pista. Para qualquer ponto da curva, a inclinação do vetor representa a velocidade média dos veículos, e a inclinação da tangente do ponto representa a velocidade de propagação das ondas de choque em razão de pequenas variações de fluxo. Ainda na Figura 4.3 a concentração de congestionamento é de 173 veic/km, e o fluxo máximo é de 1400 veic/h.

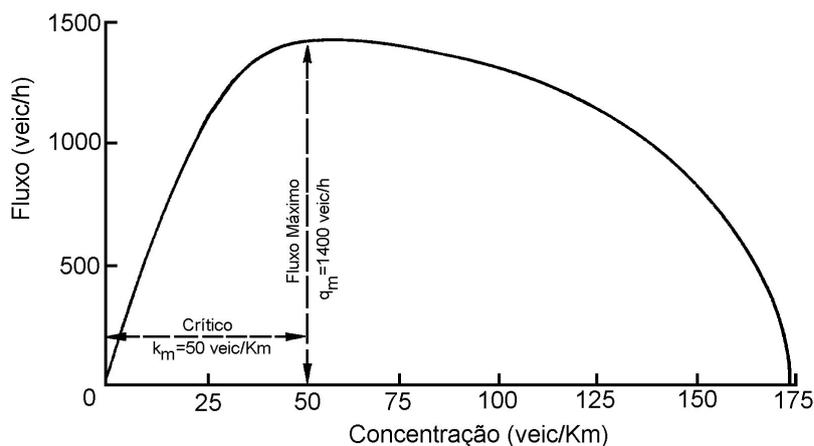


Figura 2.5: Diagrama fluxo X concentração.

2.3 Modelo de perseguição e aceleração

Os modelos de perseguição são equações do tipo estímulo-resposta, em que a resposta é a reação de um motorista ao movimento do veículo que o precede na via. A resposta de sucessivos motoristas numa via é acelerar ou desacelerar, proporcionalmente à magnitude do estímulo durante um certo tempo “ t ” e que começa após uma inércia de tempo “ T ”. A equação base para esse tipo de modelo é:

$$\text{Resposta}(t + T) = \text{Sensibilidade} \cdot \text{Estimulo}(t) \quad (2.13)$$

Para se entender a natureza dessa resposta, os estímulos que causam a reação do motorista e como se pode medir essa sensibilidade, considera-se o caso em que motoristas trafegam em uma via com alta “concentração” e que, por isso, as ultrapassagens e mudanças de faixas não são possíveis.

Supondo que o motorista irá manter uma distância de segurança, $s(t)$, do veículo precedente a ele, em que essa distância é suficiente para parar o veículo caso o líder realize uma parada de emergência, quando o líder inicia a desaceleração, o veículo perseguidor irá começar a desacelerar após um tempo T , contado a partir do instante t em que o líder começa a desacelerar.

A posição relativa entre os dois veículos no instante de tempo t , medido entre os pára-choques dianteiros, é mostrada na Figura 2.6(a), em que n é o veículo líder e $n + 1$ é o perseguidor. A posição relativa dos dois veículos após a manobra de parada é mostrada na Figura 2.6(b)

em que:

$x_n(t)$ - posição do veículo n no instante de tempo t ;

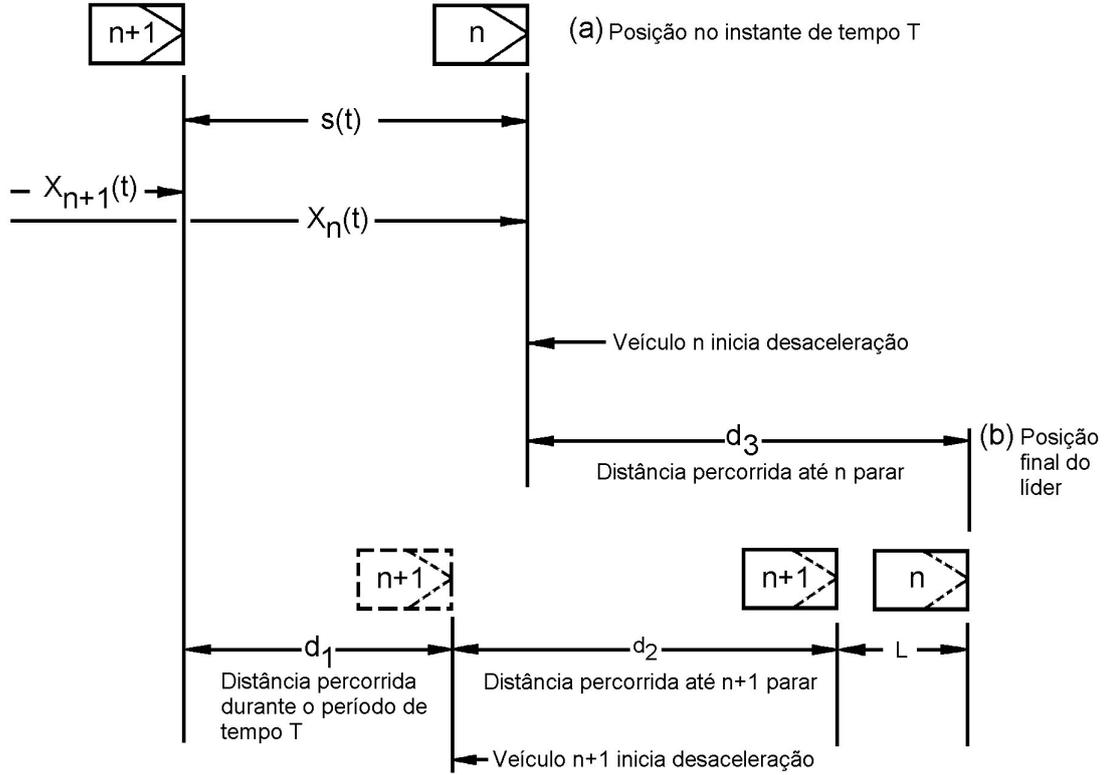


Figura 2.6: Conceitos básicos para modelos de perseguição.

$s(t)$ - espaço entre os veículos no instante t

$$s(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t) \quad (2.14)$$

d_1 - distância percorrida pelo veículo $(n + 1)$ durante o tempo de reação T ,

$$d_1 = T \cdot u_{n+1}(t) \quad (2.15)$$

d_2 - distância percorrida pelo veículo $(n + 1)$ durante a manobra de desaceleração,

$$d_2 = \frac{[u_{n+1}(t + T)]^2}{2 \cdot a_{n+1}(t + T)} \quad (2.16)$$

d_3 - distância percorrida pelo veículo n durante a manobra de desaceleração,

$$d_3 = \frac{[u_n(t)]^2}{2 \cdot a_n(t)} \quad (2.17)$$

L - distância entre para-choques dianteiros após a parada dos dois veículos ($L >$ comprimento do veículo);

u_i - velocidade do veículo i no instante de tempo t ;

a_i - aceleração do veículo i no instante de tempo t .

A distância desejada entre os veículos para que não ocorra colisão no momento de uma parada repentina será:

$$s(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t) = d_1 + d_2 + L - d_3 \quad (2.18)$$

Definindo a velocidade de um veículo como $u(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \dot{x}(t)$ e a aceleração como $a(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x}(t)$ e substituindo cada um desses elementos na Equação 2.18, tem-se:

$$s(t) = x_n(t) - x_{n+1}(t) = T\dot{x}_{n+1}(t) + \left[\frac{\dot{x}_{n+1}(T+t)^2}{2\ddot{x}_{n+1}(T+t)} \right] + L - \left[\frac{\dot{x}_n(t)^2}{2\ddot{x}_n(t)} \right] \quad (2.19)$$

Caso assumamos que as distâncias de parada e as velocidades de ambos os veículos são as mesmas, então $d_2 = d_3$, ou seja:

$$x_n(t) - x_{n+1}(t) = T\dot{x}_{n+1}(t+T) + L \quad (2.20)$$

que é a distância percorrida pelo perseguidor durante o tempo de reação (T), d_1 , mais a separação entre os pára-choques dos veículos no momento em que os dois já estiverem parados, L . Diferenciando a equação 2.20 com relação ao tempo (t),

$$\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t) = T \cdot [\ddot{x}_{n+1}(t+T)] \quad (2.21)$$

com isso, a aceleração do veículo (n -ésimo+1) no instante de tempo ($t+T$) será:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \frac{1}{T} \cdot [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (2.22)$$

que é a forma matemática da equação 2.13 mostrada anteriormente. A resposta do (n -ésimo+1) motorista ocorrerá a partir do instante de tempo ($t+T$). Essa reação será a de acelerar ou desacelerar de acordo com a diferença entre as velocidades do veículo líder (n -ésimo) e do perseguidor (n -ésimo + 1); a sensibilidade é inversamente proporcional ao tempo que o perseguidor levará para começar a atuar, ou seja, T^{-1} (segundos).

A Equação 2.22 pode ser generalizada da seguinte forma:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \alpha [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (2.23)$$

assim, pode-se observar que esse é um modelo de perseguição linear, pois a resposta, aceleração (ou desaceleração), é diretamente proporcional ao estímulo fornecido por intermédio da diferença entre as velocidades dos dois veículos.

Gazis, Herman e Potts desenvolveram um modelo de perseguição de veículos mais realista (Gerlough e Huber, 1975). Enquanto no modelo de perseguição linear se assume que na

Equação 2.13 a sensibilidade representada por α é mantida constante, eles propuseram que a sensibilidade fosse inversamente proporcional à distância entre os veículos, portanto α é substituído por:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]} \quad (2.24)$$

onde a unidade de α_0 é distância/tempo. Então, substituindo a Equação 2.24 na Equação 2.23, tem-se:

$$\dot{x}_{n+1}(t+T) = \left\{ \frac{\alpha_0}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]} \right\} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (2.25)$$

2.4 Transição do modelo de perseguição para o modelo de comportamento do tráfego

A relação entre modelos de perseguição de veículos e os modelos de comportamento do tráfego foi, no início, estudada por Gazis e outros, (Gerlough e Huber, 1975). Neste estudo, é considerado que o veículo líder de um pelotão trafega em uma via a uma velocidade u e que os veículos que o seguem trafegam nessa mesma velocidade, distanciados entre si a uma distância ditada pela percepção e interpretação dos motoristas como distância “segura” para perseguição. O pelotão de veículos move-se ao longo da via sob uma condição de “regime permanente”. Com isso, é possível observar um determinado fluxo q , com concentração k e velocidade u . Gazis demonstrou que é possível derivar as equações que modelam o comportamento desse pelotão com base nas leis do movimento que são sugeridas pela teoria de perseguição de veículos. O procedimento é de integrar a expressão da aceleração do (n-ésimo+1) veículo, obtendo, assim, a expressão da velocidade do veículo. Essa equação também pode ser considerada para todo o tráfego, pois, como estão em regime permanente, todos os veículos da via seguem nessa mesma velocidade. Tomando por base as condições iniciais, a equação da velocidade é solucionada e o valor da constante de integração é descoberta. Por fim, substituem-se os valores em termos apropriados para q e k de acordo com a definição da Equação 2.9.

Aplicando esse procedimento à Equação 2.25, realiza-se primeiro a integração da equação:

$$\dot{x}_{n+1}(t+T) = u = \alpha_0 \ln[x_n(t) - x_{n+1}(t)] + c_0 \quad (2.26)$$

Sabendo que:

$$s = [x_n(t) - x_{n+1}(t)] \quad (2.27)$$

e que, conforme a equação 2.4,

$$s = \frac{1}{k} \quad (2.28)$$

a Equação 2.26 pode ser reescrita como:

$$u = \alpha_0 \ln \left(\frac{1}{k} \right) + c_0 \quad (2.29)$$

Aplicando-se as condições iniciais, $u = 0$ quando $k = k_j$, obtém-se o valor da constante de integração c_0 :

$$0 = \alpha_0 \ln \left(\frac{1}{k_j} \right) + c_0 \quad \therefore \quad c_0 = -\alpha_0 \ln \left(\frac{1}{k_j} \right) \quad (2.30)$$

Então, substituindo-se a Equação 2.30, na Equação 2.29, tem-se:

$$u = \alpha_0 \ln \left(\frac{k_j}{k} \right) \quad (2.31)$$

A Equação 2.31 é referente à velocidade do veículo e, em virtude das condições iniciais, de todo o trafego. Por isso, a Equação 2.31 pode ser aplicada na Equação 2.9 para modelar o comportamento de todo o tráfego. Com isso, tem-se:

$$q = u.k \quad \therefore \quad q = \alpha_0 k \ln \left(\frac{k_j}{k} \right) \quad (2.32)$$

Para determinar o valor da constante de proporcionalidade (α_0), recorre-se à Figura 2.5, para determinar as condições físicas da via. Percebe-se que a inclinação $\frac{dq}{dk}$ é zero quando o fluxo da via é máximo (q_m). Portanto, diferenciando a Equação 2.32 e igualando esta a zero, obtém-se:

$$\frac{dq}{dk} = \alpha_0 \ln \left(\frac{k_j}{ke} \right) = 0 \quad (2.33)$$

em que e é a base do logaritmo natural.

Supondo-se que $\alpha_0 \neq 0$, define-se k_m como sendo a concentração quando o fluxo é máximo (q_m) e, substituindo-se tais considerações na Equação 2.33, tem-se que:

$$\frac{k_j}{k_m e} = 1 \quad \therefore \quad k_m = \frac{k_j}{e} \quad (2.34)$$

Definindo-se u_m como a velocidade durante o fluxo máximo (q_m) e substituindo-se o valor de k_m na Equação 2.9, obtém-se:

$$q_m = u_m.k_m \quad \therefore \quad q_m = u_m \frac{k_j}{e} \quad (2.35)$$

Substituindo u_m e k_m na Equação 2.31 tem-se:

$$u_m = \alpha_0 \ln \left(\frac{k_j}{k_m} \right) = \alpha_0 \ln \left(\frac{k_j e}{k_j} \right) = \alpha_0 \ln e \quad (2.36)$$

Portanto,

$$\alpha_0 = u_m \quad (2.37)$$

Ou seja, a constante de proporcionalidade é o valor da velocidade do tráfego de veículos quando este se encontra sob o fluxo máximo q_m . As Equações 2.31 e 2.32, obtidas a partir da integração do modelo de perseguição, representam o tráfego conforme o modelo de Greenberg, demonstrando a equivalência entre o modelo macroscópico e o microscópico.

Com base no estudo e desenvolvimento das relações, modelos e equivalências mostradas neste capítulo, foram desenvolvidos simuladores e criadas novas estratégias com o objetivo de melhorar o desempenho viário. Um exemplo é o SITRA-B+, simulador comercial baseado num modelo de perseguição de veículos. Um exemplo de estratégia de controle para a melhoria do desempenho das redes de tráfego é o controle de acesso em rodovias, que será discutido no capítulo seguinte.

Capítulo 3

Controle de Acesso em Rodovias

Nas rodovias próximas aos centros urbanos, há um aumento na quantidade de acessos laterais para a entrada e saída de veículos. Com isso, principalmente nos horários de pico, há um fluxo intenso de veículos nos trechos próximos aos acessos. Em razão dessas duas características, alguns desses trechos tornam-se congestionados, pois ocorre o surgimento do fenômeno da restrição temporária em virtude da à dinâmica do tráfego.

Para explicar o fenômeno da restrição temporária em razão da a dinâmica do tráfego, considera-se uma rede de tráfego com demanda surgindo de vários lugares e com fluxos de saídas para vários destinos, conforme ilustrado na Figura 3.1,

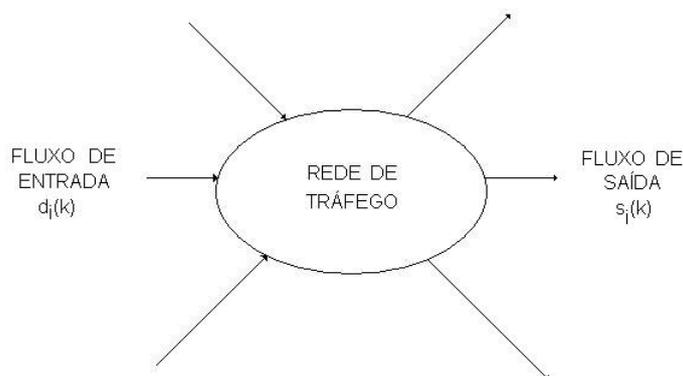


Figura 3.1: Rede de Tráfego

Todos os veículos que entram na rede, saem dela (os veículos não surgem e nem desaparecem dentro da rede), supondo-se também que dentro dessa rede o nível da demanda, sua distribuição temporal e espacial sejam independentes de qualquer medida de controle utilizada (Kotsialos e Papageorgiou, 2002). É o caso em que a rede de tráfego é formada por uma seção de rodovia, e nessa seção está presente um acesso para a rodovia a partir da arterial paralela. Na Figura 3.2, que ilustra a rede considerada, tem-se:

q_{in} é o fluxo que entra na seção através da rodovia;

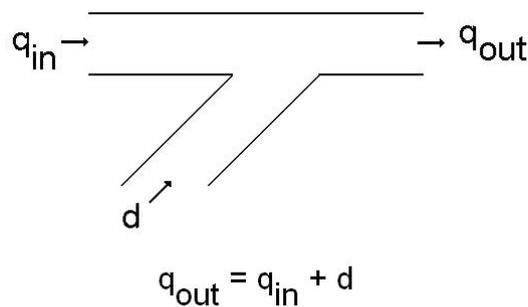


Figura 3.2: Rede de Tráfego Estudada

d é o fluxo de veículos que entra na rodovia pelo acesso;

q_{out} é o fluxo que sai da rodovia.

A restrição temporária ocorre quando o fluxo de veículos que entra (q_{in}) e sai (q_{out}) da rodovia atinge um valor próximo da capacidade da rodovia. Então, com a rodovia operando próxima de sua capacidade, a entrada de veículos a partir do acesso provoca uma redução da velocidade dos veículos localizados na rodovia a montante do acesso. Essa redução forma uma onda que força a redução cada vez maior da velocidade dos demais veículos. Ou seja, dependendo do fluxo de veículos que entram pelo acesso, ocorre uma redução do fluxo de saída (q_{out}) da rodovia. Com o fluxo de entrada maior do que o fluxo de saída, percebe-se uma redução da capacidade da rodovia na região do acesso. Esse fenômeno é responsável pelo surgimento de um congestionamento no trecho a montante do acesso (Kotsialos e Papa-georgiou, 2002). Pela Figura 3.3, pode-se mostrar a região onde ocorre o congestionamento. Na figura, a taxa de descarga após o congestionamento é representada por q_{con} , a qual é, tipicamente, da ordem de 10% menor que a capacidade da rodovia. Portanto, a demora na dissipação do congestionamento é tanto maior quanto mais próximo q_{in} for da capacidade nominal da via. Somente após a dissipação do congestionamento é que o fluxo de entrada da rodovia volta a ser igual ao fluxo de saída.

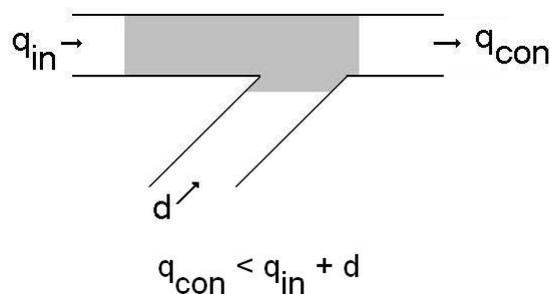


Figura 3.3: Congestionamento devido a restrição temporária causada pela entrada desordenada de veículos pelo acesso na rodovia

Contudo, esse fenômeno pode ser evitado ou amenizado com o uso do controle de acesso, que é capaz de estabelecer a ordem nas condições do tráfego com utilização ótima da capacidade da rodovia (Hadj-Salem et al., 1991). O controle de acesso é utilizado nessas situações,

porque ordena a entrada de veículos na rodovia e evita que a seqüência de eventos que causa o congestionamento se complete.

3.1 Ações de controle

As ações de controle tipicamente utilizadas para evitar congestionamento em rodovias ou aumentar a eficiência delas são (Papageorgiou et al., 2003):

1. controle de acessos (*Ramp Metering*) - Que pode ser implementado por intermédio da instalação de semáforos nos acessos às rodovias;
2. controle de via (*Link Control*) - Essa ação pode ser realizada de várias formas como, por exemplo, limites de velocidade variáveis etc;
3. sistemas de guia e informações para motoristas (*Driver Information and Guidance Systems*) - Esse sistema pode utilizar placas colocadas ao lado da rodovia para passar informações aos motoristas ou utilizar um sistema de comunicação entre uma central e todos os veículos localizados na rodovia.

O controle de acesso é o meio mais direto e eficaz para a melhora da eficiência do tráfego em rodovias (Papageorgiou et al., 2003). Quando tal estratégia é aplicada, o tráfego passa a ter um fluxo mais constante, graças à ordenação dada no acesso, evitando, assim, a restrição temporária. Na Figura 3.4, pode-se mostrar o comportamento do tráfego após a implementação da ação de controle. Na figura, r representa o fluxo do acesso que efetivamente ingressa na rodovia. Esse fluxo é regulado por semáforos, portanto tem um padrão em forma de pelotões de veículos. O eventual congestionamento que seria causado pelo padrão de chegadas aleatórias do fluxo d é evitado, pois a retenção de veículos do acesso durante o vermelho permite a dissipação de eventuais concentrações muito grandes de veículos.

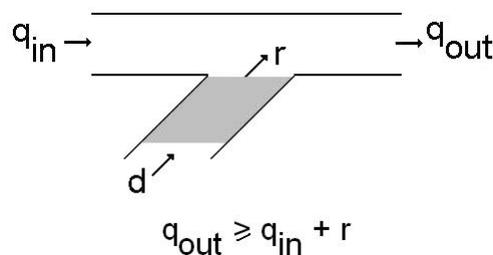


Figura 3.4: Estado da rodovia após a implementação da estratégia do controle de acesso

Observa-se que uma fila (parte dessacada da Figura 3.4) é criada no acesso, contudo, mesmo com ela, os resultados são tipicamente melhores do que os trechos de rodovia sem a ação de controle. Os efeitos mais positivos percebidos ao se utilizar corretamente o controle de acesso a rodovias são:

- fluxo mais constante ao longo do trecho em virtude da redução do número de congestionamentos;
- aumento do volume de veículos no trecho graças à redução dos congestionamentos gerados pelos acessos na rodovia;
- aumento da segurança do trecho em virtude da redução no número de congestionamentos.

3.2 Estratégias de controle de acessos

3.2.1 Controle estático

Essa estratégia consiste em restringir fisicamente o final do acesso. Isso força os veículos a entrar na rodovia através de uma única via. Não são utilizados semáforos, mas barreiras físicas colocadas em uma das faixas que formam o acesso. A Figura 3.5 ilustra essa estratégia.

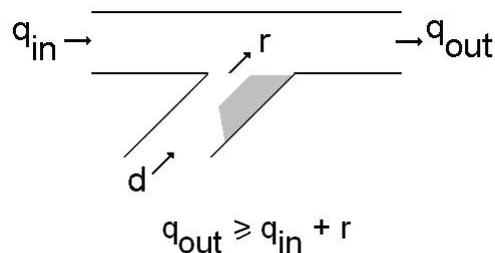


Figura 3.5: Estratégia de controle de acesso: Controle Estático

3.2.2 Demanda-capacidade

Essa estratégia de controle bastante difundida nos EUA mede o fluxo de veículos (q_{in}) que entram no trecho que contém o acesso. Essa medida do fluxo que entra é realizada por meio de sensores colocados poucos metros antes do acesso. A Figura 3.6 ilustra o funcionamento dessa estratégia.

O fluxo adquirido pelo sensor é comparado com a capacidade máxima do trecho localizado logo após o acesso (q_{cap}). Esse valor máximo é obtido com base nos valores estatísticos (históricos) daquele trecho. Essa comparação fornecerá a quantidade de veículos que deverão ser liberados do acesso para a rodovia. Contudo, somente o fluxo que entra no trecho não é suficiente, pois esses sensores não são capazes de determinar quando o trecho está congestionado. Para que seja possível detectar tal estado, um sensor para medir a ocupância da via é colocado na saída do trecho (o_{out}). Assim, enquanto a ocupância permanecer abaixo do valor de congestionamento (o_{cr}), a estratégia libera do acesso uma quantidade de veículos

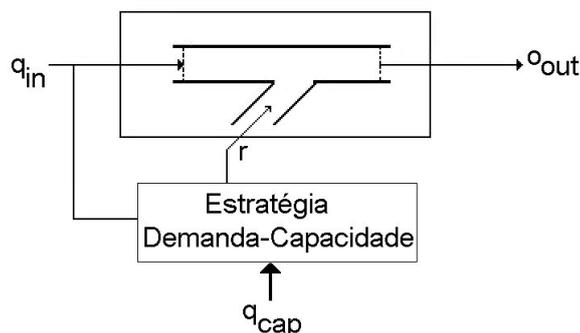


Figura 3.6: Estratégia de controle de acesso: Demanda-Capacidade

de acordo com a comparação mencionada anteriormente. Quando a ocupância do trecho é maior ou igual ao valor crítico, um volume mínimo pré-estabelecido (r_{min}) é liberado do acesso. Com isso, a taxa de ingresso de veículos do acesso é calculada por:

$$r(k) = \begin{cases} q_{cap} - q_{in}, & \text{se } o_{out} \leq o_{cr} \\ r_{min}, & \text{se } o_{out} \geq o_{cr} \end{cases} \quad (3.1)$$

3.2.3 Porcentagem-concentração

Essa estratégia é baseada na mesma filosofia da estratégia demanda-capacidade. Dependendo da demanda que entra no trecho, um volume maior ou menor é liberado pelo acesso buscando manter a capacidade máxima na saída do trecho. Em caso de congestionamento, o acesso passa a liberar um valor mínimo pré-estabelecido.

As diferenças entre as duas estratégias consistem em:

- a demanda que entra no trecho é determinada por meio de medidas de concentração. O principal motivo para isso é a possibilidade de usar somente um sensor colocado na entrada do trecho. A demanda então é estimada tomando-se por base uma curva calibrada;
- o congestionamento é detectado pelo mesmo sensor colocado na entrada do trecho.

A Figura 3.7 demonstra um pouco melhor o funcionamento da estratégia porcentagem-concentração.

O valor da concentração crítica é obtido com base em valores estatísticos (históricos), e o valor de transição é encontrado por meio de tentativa e erro, sempre levando em conta o histórico do volume exigido pelo acesso.

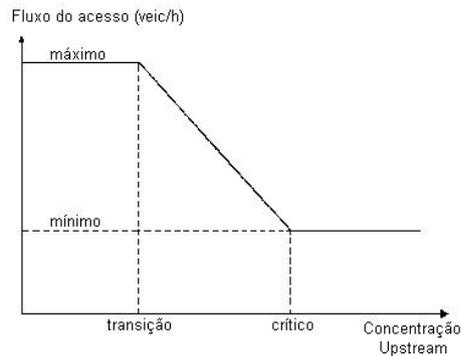


Figura 3.7: Estratégia Porcentagem-Concentração

3.2.4 ALINEA

ALINEA (do francês, *Asservissement Linéaire d'Entré Aut routiére*) é uma estratégia para controle de acesso em rodovias baseada em uma estrutura realimentada derivada do controle clássico. Essa estratégia utiliza a concentração da rodovia como dado de entrada. É utilizado somente um único sensor para medir a concentração a cerca de 40 metros depois do acesso. A Figura 3.8 possibilita demonstrar melhor essa estratégia.

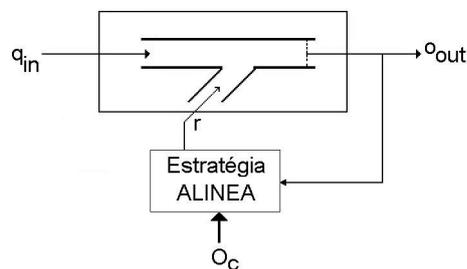


Figura 3.8: Estratégia ALINEA

A equação usada para determinar o volume que será liberado pelo acesso é determinada por:

$$r(k) = r(k-1) + K_R[o_c - o_{out}(k)] \quad (3.2)$$

onde:

$r(k)$ - fluxo de veículos liberado na rampa durante o período de tempo k ;

$r(k-1)$ - fluxo de veículos liberado na rampa durante o período de tempo anterior, $k-1$;

K_R - parâmetro de ajuste (ganho constante);

o_c - concentração (ou ocupação) desejada na rodovia, geralmente é um pouco abaixo da concentração (ou ocupação) crítica;

$o_{out}(k)$ - concentração (ou ocupação) medida no período de tempo k .

Pode-se observar que, se o fluxo da demanda que entra no trecho (q_{in}) é constante, então, de acordo com a lei de realimentação, é fácil observar que em regime permanente o_c será igual a o_{out} ($o_c = o_{out}$). Em outras palavras, seja qual for o valor de fluxo de entrada (q_{in}) constante, a estratégia fará a concentração de veículos na saída do trecho ser igual ao valor de referência.

Similarmente, no caso de pequenas perturbações no fluxo de entrada (q_{in}), a estratégia mantém a concentração na saída do trecho (o_{out}) bem próximo do valor desejado (o_c). Por outro lado, grandes variações de q_i não permitem que o sistema possa se estabilizar. Dessa forma, percebe-se que a estratégia do ALINEA sempre tentará compensar o erro em regime.

A estratégia para controle de acesso ALINEA foi adotada pela sua facilidade de implementação (Chu e Yang, 2003) e também por ser a melhor estratégia dentre as existentes para o controle de acesso (Hadj-Salem et al., 1991). O simulador comercial SITRA-B+ foi utilizado para a aplicação do controle de acesso, porém os resultados obtidos foram insatisfatórios, conforme é apresentado no capítulo a seguir. Com isso, um estudo para modelos de microssimulação foi feito, visando sanar os problemas detectados e, assim, completar os estudos sobre controle de acesso. Isso é apresentado no Capítulo 5.

Capítulo 4

O Simulador Microscópico SITRA-B+

O SITRA-B+ é um software para simulação do tráfego de veículos dentro de áreas urbanas. A simulação do tráfego é microscópica, ou seja, representa o tráfego considerando cada um dos veículos.

O comportamento dos veículos na rede de tráfego simulada resulta da integração, a passo de tempo constante, da equação diferencial - lei de perseguição - que fornece a aceleração de um veículo a partir do comportamento do veículo precedente. Divide-se a duração da simulação em intervalos de tempo, ou passos, definidos pelo usuário e que correspondem a uma discretização do tempo (SODIT, 2002).

Neste capítulo, ao apresentar o modelo de perseguição desenvolvido por Helly (Magne et al., 2000), que é utilizado pelo SITRA-B+, será mostrada a equivalência desse modelo microscópico (perseguição) com um modelo macroscópico. Ou seja, verificar que o modelo de Helly realiza a transição de um modelo de perseguição (*car-following*) para um modelo de comportamento do tráfego (*traffic stream model*). Então, é realizada uma análise do comportamento do simulador em situações em que o controle de acesso é aplicado ao ambiente simulado.

4.1 O modelo de perseguição de veículos

O modelo de perseguição utilizado pelo simulador SITRA-B+ foi desenvolvido por Helly. Nesse modelo, para calcular a aceleração (\ddot{x}_{n+1}), Helly propôs que esta fosse feita por meio da inclusão de termos fundamentados nas características do veículo precedente (velocidade e posição). Dessa forma, para o próximo instante de tempo ($t + T$), do veículo $n + 1$, sua aceleração será:

$$\ddot{x}_{n+1}(t + T) = c_1 \cdot [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] + c_2 \cdot [x_n(t) - x_{n+1}(t) - d] \quad (4.1)$$

em que:

\dot{x}_{n+1} - velocidade do veículo;

\dot{x}_n - velocidade do veículo precedente;

x_{n+1} - posição do veículo;

x_n - posição do veículo precedente;

d - distância de segurança entre o veículo líder e seguidor.

Nota-se, na Equação 4.1, que a velocidade do veículo é alterada somente quando houver uma substancial diferença entre as relações de velocidade e posição (Brackstone e McDonald, 2000). c_1 é um parâmetro de ajuste proporcional usado no controle do resultado obtido na diferença de velocidade entre o veículo líder e o seguidor (n e $n + 1$). Já c_2 é um parâmetro de ajuste proporcional usado no controle da diferença das posições entre o veículo líder e o seguidor.

Sendo assim, a posição do veículo na rodovia é calculada de acordo com a velocidade e o passo de simulação. O passo é determinado antes que a simulação seja iniciada. Com isso,

$$x(t) = \dot{x}(t).T \quad (4.2)$$

onde:

- T é o valor do passo de simulação

A velocidade, \dot{x} , para o próximo instante de tempo ($t + T$) é calculada por:

$$\dot{x}(t + T) = \dot{x}(t) + \ddot{x}(t) \quad (4.3)$$

Se for necessária uma velocidade inicial, esta deverá ser aplicada no início da simulação.

Além dessas variáveis, o modelo de Helly também usa a variável d , que tem a função de determinar a distância que deve ser mantida entre o veículo líder e o seguidor. Essa variável é importante, pois ela fará com que o modelo de perseguição seja compatível com o modelo macroscópico (Magne et al., 2000). Para que a distância entre os veículos seja a desejada e satisfaça as condições mostradas anteriormente, nota-se que:

- o valor de d para quando os veículos estiverem parados na rodovia a uma distância l entre os veículos será:

$$d = f_1(v).v + l \quad (4.4)$$

em que $f_1(v)$ é uma função da velocidade v ;

- para garantir uma distância infinita quando o veículo está na velocidade máxima V_{max} (V_{max} é a velocidade máxima que poderia ser atingida se a velocidade não fosse limitada pelas leis de trânsito), tem-se:

$$d = \frac{f_2(v)}{V_{max} - v} \quad (4.5)$$

Combinando as Equações 4.4 e 4.5, é obtido a equação que fornecerá a distância desejada:

$$d = \frac{v}{V_{max} - v} \cdot f(v) + l \quad (4.6)$$

A solução mais simples para essa equação é substituir o valor de $f(v)$ por uma constante λ , então:

$$d = \frac{v}{V_{max} - v} \cdot \lambda + l \quad (4.7)$$

A relação fluxo-concentração apresentada por meio de diagrama no capítulo 2, possibilita mostrar que o fluxo de veículos (q), no princípio, cresce de acordo com o aumento da concentração. Porém, após um determinado valor de concentração (k_m), o fluxo decresce. Essa primeira parte em que ocorre o crescimento é resultado de aumento da demanda da rodovia dentro dos valores suportados por ela. Na segunda parte, ocorre o decrescimento do fluxo em virtude da saturação da rodovia (nesse caso, o fluxo não tem mais nenhuma influência sobre a concentração). A saturação ocorre quando o fluxo da rodovia tem o mesmo valor da capacidade máxima (q_m) da rodovia (Magne et al., 2000).

Se k_m é a concentração quando o fluxo é máximo, q_m é obtido. Se for considerado que o fluxo também é constante na vizinhança de k_m , pode-se considerar duas condições:

$$q \Big|_{k=k_m} = q_m \quad (4.8)$$

$$\frac{\partial q}{\partial k} \Big|_{k=k_m} = 0 \quad (4.9)$$

Quando a concentração é muito baixa, o espaçamento entre os veículos (*spacing*) torna-se importante. Nesse caso, a velocidade de um dos veículos não está mais ligada à concentração, o único elemento que limita essa velocidade é a velocidade máxima permitida na rodovia V_l . Então:

$$q \Big|_{k=0} = 0 \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial q}{\partial k} \Big|_{k=0} = V_l \quad (4.11)$$

A concentração não pode exceder certo limite k_{jam} que é um valor obtido de acordo com um número máximo de veículos que podem estar contidos dentro de um trecho da rodovia. Essa concentração máxima é obtida quando todos os veículos estão parados, ou seja, nos

casos de congestionamento, então:

$$q \Big|_{k=k_{jam}} = 0 \quad (4.12)$$

O modelo de Helly deverá respeitar as condições mostradas nas Equações 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 para que seja compatível com o modelo macroscópico de tráfego. Com a Equação 4.7, é possível obter a relação velocidade-concentração para o modelo de perseguição criado por Helly. Para isso, em regime permanente, a concentração será:

$$k = \frac{1}{d} \quad (4.13)$$

Substituindo-se a Equação 4.13 na Equação 4.7 e isolando-se a velocidade, têm-se:

$$v = \frac{\left(\frac{1}{k} - l\right) V_{max}}{\lambda + \frac{1}{k} - l} \quad (4.14)$$

Para se obter a relação fluxo-concentração, basta utilizar a Equação 4.14 na equação que determina o fluxo em modelos macroscópicos (2.9),

$$q = k.v \quad (4.15)$$

Então:

$$q = \frac{(1 - k.l).V_{max}}{\lambda + \frac{1}{k} - l} \quad (4.16)$$

Ao ser levado em conta a velocidade limite da via V_l e a concentração k_0 , que é a concentração a partir da qual a velocidade torna-se ligada à concentração da via, têm-se a versão final para as relações representadas pelas Equações 4.14 e 4.16:

Relação velocidade-concentração:

$$v = \begin{cases} V_l, & \text{para } k < k_0 \\ \frac{\left(\frac{1}{k} - l\right) V_{max}}{\lambda + \frac{1}{k} - l}, & \text{para } k \geq k_0 \text{ e } k \leq k_{jam} \end{cases} \quad (4.17)$$

Relação fluxo-concentração:

$$q = \begin{cases} k.V_l, & \text{para } k < k_0 \\ \frac{(1-k.l).V_{max}}{\lambda + \frac{1}{k} - l}, & \text{para } k \geq k_0 \text{ e } k \leq k_{jam} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial q}{\partial k} = \begin{cases} V_l, & \text{para } k < k_0 \\ \frac{\left(\frac{1-k.l}{k}\right)^2 - l\lambda}{\left(\lambda + \frac{1}{k} - l\right)^2} \cdot V_{max}, & \text{para } k \geq k_0 \text{ e } k \leq k_{jam} \end{cases} \quad (4.19)$$

As relações apresentadas nas Equações 4.17, 4.18 e 4.19 satisfazem as condições mostradas nas Equações 4.10, 4.11 e 4.12. Para que a condição mostrada na Equação 4.9 seja satisfeita, então:

$$\lambda = l \cdot \left(\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)^2 \quad (4.20)$$

em que:

$$\alpha = l.k_m$$

k_m é a concentração quando o fluxo de veículos é máximo (q_m).

Para a condição da Equação 4.8 ser satisfeita, então:

$$V_{max} = \frac{q_m \cdot l}{\alpha^2} \quad (4.21)$$

Substituindo-se a Equação 4.21 na Equação 4.20 e isolando-se α na Equação 4.21 é possível obter o valor de λ . Então:

$$\lambda = \frac{V_{max}}{q_m} - 2 \cdot \sqrt{\frac{V_{max} \cdot l}{q_m}} + l \quad (4.22)$$

onde:

- V_{max} - é a velocidade máxima que um veículo pode atingir na rodovia (m/s);
- q_m - é o fluxo máximo de veículos que é suportado pela rodovia ($veic/s$);
- l - é a distância, em metros, entre os veículos quando estes estão parados na rodovia ($\frac{1}{k_{jam}}$).

Tendo então compreendido o comportamento do modelo de perseguição utilizado pelo SITRA-B+, passou-se à implementação, no simulador, de uma rede de tráfego com as características necessárias para a ocorrência do fenômeno da restrição temporária, com o objetivo de estudar o efeito do controle de acesso.

4.2 Avaliação do controle de acesso através de simulador microscópico de tráfego SITRA-B+

A figura 4.1 representa a rede de tráfego simulada. Ela é a seção de uma rodovia onde há a presença de um acesso. Nessa rede de tráfego, há todas as características físicas necessárias para observar o fenômeno da restrição temporária em virtude da dinâmica do tráfego e do comportamento do controle do acesso por meio da estratégia ALINEA.

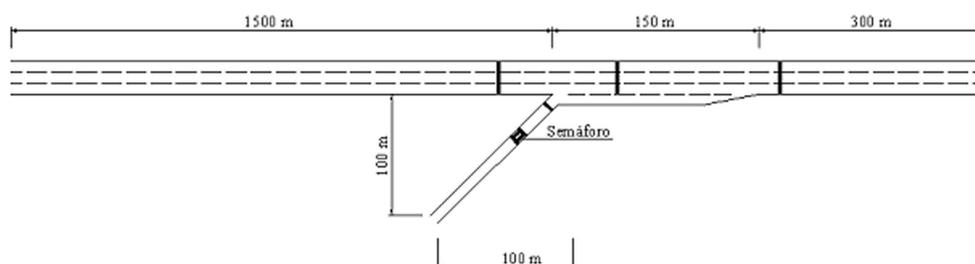


Figura 4.1: Rede de tráfego simulada

Cada uma das faixas, tanto da rodovia quanto do acesso, possui 5 metros de largura. Portanto, a rodovia possui uma largura total de 15 metros enquanto o acesso possui uma largura total de 5 metros. Esse valor de 5 metros de largura para a faixa, apesar de não usual, não é considerado na implementação do fluxo de saturação. Este é determinado pela capacidade máxima definida pelo usuário. A velocidade máxima permitida na rodovia é de 100 km/h, enquanto no acesso a velocidade máxima permitida é de 80 km/h. Por isso, logo após o acesso, há a presença de uma faixa de aceleração para que os carros que vêm do acesso possam atingir a velocidade máxima da rodovia de forma segura, reduzindo, assim, o espaçamento necessário para a realização da inserção. O fluxo de saturação de cada faixa é de 1800 veic/h. Isso faz com que o fluxo de saturação da rodovia seja igual a 5400 veic/h, e o fluxo de saturação do acesso seja de 1800 veic/h.

Ao todo, foram utilizados quatro sensores do tipo laço magnético, possuindo a largura de 1 metro. Três deles (S_M , S_C , S_J) servem para medir o fluxo de veículos que entram e saem da rede de tráfego. O sensor S_A é usado para medir a ocupação da rodovia 40 metros após o início do acesso. Esse sensor S_A é utilizado pela estratégia de controle para determinar a ocupação da rodovia e assim determinar o fluxo de veículos liberados do acesso para a rodovia. A Figura 4.2 permite mostrar de forma mais adequada a posição de cada um dos sensores na rede de tráfego.

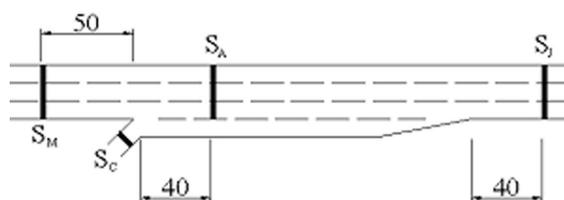


Figura 4.2: Posição dos sensores na simulação

O sensor S_M está colocado a 50 metros antes do acesso. Ele mede o fluxo de veículos a montante do acesso. O sensor S_C está colocado no acesso a 5 metros antes da saída do mesmo. O sensor S_J localizado a 40 metros após a pista de aceleração mede o fluxo de veículos a jusante da rodovia.

Ao serem determinadas as características físicas da via, obtém-se o diagrama fluxo x ocupação para que seja determinada a ocupação crítica da rodovia e, com isso, a ocupação de referência que será utilizada pela estratégia ALINEA. Essa ocupação trata-se da porcentagem de tempo que o sensor permaneceu ocupado no período de um segundo. Para o levantamento da curva fluxo x ocupação, foram introduzidos veículos na rodovia e no acesso por intermédio de etapas; em cada etapa, o fluxo total de veículos é acrescido de 200 veic/h na entrada da rodovia e em 300 veic/h na entrada do acesso. Antes da mudança do fluxo entre as etapas, mede-se o fluxo e a ocupação dos sensores na rodovia, sendo tais informações guardadas em arquivos para serem posteriormente utilizadas na criação do diagrama. Isso foi realizado até ambos os fluxos (da rodovia e do acesso) atingirem o valor de saturação. Na Figura 4.3, é mostrado o diagrama fluxo x ocupação da rede de tráfego simulada, para a posição do sensor S_M .

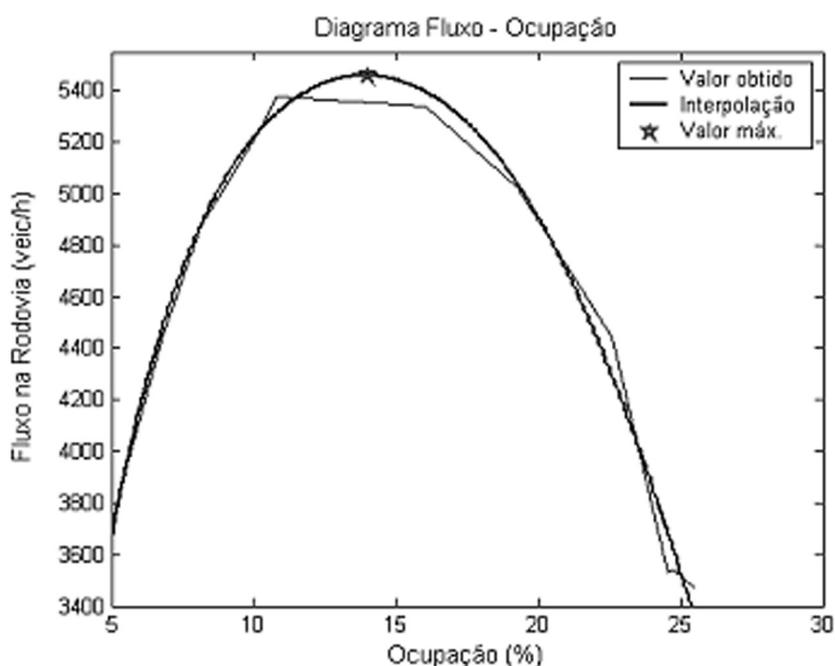


Figura 4.3: Diagrama fluxo-ocupação da rede de tráfego

Para se determinar com maior precisão o valor da ocupação crítica da rodovia, foi realizada uma interpolação de quinto grau da curva obtida por intermédio da ferramenta computacional Matlab (Hanselman e Littlefield, 1999). Foi determinado o valor máximo do fluxo da rodovia, 5520 veic/h, correspondendo à ocupação crítica de 14%. Observa-se que há uma pequena discrepância entre o fluxo de saturação e o fluxo máximo obtido pela interpolação. Contudo, o principal objetivo desse diagrama é a obtenção da ocupação crítica da rodovia que será utilizada pela estratégia ALINEA.

4.3 Resultados obtidos

O tempo total de simulação foi de 7200 segundos, o que equivale a duas horas. O fluxo de veículos que entra na rodovia é mantido constante em 5000 veic/h. No acesso, o fluxo inicial é de 1000 veic/h. A cada 15 minutos este fluxo é acrescido em 250 veic/h até que se atinja o valor de 1750 veic/h. Após atingir este valor, o fluxo de veículos no acesso permanece fluando entre 1500 e 1750 veic/h até o fim da simulação.

Os dados são adquiridos constantemente, e, no fim de cada ciclo do semáforo (fixado em 50 segundos), é calculado o novo tempo de verde a ser aplicado no acesso, por meio da média aritmética das ocupações medidas no sensor S_A . O tempo de verde é calculado por:

$$g(k) = g(k-1) + K'_R [o_c - o_{out}(k)] \quad (4.23)$$

em que:

- $g(k)$ é o tempo de verde aplicado na rampa durante o período de tempo k ;
- $g(k-1)$ é o tempo de verde aplicado na rampa durante o período de tempo anterior, $k-1$;
- K'_R é o novo parâmetro de ajuste (ganho constante);
- o_c é a concentração desejada na rodovia, geralmente um pouco abaixo da concentração crítica;
- $o_{out}(k)$ é a concentração medida no período de tempo k .

O novo parâmetro de ajuste (K'_R) é calculado por:

$$K'_R = K_R \cdot \frac{c}{r_{sat}} \quad (4.24)$$

onde:

- K_R - parâmetro de ajuste (ganho constante) do ALINEA;
- c - ciclo do semáforo;
- r_{sat} - fluxo de saturação da rodovia.

Limites máximos e mínimos de tempo de verde foram aplicados para que a simulação permanecesse de acordo com as boas práticas da engenharia de tráfego. O tempo mínimo de verde é de 12 segundos. Quando o novo valor de verde é menor do que 6 segundos, opta-se por manter o semáforo com indicação vermelha durante todo o ciclo. Quando o valor de verde é maior do que 6 segundos, o semáforo permanece verde durante 12 segundos no ciclo (valor de verde mínimo). Ou seja,

$$r(k) = \begin{cases} 0, & \text{para } g' \leq 6 \text{ s} \\ 12, & \text{para } 6 < g' < 12 \text{ s} \\ g', & \text{para } g' \geq 12 \text{ s} \end{cases} \quad (4.25)$$

Com isso, observando a equação 4.25, obtém-se o novo valor de $g(k)$, sendo g' o valor de $g(k)$ calculado pela equação 4.23.

Duas simulações foram realizadas. Na primeira, a estratégia ALINEA é utilizada e, na segunda, não há a aplicação de ação de controle. Os resultados obtidos após as simulações podem ser observados na Tabela 4.1. É necessário lembrar que o valor da ocupação de referência o_c tem de ser menor do que o valor de ocupação crítica da rodovia, ou seja, menor que 14%. Após simulações com outros valores de referência, menores do que o da ocupação crítica, os melhores valores de fluxo de entrada e saída da rede de tráfego foram obtidos com o_c igual a 13%.

Tabela 4.1: Resultado das simulações

Ciclo	Posição	Fluxo ALINEA (veic/h)	Fluxo Sem Controle (veic/h)	Diferença entre Fluxos (veic/h)
	Montante	4786	4111	14,10%
50s	Acesso	761	1360	-44,04%
	Jusante	5525	5440	1,54%

Observando-se a Tabela 4.1, nota-se que o fenômeno da restrição temporária da capacidade da rodovia é amenizado quando a rede de tráfego sofre a ação de controle, pois a quantidade de veículos que percorre a rede controlada é maior. Nos casos simulados, a diferença a montante (sensor antes do acesso) foi de 675 veic/h, ou 14% maior a favor da estratégia de controle. A diferença a jusante (depois do acesso) foi de 85 veic/h, ou 1,54% a mais. Contudo, percebe-se que os veículos que entraram na rodovia através do acesso são “sacrificados”, pois o fluxo do acesso da rede controlada é 44,04% menor do que o caso sem controle. Esse pequeno ganho global, observado no fluxo total de veículos, de 1,54%, deveria ser muito maior caso o simulador microscópico modelasse com precisão o espaçamento

entre os veículos no trecho da inserção de fluxos, evitando os altos volumes necessários no acesso para provocar o aparecimento do engarrafamento na rodovia.

A ação de controle é observada através dos tempos de verde que são aplicados ao acesso. Na Figura 4.4, tais valores são plotados para cada ciclo. No início da simulação, os valores de verde são altos; contudo, de acordo com o aumento do fluxo de entrada na rede de tráfego (Figura 4.5), esses valores diminuem gradativamente até atingirem a saturação (12 segundos), em alguns casos. Esses valores de saturação foram obtidos em virtude do fluxo, que era aplicado tanto no acesso quanto na rodovia, estar muito próximo do valor de saturação, ou seja, casos extremos. Na Figura 4.4, pode-se perceber que, após atingir o valor de regime (33 minutos após o início da simulação), a ação de controle varia entre 12 e 20 segundos durante toda a simulação. Uma interpolação utilizando-se a ferramenta computacional Matlab é sobreposta para facilitar a observação do comportamento da curva.

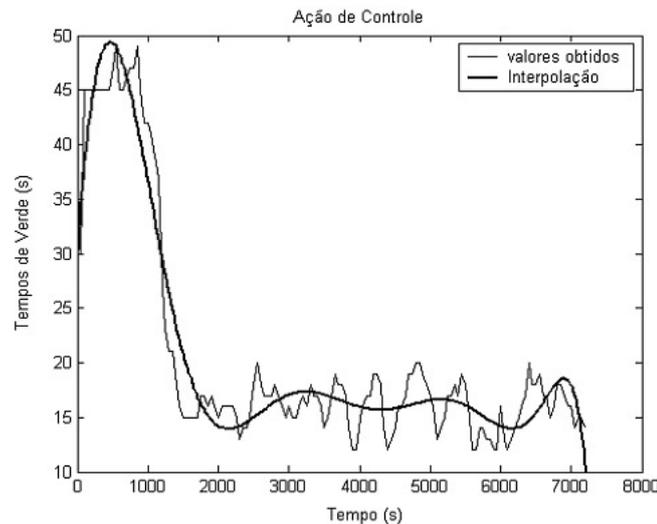


Figura 4.4: Tempos de verde (ação de controle)

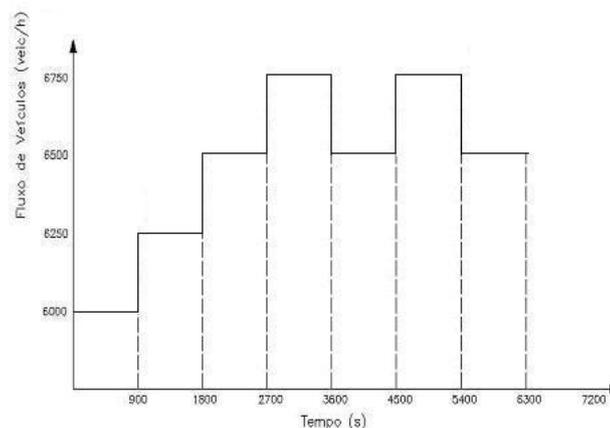


Figura 4.5: Variação do fluxo de entrada da rodovia

Durante as simulações, surgiram evidências de que o simulador SITRA-B possui um modelo de inserção (*merging*) de fluxos muito tolerante. Ou seja, ao realizar a inserção dos fluxos de veículos que vinham da rodovia e da pista de aceleração, foram observadas possíveis colisões que foram ignoradas pelo simulador. A Figura 4.6 apresenta uma dessas colisões. Por isso, os resultados obtidos a respeito dos casos estudados podem ser melhores do que os obtidos, caso esses mesmos estudos sejam simulados com uma ferramenta computacional que seja mais rígida a respeito do modelo de inserção de fluxos.

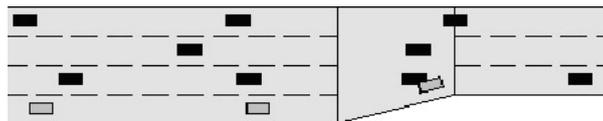


Figura 4.6: Colisões toleradas pelo SITRA-B

A pouca rigidez na inserção de fluxos levou à aplicação extrema dos fluxos de veículos que entram e saem da rede de tráfego, ou seja, para que o fenômeno possa ser observado no simulador SITRA-B+, é necessário fazer com que a rede opere muito próximo da saturação, se não na própria. Isso causa um grande número de veículos parados no acesso por causa do semáforo; para o fenômeno ocorrer na realidade, não necessita de valores tão extremos.

4.4 Conclusões

O uso do controle de acesso, por meio da estratégia de controle ALINEA, para prevenir a restrição temporária da capacidade de uma rodovia, é uma ação de controle que permite manter o fluxo de veículos na rodovia próximo da capacidade (q_{cap}). No simulador microscópico SITRA-B+, tal fenômeno é parcialmente observado quando os valores dos fluxos de entrada da rodovia e do acesso estão muito próximos do seu valor de saturação. Tal situação ocorre porque o modelo de mudança de pista é tolerante a ponto de fazer o usuário da ferramenta computacional suspeitar da ocorrência de colisões durante a manobra de inserção de fluxos. Além disso, os resultados possibilitaram demonstrar que o fluxo de saída da rodovia é maior quando o acesso está sendo controlado, ou seja, q_{con} , que é o fluxo de saída da rodovia sob a ação da restrição temporária da capacidade, é menor que q_{cap} . Foi observada uma diferença de 85 veic/h entre os casos, isto é, uma diferença de 1,54% entre q_{cap} e q_{con} .

A ação de controle (valores dos tempos de verde) tende a estabilizar de acordo com a entrada da rede de tráfego em regime, e conforme observado na Figura 4.4. Isso mostra que a estratégia do ALINEA sempre tende a compensar o erro de regime entre a ocupação desejada e a ocupação medida no sensor.

Neste estudo, verificou-se que a ferramenta computacional SITRA-B+ é capaz de criar, de forma muito fraca, o fenômeno da restrição temporária da capacidade na rodovia. Além disso, também foi possível avaliar o uso do controle de acesso para evitar ou amenizar esse

fenômeno. Porém, não foi observado os prejuízos acarretados ao acesso. Tais prejuízos podem ser grandes, já que há uma diferença de 44% entre os fluxos do acesso com controle e sem controle.

Essa deficiência do simulador motivou o estudo de modelos de inserção de tráfego. No próximo capítulo, apresenta-se o modelo desenvolvido com base no modelo descrito na literatura (Hidas, 2004). Os resultados da aplicação desse modelo são discutidos no capítulo 6.

Capítulo 5

Modelo de Inserção para Simuladores Microscópicos

As manobras de mudança de faixa envolvem uma série de interações entre veículos. Nessas interações, os veículos reagem e tomam decisões a partir das possíveis intenções dos outros veículos que o cercam. As dificuldades na modelagem de tal comportamento do tráfego são conhecidas. Um modelo de inserção de veículos foi proposto por Hidas (2004), tomando por base as observações e análises realizadas a partir de filmagens feitas em trechos de rodovias australianas.

A Figura 5.1 descreve de forma mais compreensível as interações durante uma manobra de mudança de faixa. O veículo sujeito (V_s), localizado na faixa de aceleração, tem a intenção de sair da sua faixa atual (faixa sujeita) e ir para a rodovia (faixa alvo), inserindo-se entre o espaçamento (*gap*) existente entre dois veículos que se encontram na rodovia. Estes são chamados de veículo líder (V_l) e veículos seguidor (V_f).

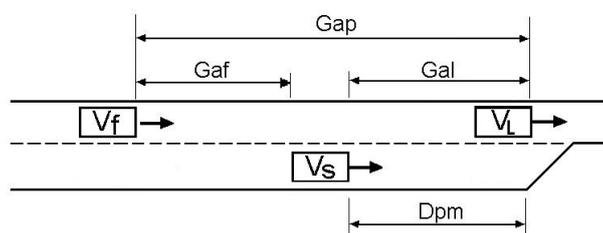


Figura 5.1: Descrição dos elementos necessários para uma de mudança de faixa

A análise mais detalhada dos espaçamentos entre os veículos durante a manobra de mudança de faixa permitiu a classificação de diferentes manobras, sendo as principais:

- mudança de faixa livre (*Free Lane Change*) - neste caso, não há grandes mudanças entre as distâncias dos veículos líder, seguidor e sujeito (veículo que deseja mudar de faixa). Esse fato de não haver grandes mudanças durante as manobras indica que não há interferência na forma de condução entre seguidor e sujeito;

- mudança de faixa forçada (*Forced Lane Change*) - este tipo de mudança de faixa é percebido por mudanças nas distâncias entre os veículos antes e depois da entrada do veículo sujeito. A distância entre os veículos líder e seguidor permanece constante ou sem variações significativas antes da entrada do veículo sujeito. Após a entrada do veículo sujeito, essa distância entre líder e seguidor tende a aumentar, indicando que o veículo sujeito "forçou" o seguidor a diminuir sua velocidade;
- mudança de faixa cooperativa (*Cooperative Lane Change*) - esse tipo é caracterizado por uma mudança nas distâncias antes e depois que o veículo sujeito executa a manobra de mudança de faixa. A distância entre o veículo líder e o seguidor aumenta antes da entrada do veículo sujeito e começa a diminuir logo em seguida, indicando que o seguidor diminuiu a velocidade para permitir que o veículo sujeito entre à sua frente e mude de faixa.

A principal diferença entre esse três tipos de manobras é a natureza da interação entre o veículo sujeito e seguidor. O veículo líder geralmente atua de forma passiva durante a manobra, representando um limite para os veículos sujeito e seguidor. Na mudança de faixa livre, não há interações entre os veículos. Na mudança de faixa forçada, o veículo sujeito trabalha de forma ativa, isto é, o veículo sujeito realiza a manobra de mudança de faixa e depois o seguidor reage diminuindo a velocidade. Na mudança de faixa cooperativa, há três componentes:

1. primeiro, o veículo sujeito indica que deseja realizar a mudança de faixa;
2. então, o seguidor reconhece essa situação, decide cooperar e diminui a velocidade, aumentando a distância entre ele e o veículo líder;
3. finalmente, o veículo sujeito, ao perceber a manobra do veículo seguidor e que o espaço é suficiente para a manobra de mudança de faixa, executa a ação de mudar de faixa.

As diferenças entre a mudança de faixa cooperativa e forçada podem ser ambíguas. Na situação real, pode acontecer que o veículo sujeito inicie a aproximação da faixa desejada, fazendo com que o veículo seguidor diminua a velocidade para evitar a colisão e não para dar passagem ao veículo sujeito que se encontra próximo à faixa desejada. Nesse caso, quanto a uma lógica de ação e reação, esse tipo de mudança de faixa deveria ser classificada como uma mudança de faixa forçada. Em teoria, a distinção entre essas duas classificações de mudança de faixa depende da ordem das decisões feitas pelos dois motoristas.

5.1 Conceitos usados no modelo de mudança de faixa

5.1.1 Critério de viabilidade

O conceito básico da mudança de faixa é ilustrado no diagrama tempo-distância mostrado na Figura 5.2. O veículo sujeito deseja ir para a "faixa alvo", entre o veículo seguidor e o veículo líder. As condições para que a manobra seja segura são definidas como segue.

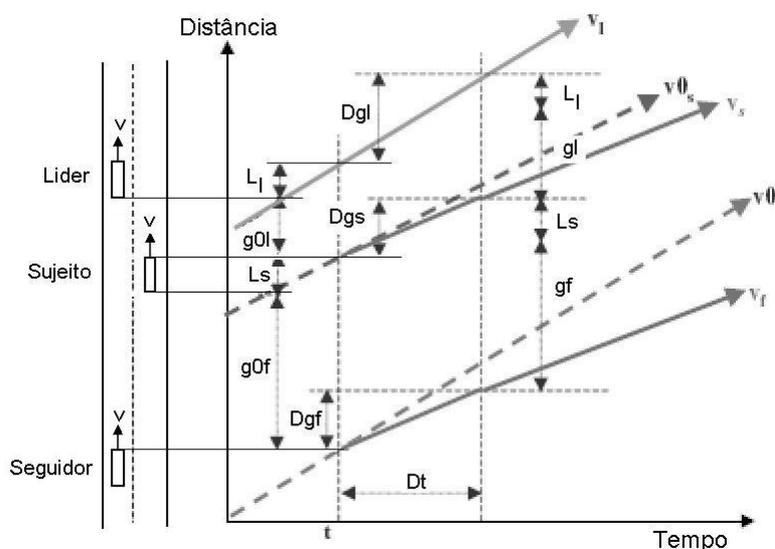


Figura 5.2: Diagrama tempo distância, adaptado de (Hidas, 2004)

O veículo sujeito pode passar para a faixa alvo se, ao final da manobra, as distâncias à frente (g_l) e atrás do veículo (g_f) não forem inferiores a valores aceitáveis:

$$g_l \geq g_{l,min} \text{ e } g_f \geq g_{f,min} \quad (5.1)$$

A distância entre os veículos ao final da manobra pode ser calculada supondo-se uma dada velocidade durante o período de tempo D_t , durante o qual a velocidade permanece constante:

$$g_l = g_{0l} - v_s \cdot D_t + v_l \cdot D_t \quad (5.2)$$

$$g_f = g_{0f} - v_f \cdot D_t + v_s \cdot D_t \quad (5.3)$$

em que:

- v_s - velocidade do veículo sujeito;
- v_l - velocidade do veículo líder;
- v_f - velocidade do veículo seguidor;

Se o veículo sujeito usa uma desaceleração (ou aceleração) b_s durante a manobra e supondo-se que o veículo seguidor poderá frear por uma desaceleração b_f em que $b_f \ll b_{max}$, então:

$$g_l = g_{0l} - \left(v_s \cdot D_t - \frac{b_s}{2 \cdot D_t^2} \right) + v_l \cdot D_t \quad (5.4)$$

$$g_f = g_{0f} - \left(v_f \cdot D_t - \frac{b_f}{2 \cdot D_t^2} \right) + \left(v_s \cdot D_t - \frac{b_s}{2 \cdot D_t^2} \right) \quad (5.5)$$

No simulador utilizado por Hidas, a mudança de faixa ocorre de forma instantânea, então D_t pode ser substituído por 1 segundo. Então:

$$g_l = g_{0l} - \left(v_s - \frac{b_s}{2} \right) + v_l \quad (5.6)$$

$$g_f = g_{0f} - \left(v_f - \frac{b_f}{2} \right) + \left(v_s - \frac{b_s}{2} \right) \quad (5.7)$$

Os valores mínimos de distâncias que são aceitáveis dependem do comportamento dos motoristas e de considerações para cada um dos três casos a seguir.

5.1.2 Critério de viabilidade para mudança de faixa livre

Para esse caso, é necessário que, ao final da manobra, as distâncias entre os veículos sejam pelo menos iguais a um valor determinado de acordo com as suas velocidades:

$$g_{l,min} = g_l(v_l) \text{ e } g_{f,min} = g_f(v_s) \quad (5.8)$$

Esse critério é apropriado para as condições de trânsito livre, quando os veículos têm muitas oportunidades para mudar de faixa, e a mudança não for urgente; conseqüentemente, eles devem ser capazes de aguardar até que essa condição favorável ocorra.

5.1.3 Critério de viabilidade para mudança de faixa cooperativa

As condições que levam à decisão do veículo seguidor em reduzir a sua velocidade para permitir que o veículo sujeito mude de faixa depende da possibilidade de que, ao reduzir sua velocidade, o veículo sujeito irá realmente mudar de faixa. Para isso, é considerado que haverá um período de desaceleração D_t que será calculado com base em uma taxa de desaceleração b_f e um determinado valor de velocidade D_v .

$$D_t = \frac{D_v}{b_f} \quad (5.9)$$

Esse tempo de desaceleração pode ser maior do que o passo da simulação, então o veículo seguidor deverá considerar que o veículo sujeito irá percorrer todo o trajeto até a mudança de faixa em velocidade constante. A distância entre o veículo seguidor e sujeito no tempo $t + D_t$ é dada por:

$$g_f = g_{0f} - \left(v_f \cdot D_t - \frac{b_f}{2 \cdot D_t^2} \right) + v_s \cdot D_t \quad (5.10)$$

É possível diminuir a velocidade se a distância entre os veículos, ao final da manobra, for pelo menos igual a um valor mínimo aceitável:

$$g_{f,min} = g_{min} + \begin{cases} c_f \cdot (v_f - v_s), & \text{se } v_f > v_s \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.11)$$

em que g_{min} é a distância mínima de segurança que o veículo seguidor deverá estar do veículo líder no momento da mudança de faixa do veículo sujeito. Essa variável g_{min} é independente da diferença de velocidade entre o veículo seguidor e veículo sujeito, mas c_f é um ganho proporcional que serve para corrigir os valores de velocidade, já que este é dado em metros por segundo.

Já a condição mostrada na Equação 5.11 é usada pelo veículo seguidor para que este decida se reduzirá ou não a sua velocidade para a entrada do veículo sujeito à sua frente. Ao mesmo tempo, o veículo sujeito também deverá avaliar a possibilidade da manobra; para ele, as distâncias mínimas também serão calculadas da mesma forma que na equação 5.11, porém com base no veículo líder:

$$g_{l,min} = g_{min} + \begin{cases} c_l \cdot (v_s - v_l), & \text{se } v_s > v_l \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.12)$$

onde c_l tem uma função de proporcionalidade.

Essa situação significa que, ao final da manobra de mudança de faixa, os veículos estarão mais próximos um do outro do que se estivessem sendo regidos por um modelo de perseguição. Então, o veículo seguidor reduz a sua velocidade durante alguns segundos após a entrada do veículo sujeito na faixa desejada, para que as distâncias dos envolvidos na manobra voltem a ser compatíveis com a velocidade em que os veículos se encontram. Note-se que, durante as manobras para mudança de faixa, os motoristas aceitam o risco de diminuir a distância entre eles (supondo-se que nenhuma parada de emergência irá ocorrer), para que seja possível a inserção de mais um veículo na faixa.

5.1.4 Critério de viabilidade para mudança de faixa forçada

Os critérios para o processo de cálculo da mudança de faixa forçada são idênticos aos da mudança de faixa cooperativa. A diferença é que, no caso de mudança de faixa forçada, o

veículo sujeito toma a decisão de realizar os cálculos das distâncias e, também, de diminuir a velocidade para a realização da manobra de mudança de faixa.

5.2 Cálculo da aceleração de inserção

Além de avaliar a possibilidade de se realizar a mudança de faixa, o veículo seguidor ou sujeito precisa modificar o seu comportamento, em alguns casos, a fim de que as distâncias necessárias para a mudança de faixa sejam alcançadas. Por exemplo, considere-se a Figura 5.3, em que o veículo sujeito (V_s) deseja ir até a faixa alvo, contudo o veículo sujeito encontra-se ao lado de um veículo que já se encontra na rodovia (veículo líder), se os dois veículos trafegam em velocidade muito próxima uma da outra, a inserção do veículo sujeito na rodovia não será possível.

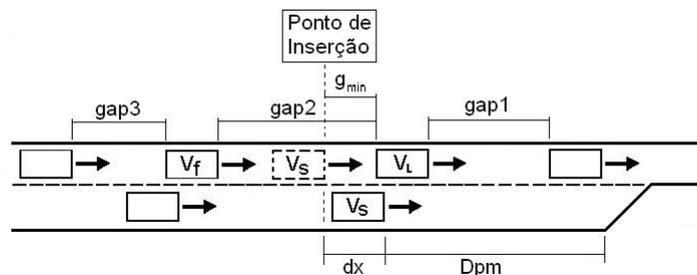


Figura 5.3: Localização do ponto de inserção para o veículo sujeito.

Por isso, nessas situações, o veículo sujeito deve tomar a decisão de entrar na rodovia à frente ou atrás desse veículo que, no momento, encontra-se ao seu lado. Com isso, há uma modificação da sua velocidade, a fim de que, no momento em que ele atinja o ponto para a inserção na rodovia, todas as condições de distâncias de segurança estejam satisfeitas e, assim, a manobra seja viável.

O procedimento para a execução do cálculo dessa aceleração de inserção é apresentado na Figura 5.4, localizada ao final deste capítulo, onde são apresentadas de forma resumida cada uma das etapas.

1. *selecionar a primeira brecha (Gap)*: o processo começa pela seleção da distância entre o líder e o seguidor que se encontram ao lado do veículo sujeito;
2. *verificar as distâncias entre os veículos*: se a distância entre o líder e o seguidor for menor do que alguma das distâncias mínimas necessárias entre o seguidor e o líder, mais o comprimento do veículo sujeito, então o processo vai para o item 5;
3. *calcular a aceleração para alcançar o ponto de inserção*: a distância até o ponto de inserção, para que seja calculada a aceleração necessária, será a distância mínima até o pára-choque traseiro do veículo líder, ou a distância mínima até o veículo seguidor mais

a distância até o pára-choque dianteiro do veículo seguidor, ou zero, caso as distâncias dos veículos líder e seguidor sejam bem maiores do que as mínimas requeridas e o veículo sujeito esteja localizado dentro dessas distâncias. Com a definição da distância até o ponto de inserção, a aceleração de inserção é calculada, sendo considerado que as velocidades do líder e do seguidor permanecerão constantes até o final da manobra e considera também a distância até o final da faixa de aceleração. Os valores são ajustados no veículo sujeito para o próximo passo de simulação, e esse processo é repetido no próximo intervalo de tempo de simulação até que a manobra seja completada;

4. *avaliar a viabilidade da ação:* neste passo, ocorre a avaliação da manobra, pois o veículo deverá realizar a mudança de faixa antes que chegue ao final da faixa de aceleração. Com o valor de aceleração calculado, é verificado se o sujeito irá completar a mudança de faixa antes do final da faixa de aceleração. Caso contrário, o cálculo da aceleração será realizado para a próxima distância entre líder e seguidor;
5. *selecionar a próxima distância:* a próxima distância é selecionada a jusante, caso a velocidade dos veículos da rodovia esteja menor do que a velocidade do veículo sujeito. Caso contrário, a próxima distância selecionada será a montante. O processo será terminado caso uma manobra viável seja encontrada ou a visibilidade seja alcançada. Se o processo não localiza nenhuma manobra viável, deverá ser feito novamente no próximo intervalo de tempo.

5.2.1 Mudança de faixa forçada

A decisão do momento em que o veículo sujeito deverá forçar o veículo seguidor a dar a passagem é realizada durante o cálculo da aceleração de inserção e envolve duas situações:

1. o veículo sujeito decide quando deseja forçar a mudança de faixa. Isso é feito uma vez no começo do cálculo de inserção e dependerá da "urgência" da manobra: se o tempo estimado para o veículo sujeito atingir o fim da faixa de aceleração (*End-of-Lane*, T_{EOL}) for menor do que 10 segundos, o veículo sujeito tentará forçar passagem na frente do veículo seguidor;
2. se a condição de tempo dita anteriormente for verdadeira, para cada distância testada no item 3, da Figura 5.4, é verificada a possibilidade do seguidor desacelerar. Essa verificação ocorre por meio da decisão do seguidor a respeito da *necessidade e possibilidade* da mudança forçada. Portanto, a desaceleração do seguidor para inserção forçada é considerada uma opção se a distância do veículo seguidor for positiva (ou seja, o sujeito está na frente do seguidor) e menor do que a distância mínima necessária para a mudança de faixa.

Se o veículo sujeito decide por forçar a mudança de faixa, será usada a redução máxima da velocidade do seguidor (D_{vf}) e a desaceleração máxima para a mudança de faixa forçada, b_{ff} . No entanto, antes desses valores serem finalmente ajustados ao veículo seguidor, é realizada uma avaliação da viabilidade dessa manobra. Caso a manobra seja viável, esses valores serão passados ao seguidor.

5.2.2 Mudança de faixa cooperativa

Se um veículo é classificado durante uma manobra de mudança de faixa como seguidor, uma aceleração é calculada para que seja executada uma manobra de mudança de faixa cooperativa. O cálculo dessa aceleração segue o mesmo caminho do fluxograma da Figura 5.4, e são inclusos os seguintes passos:

1. verifica se o veículo sujeito necessita de cooperação. Isso é feito se a distância entre sujeito e seguidor for positiva e se essa distância é menor que do que a requerida para a mudança de faixa segura;
2. se a cooperação é necessária, o veículo seguidor selecionará a redução máxima de velocidade para a inserção cooperativa (D_{vc}), por intermédio da desaceleração b_{fc} ;
3. usando os valores selecionados, o seguidor avalia a viabilidade da ação, prevendo se as distâncias, ao final da manobra, terão as condições necessárias para a manobra e se o veículo sujeito não atingiu o final da faixa de aceleração. Se a ação for viável, os valores de aceleração serão ajustados no veículo seguidor. Caso contrário, a cooperação será recusada em virtude da à inviabilidade da manobra, e o processo será terminado.

5.3 Modelo de inserção proposto

Um modelo baseado na proposta de Hidas (2004) foi aplicado dentro do modelo de perseguição de veículos do SITRA-B+. Essa proposta segue o mesmo conceito de mudança de faixa forçada e cooperativa explicitadas na seção 5.1, além de utilizar os mesmos critérios de viabilidade para a manobra de mudança de faixa. A ferramenta computacional utilizada para implementar essa proposta foi o MatLab.

Pela Figura 5.5 localizada ao final deste capítulo, é possível compreender o funcionamento dessa proposta. Nela, há uma visão geral sobre como o modelo proposto foi implementado na ferramenta computacional MatLab (Hanselman e Littlefield, 1999).

Assim como no simulador microscópico SITRA-B+, a duração de uma simulação é dividida em intervalos de tempo, ou passos, que correspondem a uma discretização do tempo. Em cada incremento de tempo dado pelo passo de simulação, são realizadas as seguintes etapas conforme explicado a seguir.

5.3.1 Verifica a entrada de veículos na rodovia

Dependendo do fluxo que é aplicado na rodovia, uma rotina calcula a frequência de entrada de veículos. Após cada instante de tempo, esse valor atual é comparado com um valor de tempo calculado pela rotina, que define o momento em que o veículo deve ser introduzido na rodovia. Se tais valores (tempo atual e tempo calculado) forem iguais, um novo veículo é introduzido. Caso contrário, nenhum veículo é introduzido, e a próxima etapa (entrada de veículos no acesso) é executada. Ao colocar um novo veículo na rodovia, a velocidade inicial deve ser ajustada de tal forma que, caso o veículo precedente estiver parado, haja espaço suficiente para que não ocorra colisão entre o novo veículo e o veículo à sua frente.

5.3.2 Verifica a entrada de veículos no acesso

O controle da entrada de veículos no acesso ocorre de forma igual ao aplicado para o controle de entrada na rodovia. A rotina calcula a frequência de entrada de veículos de acordo com o fluxo desejado. Caso o valor calculado pela rotina seja igual ao tempo de simulação, um novo veículo entra no acesso, e a próxima etapa (atualização dos estados) é executada. Caso contrário, nenhum veículo entra no acesso. A mesma restrição de velocidade inicial em virtude da distância do veículo precedente que ocorre na etapa anterior (entrada de veículo na rodovia) deve ser levada em consideração nessa etapa. No apêndice A, está a rotina de entrada de veículos, tanto no acesso quanto na rodovia, implementada na ferramenta computacional MatLab.

5.3.3 Atualização dos estados

Na atualização dos estados, todas as variáveis de estado (posição, velocidade, aceleração, espaçamento e concentração) de cada um dos veículos da rede de tráfego são ajustadas conforme o modelo de perseguição. Além disso, nessa etapa, são realizados os processos de avaliação e execução das inserções dos veículos da faixa de aceleração para a rodovia. A Figura 5.6, que está colocada ao final deste capítulo, permite mostrar que a atualização das variáveis de estados dos veículos da rede de tráfego é considerada finalizada quando o contador interno da rotina de atualização for igual à quantidade total de veículos na rede de transporte; essa atualização é realizada de forma alternada, ou seja, logo após atualizar um veículo da rodovia, um veículo do acesso deverá ser atualizado e vice-versa. Quando as atualizações são realizadas de forma alternada, deve-se tomar medidas que previnam o travamento da atualização dos estados para o caso em que todos os veículos da rodovia ou do acesso sejam atualizados antes que o contador interno tenha um valor igual à quantidade de veículos que se encontram na rede de tráfego simulada. Por exemplo, sempre que um veículo do acesso é atualizado, um FLAG é acionado para indicar que determinado veículo já teve todas as suas

variáveis de estado atualizadas. Com isso, sempre que os veículos do acesso são atualizados, a rotina de atualização verifica se todos os veículos do acesso já foram atualizados, pois, caso isso já tenha ocorrido, somente os veículos da rodovia continuarão a ser atualizados, até que o contador interno tenha o valor da quantidade total de veículos na rede de tráfego. No apêndice B, encontra-se a linha de código implementada no MatLab.

Quando o veículo a ser atualizado está na rodovia, o primeiro quesito necessário é saber se esse é o veículo líder da rodovia. Em caso afirmativo, as variáveis de posição, velocidade e aceleração são ajustadas de forma que faça com que este atinja a velocidade máxima permitida na rodovia, já que, nesse caso não há veículo precedente que interfira no comportamento desse veículo. Após ajustar esses valores, o contador interno é atualizado e o processo de atualização continua até que todos os veículos sejam atualizados. Em caso negativo, isto é, o veículo que está sendo atualizado na rodovia não é o líder da rodovia, o veículo precedente é localizado, o valor da variável “d” é calculado, a posição, a velocidade e a aceleração são recalculadas, conforme mostrado no capítulo 4. Ainda antes de atualizar o contador interno e dar continuidade à etapa de atualização dos estados, as variáveis espaçamento e concentração local são atualizadas.

Quando a atualização a ser realizada é de um veículo localizado no acesso, o primeiro quesito observado é se esse é o veículo líder do acesso. Se esse veículo não for o líder, um processo semelhante ao que é realizado na rodovia ocorre, pois o veículo precedente é localizado, e as variáveis posição, velocidade e aceleração são atualizados conforme a lei de perseguição utilizado pelo modelo. O contador interno é atualizado, e a etapa de atualização dos estados continua até que todos os veículos estejam atualizados. Caso o veículo que está sendo atualizado seja o líder, mas não estiver localizado na faixa de aceleração, as variáveis de posição, velocidade e aceleração são atualizadas, levando-se em conta o final da faixa de aceleração. Contudo, se esse veículo estiver na faixa de aceleração, a viabilidade de inserção da faixa de aceleração para a rodovia passa a ser verificada. Para isso, o veículo líder e o seguidor são localizados. Assim, a distância atual entre o veículo sujeito e seguidor (G_{af}) e a distância atual entre o veículo sujeito e líder (G_{al}) são calculadas. Se a distância atual G_{af} for maior ou igual à distância entre veículo sujeito e seguidor para mudança de faixa livre (G_{fff}) e a distância atual G_{al} for maior ou igual à distância entre veículo sujeito e líder para mudança de faixa livre (G_{ffl}), a inserção do veículo sujeito da faixa de aceleração para a rodovia é realizada, o contador interno é atualizado e o processo de atualização continua até que todos os veículos sejam atualizados.

Se as distâncias G_{al} e G_{af} não satisfizerem as condições para a ocorrência de uma mudança de faixa livre, a diferença de velocidade entre veículo sujeito e veículo líder (Equação 5.13) e a diferença de velocidade entre veículo sujeito e veículo seguidor (Equação 5.14) são calculadas (ver Figura 5.7, ao final deste capítulo). Além dessas duas equações, o cálculo da distância do veículo sujeito até o final da faixa de aceleração ($Acel_end$) também é calculado:

$$D_{vl} = V_{sujeito} - V_{lider} \quad (5.13)$$

$$D_{vf} = V_{sujeito} - V_{seguidor} \quad (5.14)$$

em que:

$V_{sujeito}$ - Velocidade do veículo sujeito;

V_{lider} - Velocidade do veículo líder;

$V_{seguidor}$ - Velocidade do veículo seguidor.

O cálculo das diferenças entre as velocidades auxilia na determinação da distância de segurança do veículo sujeito em relação ao veículo líder e seguidor, já que, no caso do veículo sujeito estar com velocidade maior que a do veículo líder, deverá haver uma distância maior para a inserção. Caso a velocidade do veículo sujeito seja menor que a do veículo líder, não há a necessidade de uma distância maior, somente o suficiente para que seja mantida a segurança da manobra. As Equações 5.16 e 5.15 descrevem de forma mais clara a definição da distância necessária entre os veículos, para que a inserção do veículo da faixa de aceleração para a rodovia seja viável:

$$GF_{min} = g_{minf} + \begin{cases} C_f \cdot (V_{seguidor} - V_{sujeito}), & \text{se } D_{vf} < 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.15)$$

$$GL_{min} = g_{minl} + \begin{cases} C_l \cdot (V_{sujeito} - V_{lider}), & \text{se } D_{vl} > 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.16)$$

Essas equações são muito semelhantes às Equações 5.11 e 5.12, que foram apresentadas na seção 5.1.3. A maior diferença está na existência de duas distâncias de segurança mínima distintas. Uma considera a distância em relação ao veículo seguidor (g_{minf}) e a outra considera a distância em relação ao veículo líder (g_{minl}). Com a definição das distâncias de segurança necessárias para a manobra de inserção, tais valores são comparados com as distâncias atuais do veículo sujeito em relação aos veículos líder e seguidor. Caso as distâncias atuais sejam maiores ou iguais às distâncias calculadas nas Equações 5.16 e 5.15, a inserção da faixa de aceleração para a rodovia será realizada, o contador interno atualizado e a atualização dos veículos da rede continuará até que todos os veículos estejam atualizados. Caso contrário, isto é, as distâncias atuais sejam menores do que as distâncias necessárias, o veículo sujeito atualizará os dados de sua posição, velocidade, aceleração e o quanto falta para chegar até o final da faixa de aceleração (levando em conta a possibilidade de chegar até o fim da faixa de aceleração) e, logo depois, iniciará a uma busca por um espaço que permita a sua inserção na rodovia. Para iniciar esta busca, é necessário decidir qual será o tipo de inserção a ser realizada. Na proposta implementada, a decisão sobre o tipo de inserção ocorre dependendo da localização do veículo na faixa de aceleração, conforme explicado a seguir.

5.3.3.1 Mudança de faixa forçada

Se o resultado do cálculo da distância do carro ao final da faixa de aceleração ($Acel_end$) indicar que o veículo está a uma distância menor do que um valor ajustado na variável Lim_ultra , o veículo irá realizar uma mudança de faixa forçada na rodovia; caso contrário, será realizada uma mudança de faixa cooperativa. Contudo, deve-se observar que, para que as manobras de mudança de faixa sejam executadas, a velocidade do veículo sujeito deverá ser menor do que a velocidade do veículo líder. Portanto, quando essas duas condições (localização na faixa de aceleração e diferença de velocidade entre sujeito e líder) são satisfeitas para a execução de uma mudança de faixa forçada, são calculados os valores de período de desaceleração da manobra forçada (D_{tf}), distância entre os veículos sujeito e seguidor para uma manobra de inserção forçada (G_{if}) e a distância percorrida pelo veículo sujeito durante a manobra (Dp_{mf}). Tais valores são calculados tendo como referência o primeiro espaço (entre veículo líder e seguidor) em que o veículo sujeito pode ser inserido. Os valores de período de desaceleração e de distância entre os veículos sujeito e seguidor para uma manobra de inserção forçada são calculados conforme as equações mostradas na seção 5.1.3. A Equação 5.18 e 5.17 são as equações implementadas no modelo proposto e são equivalentes às equações 5.10 e 5.9, respectivamente:

$$D_{tf} = \frac{D_{vf}}{b_{ff}} \quad (5.17)$$

$$G_{if} = GF_{min} - \left(V_{seguidor} \cdot D_{tf} - \frac{b_{ff}}{2 \cdot D_{tf}^2} \right) + V_{sujeito} \cdot D_{tf} \quad (5.18)$$

$$Dp_{mf} = D_{tf} \cdot V_{sujeito} \quad (5.19)$$

em que:

D_{tf} - é o período de desaceleração da manobra forçada;

D_{vf} - é o valor de redução máxima de velocidade que pode ser aplicada ao veículo seguidor durante uma inserção forçada;

b_{ff} - é o valor da desaceleração que é aplicada ao veículo seguidor durante uma inserção forçada;

$V_{sujeito}$ é a velocidade do veículo sujeito;

$V_{seguidor}$ é a velocidade do veículo seguidor.

Com o resultado das variáveis que demonstram as distâncias entre os veículos durante a manobra de mudança de faixa forçada, é realizada a comparação com os valores de distâncias de segurança necessárias para a execução da manobra e com a posição final na faixa de

aceleração. Caso a manobra seja viável, será ajustado ao veículo seguidor o valor de desaceleração para inserção forçada (b_{ff}), o contador interno será atualizado e a etapa de atualização continua até que todos os veículos da rede de tráfego sejam atualizados. Se a comparação mostrar que a manobra não é viável, o veículo sujeito irá testar o espaço seguinte, recalculando os valores de G_{af} e G_{if} , comparando-os novamente com os valores de segurança. São realizadas três tentativas para tentar realizar a mudança de faixa forçada. Caso nenhuma das três tentativas tenha sucesso, o contador interno será atualizado, a etapa de atualização continuará até que todos os veículos sejam atualizados e, no próximo instante de tempo, uma nova tentativa ocorrerá.

5.3.3.2 Mudança de faixa cooperativa

Se o veículo sujeito estiver localizado na faixa de aceleração em uma região em que a mudança de faixa cooperativa pode ser realizada, o processo para a aplicação dos testes de viabilidade para essa manobra será realizado. Na Figura 5.8, localizada ao final deste capítulo, é possível perceber que, assim como na mudança de faixa forçada, é calculado o período de desaceleração da manobra cooperativa (D_{tc}), a distância entre os veículos sujeito e seguidor para manobra de mudança de faixa cooperativa (G_{ic}) e a distância percorrida pelo veículo sujeito durante a manobra cooperativa (Dp_{mc}).

Semelhante ao que ocorre na mudança de faixa forçada, têm-se:

$$D_{tc} = \frac{D_{vc}}{b_{fc}} \quad (5.20)$$

$$G_{ic} = GF_{min} - \left(V_{seguidor} \cdot D_{tc} - \frac{b_{fc}}{2 \cdot D_{tc}^2} \right) + V_{sujeito} \cdot D_{tc} \quad (5.21)$$

$$Dp_{mc} = D_{tc} \cdot V_{sujeito} \quad (5.22)$$

em que:

D_{tc} - é o período de desaceleração da manobra cooperativa;

D_{vc} - é o valor de redução máxima de velocidade que pode ser aplicada ao veículo seguidor na inserção cooperativa;

b_{fc} - é o valor da desaceleração que é aplicada ao veículo seguidor na inserção cooperativa;

$V_{sujeito}$ é a velocidade do veículo sujeito;

$V_{seguidor}$ é a velocidade do veículo seguidor.

Com o resultado das variáveis G_{ic} e Dp_{mc} , é feita a comparação com os valores de distâncias de segurança necessárias para a execução da manobra e com a posição final na faixa de aceleração. Se a manobra é viável, o veículo seguidor tem a sua aceleração ajustada para o valor de desaceleração para inserção cooperativa (b_{fc}), o contador interno é atualizado e a etapa de atualização continua até que todos os veículos da rede sejam atualizados. Se a comparação mostrar que a manobra não é viável, o veículo sujeito testa o espaço seguinte por meio do recálculo dos valores de G_{af} e G_{ic} . Compara-os, novamente, com os valores de segurança e verifica a viabilidade da manobra. São realizadas três tentativas para tentar realizar a mudança de faixa cooperativa. Caso nenhuma das três tentativas tenha sucesso, o contador interno será atualizado, a etapa de atualização continuará até que todos os veículos sejam atualizados e, no próximo instante de tempo, nova tentativa de inserção acontecerá.

5.4 Diferenças Entre as Propostas

Apesar de utilizarem as mesmas definições a respeito do tipo de mudança de faixa, há três diferenças entre o modelo de inserção proposto por Hidas (2004) e o modelo implementado no MatLab:

- no modelo implementado, quando vários veículos localizam-se na faixa de aceleração, somente ao veículo líder do acesso é dada a chance de procurar uma possibilidade de mudar de faixa ou de realizar tal manobra;
- a mudança de faixa é realizada somente se a velocidade do veículo sujeito for menor que a velocidade do veículo líder;
- o veículo sujeito do modelo implementado seleciona o tipo de mudança de faixa de acordo com a sua localização na faixa de aceleração.

A opção de dar o direito de mudar de faixa ao veículo líder do acesso, deixando os demais veículos seguirem uns aos outros até que o líder mude de faixa, foi implementada dessa forma, pois essa é uma característica que predomina entre os motoristas quando têm a intenção de mudar de faixa. Além disso, houve o desejo de se criar um critério de justiça no momento em que os veículos entram na faixa de aceleração.

A mudança de faixa ocorre quando o veículo sujeito está mais lento do que o veículo líder, para fazer com que haja um melhor aproveitamento da pista de aceleração, pois quando o veículo que está na pista de aceleração está mais rápido que os demais, ele sempre procura aproveitar ao máximo essa situação para poder ganhar tempo (pelo fato de estar mais rápido) e realizar a inserção, ultrapassando a maior quantidade de veículos possível que se encontram na rodovia.

A escolha do tipo de mudança de faixa dependendo da localização do veículo sujeito na faixa de aceleração foi implementada dessa forma em razão da facilidade de ser implementada no simulador no MatLab. Nos experimentos realizados, o veículo sujeito somente faz uma mudança de faixa forçada quando encontra-se a 25 metros do final da faixa de aceleração.

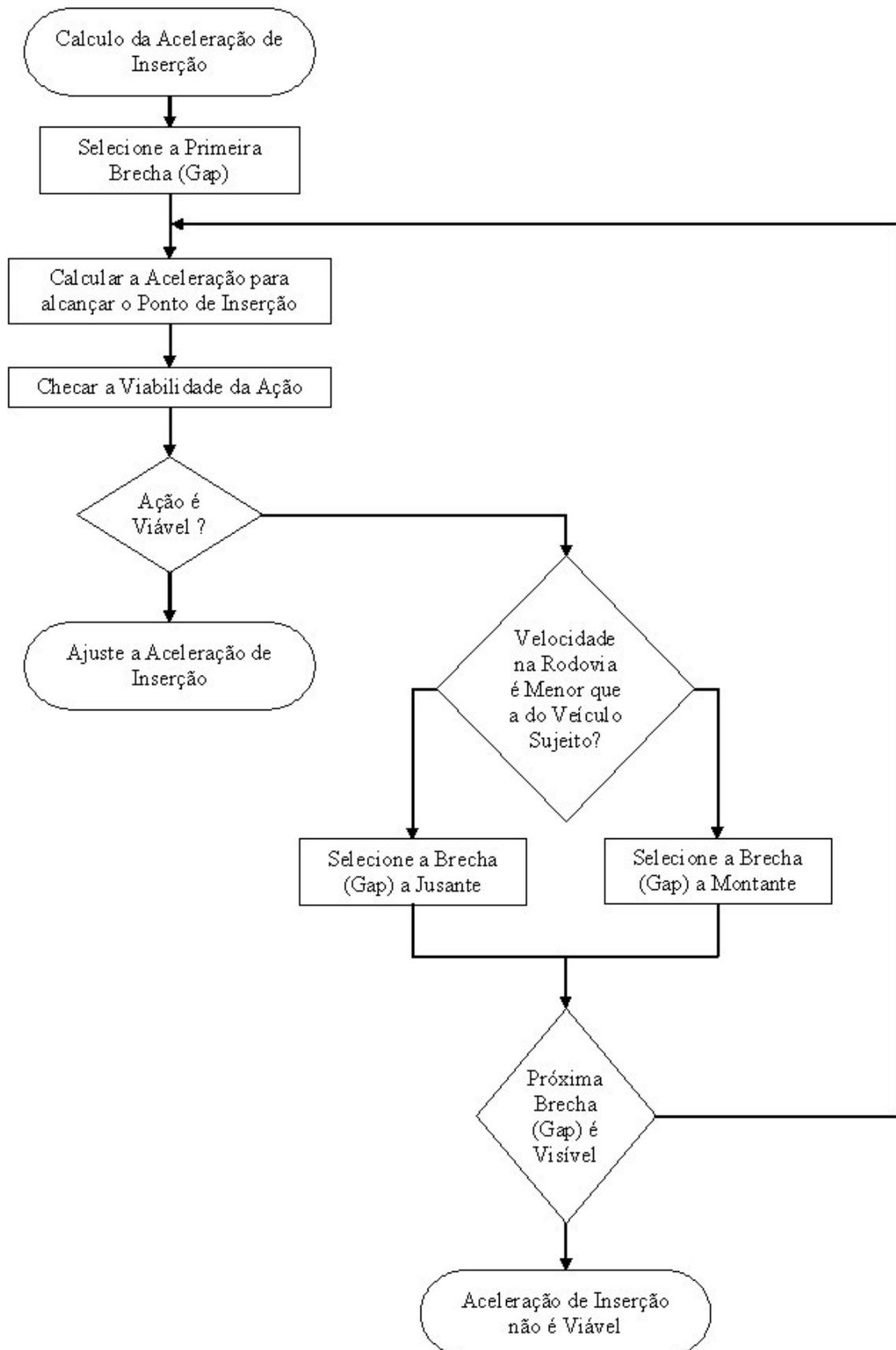


Figura 5.4: Fluxograma do calculo da aceleração de inserção.

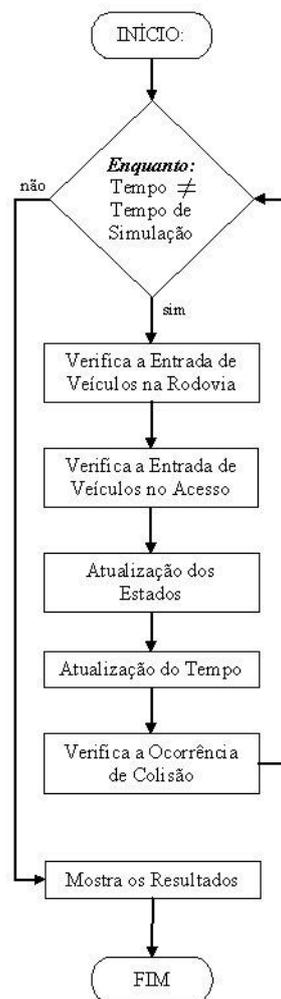


Figura 5.5: Fluxograma geral do modelo de inserção aplicado ao modelo de perseguição

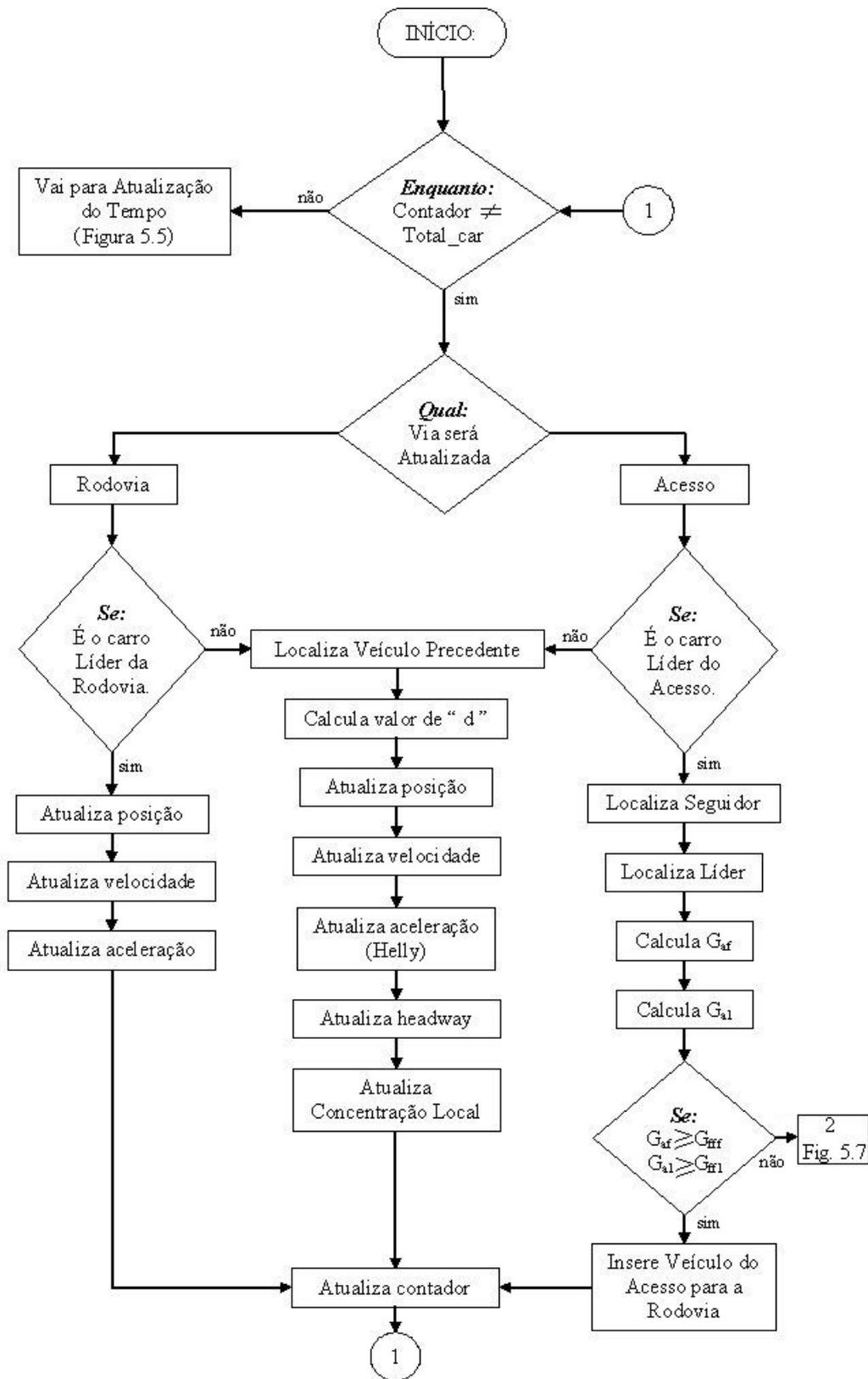


Figura 5.6: Fluxograma da etapa da atualização dos estados (a)

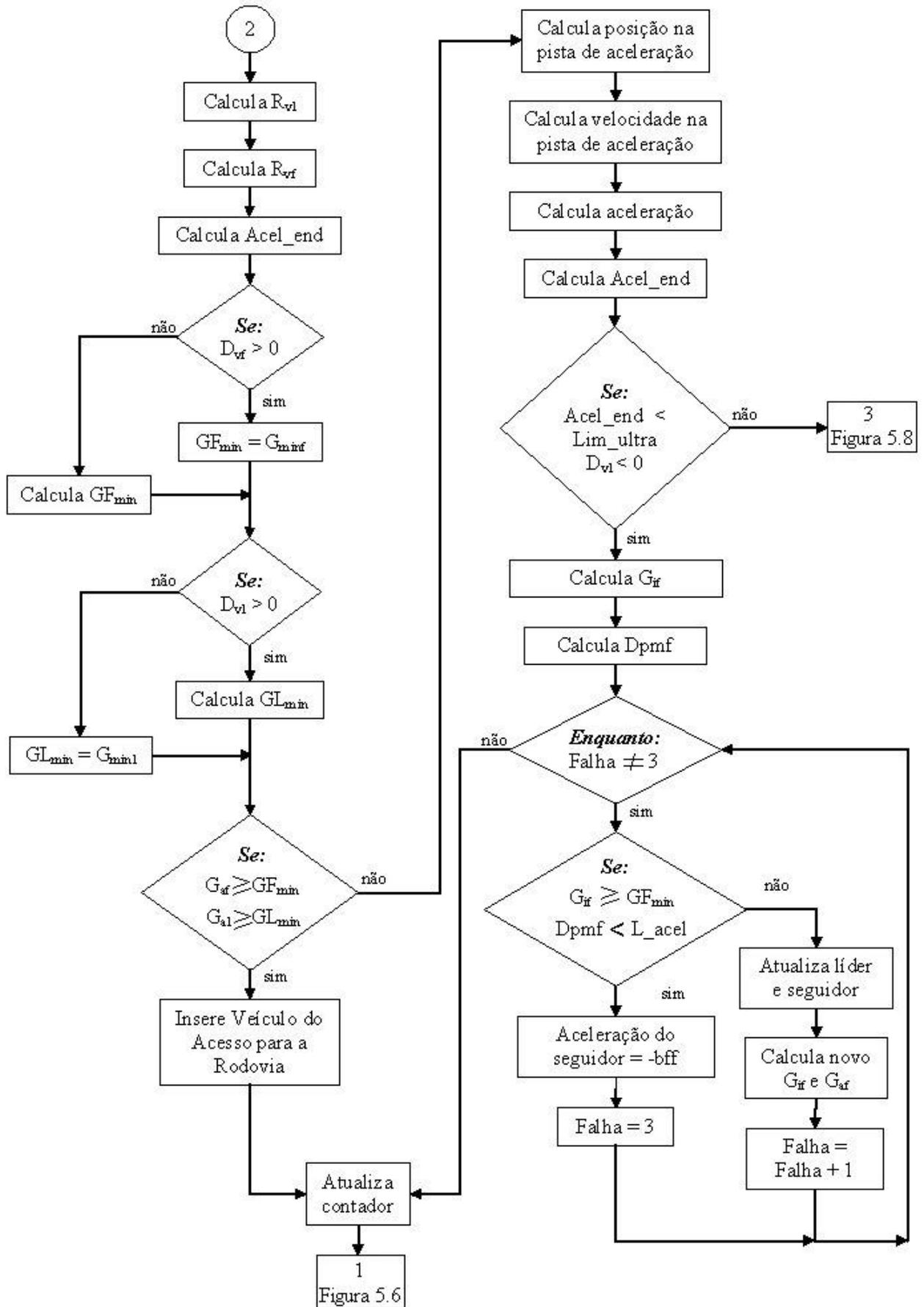


Figura 5.7: Fluxograma da etapa da atualização dos estados (b)

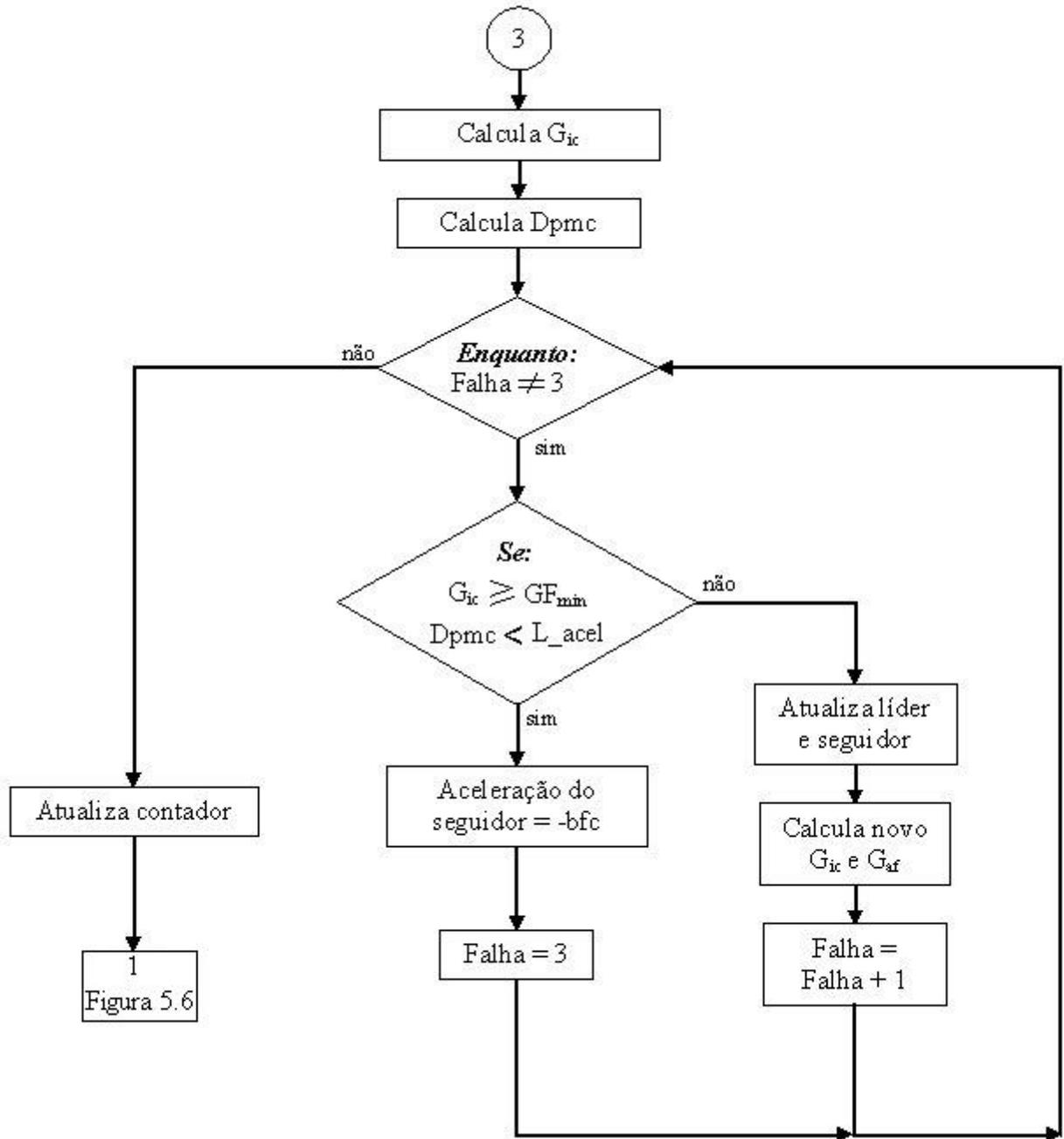


Figura 5.8: Fluxograma da etapa da atualização dos estados (c)

Capítulo 6

Resultados das Simulações

Com a implementação do modelo de perseguição de Helly e do modelo de inserção de veículos proposta por Hidas na ferramenta computacional MatLab, foram realizados experimentos cujos resultados são apresentados neste capítulo. Os experimentos validam o modelo implementado e também ajudam na análise dos resultados obtidos quando o controle de acesso é aplicado sobre o ambiente simulado. O ambiente simulado é mostrado na Figura 6.1. Este é formado por duas vias, e a rodovia (via principal) possui 2800 metros de comprimento. A faixa de aceleração proveniente do acesso possui 200 metros, sendo iniciado 2300 m depois do início da rodovia. Esse comprimento de 2300 metros antes do início do acesso é utilizado para fazer com que os veículos da rodovia possam estar em regime permanente ao se aproximarem da faixa de aceleração.

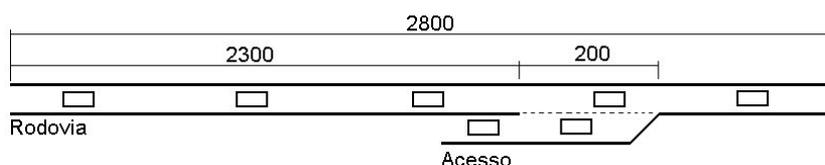


Figura 6.1: Representação gráfica do ambiente simulado no MatLab

A velocidade máxima permitida tanto na rodovia quanto no acesso é de 110 km/h. Contudo, os veículos que entram na rede de tráfego através do acesso têm uma velocidade inicial de 80 km/h. A velocidade máxima (V_{max}) que pode ser alcançada pelos veículos é de 140 km/h. Essa velocidade máxima é necessária para a obtenção da variável d na Equação 4.7. A aceleração máxima que pode ser obtida para cada um dos veículos é de $1 m/s^2$ e a desaceleração máxima é de $-6 m/s^2$. O fluxo de saturação da rodovia e do acesso foi definido em 1800 veic/h, que é utilizado na engenharia de tráfego e que a este neste ambiente hipotético. Os valores de aceleração e desaceleração aplicados para a validação do modelo não foram baseados em casos reais, pois o interesse é o de se observar a lógica da inserção e não a comparação com a realidade. E, com isso, demonstrar a ocorrência da restrição temporária da capacidade.

6.1 Validação do Modelo de Perseguição

Foram realizadas experiências com o modelo proposto implementado em MatLab, a fim de verificar se o comportamento macroscópico do modelo de perseguição era o esperado, de acordo com o que foi desenvolvido no simulador microscópico SITRA-B+ (Magne et al., 2000). Para a validação do modelo implementado foram feitos experimentos buscando-se obter o diagrama velocidade-concentração e o diagrama fluxo-concentração.

Para a obtenção desses dois diagramas foram realizados dois experimentos, e cada um forneceu um diagrama específico. Contudo, o procedimento aplicado nesses experimentos foram semelhantes, e a saída dos dados era ajustada de forma que fornecesse as variáveis desejadas. Antes da execução dos experimentos, foram, porém, definidos o valor de concentração de congestionamento (k_{jam}) e o valor de concentração a partir do qual a velocidade dos veículos passa a depender da concentração da via (k_0). O valor de k_{jam} pode ser definido com base nas definições feitas no capítulo 4 e são:

$$k_{jam} = \frac{k_m}{\alpha} \quad (6.1)$$

$$k_m = \frac{\alpha}{l} \quad (6.2)$$

O valor de k_0 foi obtido a partir de experimentação, pois esse valor é definido durante a observação da Figura 6.2 e o primeiro valor de concentração ao qual a velocidade passa a diminuir em virtude da ação do aumento da concentração.

6.1.1 Experimento 1: diagrama velocidade-concentração

O diagrama velocidade-concentração do modelo implementado no MatLab foi montado com simulações de 2 horas de duração. A cada 15 minutos, o fluxo de veículos na rodovia era aumentado, fazendo com que a concentração aumentasse e a velocidade dos veículos diminuísse. Antes do aumento do fluxo, eram obtidos os pontos do diagrama velocidade-concentração para aquele instante de tempo. Após a simulação de vários valores de fluxos, que variaram de 320 a 2400 veic/h, o diagrama velocidade-concentração é mostrado na Figura 6.2

Os pontos obtidos (valores simulados) seguem o comportamento esperado, ao comparar os pontos com os o diagrama obtido com base no modelo matemático, pode-se notar que após a concentração ultrapassar o valor de k_0 (concentração a partir da qual o tráfego começa a reduzir a velocidade), a velocidade dos veículos da rodovia começa a diminuir, em razão do aumento de veículos na rodovia e em consequência o aumento da concentração. Se o simulador não tivesse limitações quanto ao fluxo que pode ser aplicado na rodovia e a variação desse valor de fluxo, os pontos obtidos se aproximariam mais do diagrama matemático.

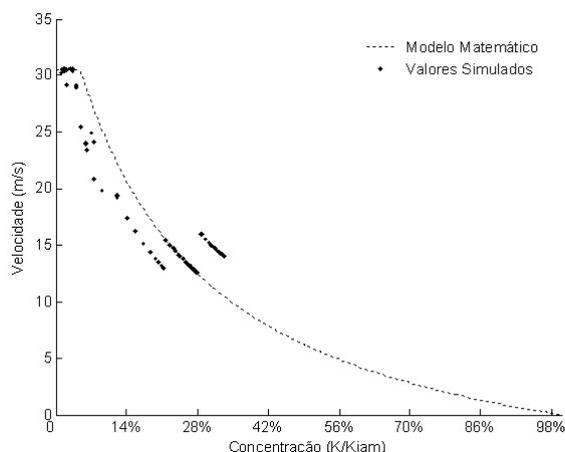


Figura 6.2: Diagrama velocidade-concentração do modelo implementado no MatLab

Contudo, apesar de não ser igual ao modelo matemático, o modelo implementado satisfaz os quesitos necessários para demonstrar o comportamento proposto pelo modelo de perseguição utilizado pelo microssimulador SITRA-B+.

6.1.2 Experimento 2: Diagrama fluxo-concentração

Nesse experimento, foram seguidas as mesmas rotinas feitas na obtenção do diagrama velocidade-concentração. Entretanto, os pontos do diagrama foram formados a partir do fluxo de veículos que entraram na rede de tráfego durante os 15 minutos de amostragem. A Figura 6.3 é o resultado do experimento que é também comparado com o diagrama do modelo matemático.

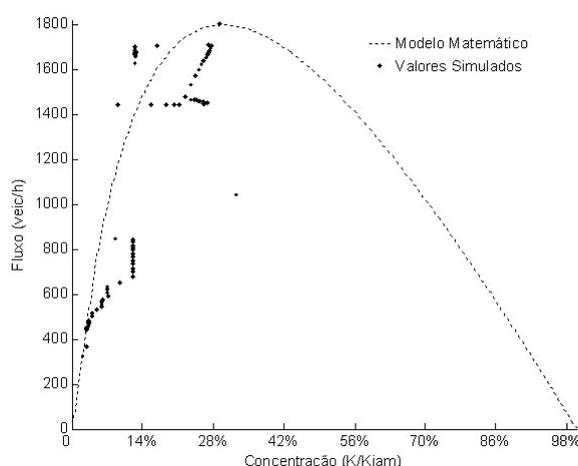


Figura 6.3: Diagrama fluxo-concentração do modelo implementado no MatLab

Assim como no caso do diagrama velocidade-concentração, nota-se que os pontos obtidos são coerentes com os valores ideais obtidos no modelo matemático. Novamente, percebe-se também que o modelo implementado no MatLab não é capaz de percorrer uma gama maior de pontos, em razão das limitações quanto ao fluxo aplicado na rodovia. Apesar disso, isso é

suficiente para mostrar que o modelo implementado segue o comportamento esperado para a rodovia.

6.2 Validação do Modelo de Inserção Proposto

As manobras de mudança de faixa forçada e cooperativa foram observadas através dos diagramas de velocidade-tempo e distância-tempo. Esses diagramas são obtidos de forma bastante semelhantes, durante a simulação de um caso em que os veículos entram na rede de tráfego a partir da rodovia e do acesso lateral, são observados três veículos: o sujeito (que deseja mudar da faixa de aceleração para a rodovia), o líder e o seguidor (que encontram-se na rodovia). A variável de velocidade de cada um é guardada durante a entrada e saída desses veículos da rede de tráfego. Com base nessas informações são montados os gráficos para cada caso de mudança de faixa.

6.2.1 Mudança de faixa forçada

A Figura 6.4 possibilita mostrar o comportamento da velocidade dos veículos envolvidos na manobra. O veículo sujeito mostra a “intenção” de mudar de faixa quando passa a ter uma velocidade menor ou igual a do veículo líder; isso acontece cerca de 15 segundos depois do sujeito estar na faixa de aceleração. Nesse caso, essa “intenção” surge a menos de 25 metros do final da faixa de aceleração, fazendo com que o veículo líder opte por uma inserção forçada. Durante aproximadamente 5 segundos, o veículo sujeito procura uma brecha na qual possa forçar a entrada na rodovia. Em torno de 20 segundos após entrar na faixa de aceleração, o veículo sujeito acaba fazendo com que o veículo seguidor reduza bruscamente sua velocidade para que o veículo sujeito possa mudar de faixa. Essa redução da velocidade começa poucos segundos antes do veículo sujeito entrar à frente do veículo seguidor. Isso demonstra que pouco antes da inserção, o veículo seguidor “percebe” a “intenção” do sujeito de entrar à sua frente e obriga-se a frear. Outro fato é que o tempo da manobra, que acontece em cerca de 5 segundos (instante de tempo 20 até 25). O veículo líder possui o seu comportamento inalterado, durante toda a manobra de mudança de faixa.

Para mostrar o quanto a mudança de faixa forçada altera a progressão do veículo seguidor na rodovia e, com isso, consolidar a ocorrência da mudança de faixa forçada, na Figura 6.5, há o diagrama tempo-distância dos três veículos envolvidos na manobra. Como já visto na Figura 6.4, o veículo líder permanece completamente insensível a qualquer um dos eventos que ocorrem logo atrás dele. Já com o veículo sujeito, nota-se que este chega a andar por alguns instantes à frente do veículo líder até se aproximar do final da faixa de aceleração onde, então, obriga-se a mudar de faixa e, com isso, fazer com que o veículo seguidor altere o seu comportamento na rodovia para que a inserção do sujeito não termine em colisão.

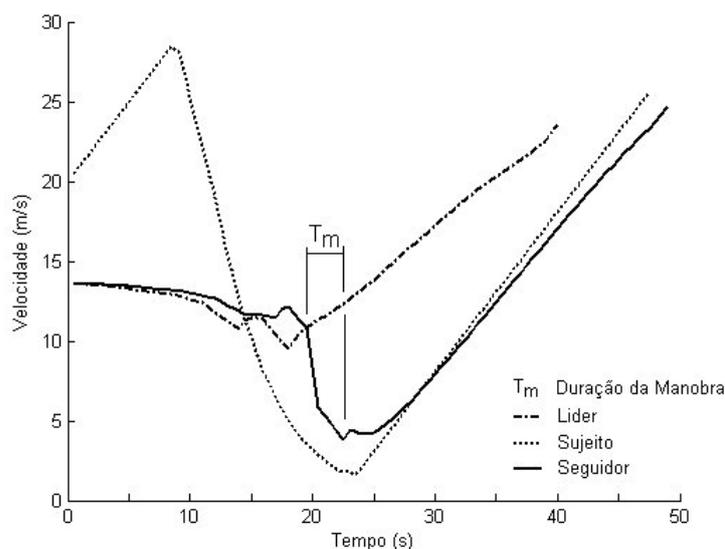


Figura 6.4: Diagrama de velocidade dos veículos durante a inserção forçada no modelo implementado no MatLab

6.2.2 Mudança de faixa cooperativa

Nesse caso, a redução de velocidade do veículo seguidor é muito mais sutil pelo fato da manobra ser realizada bem antes do final da faixa de aceleração. Durante a manobra, o veículo sujeito demonstra a intenção de mudar de faixa e aguarda uma oportunidade. Como este se encontra ainda distante do final da faixa de aceleração, o veículo seguidor, que cede o lugar para o veículo sujeito, desacelera de forma mais suave, pois há espaço suficiente para que essa manobra aconteça sem que seja prejudicada a sua progressão na rodovia. Assim como acontece na mudança de faixa forçada, o veículo sujeito tem a “intenção” de mudar de faixa somente depois que sua velocidade passa a ser menor ou igual a do veículo líder. Como não há urgência na mudança de faixa em virtude da sua posição na faixa de aceleração, o veículo sujeito passa a procurar algum veículo da rodovia disposto a ceder e permitir a mudança de faixa do sujeito. No diagrama mostrado na Figura 6.6, pouco antes de 5 segundos após o veículo sujeito entrar na faixa de aceleração, o veículo seguidor começa a desacelerar.

Nota-se que a inclinação da curva é menor que a inclinação que ocorre na mudança de faixa forçada. Com isso, a desaceleração ocorre de forma mais suave até que aconteça a mudança de faixa do veículo sujeito para a rodovia, no instante de tempo de aproximadamente 7 segundos. Em razão da aplicação de uma desaceleração menor, a duração da manobra de mudança de faixa cooperativa é de aproximadamente 8 segundos, ou seja, ela dura 3 segundos a mais para ser executada do que a mudança de faixa forçada. Entretanto, apesar de mais demorada, a mudança de faixa cooperativa causa menos impacto ao tráfego, pois praticamente não afeta a progressão do veículo seguidor na rodovia. Isso pode ser visto na Figura 6.7 que é o diagrama distância-tempo dos veículos envolvidos na manobra de mudança de faixa cooperativa. Apesar do aumento da distância entre o veículo

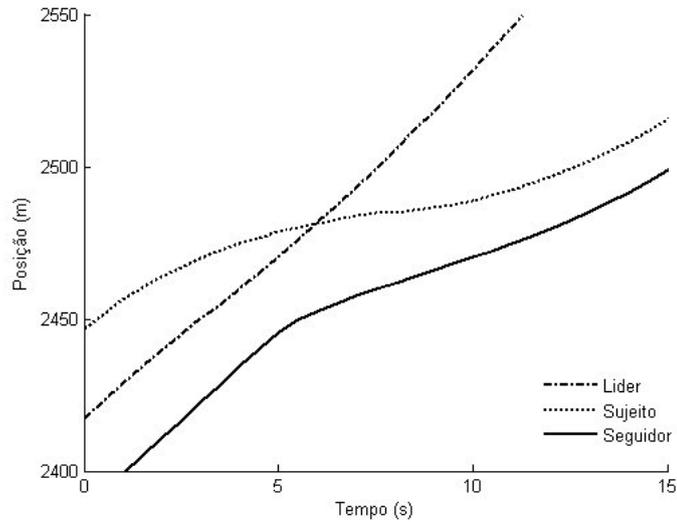


Figura 6.5: Diagrama tempo-distância entre os veículos durante a inserção forçada no modelo implementado no MatLab

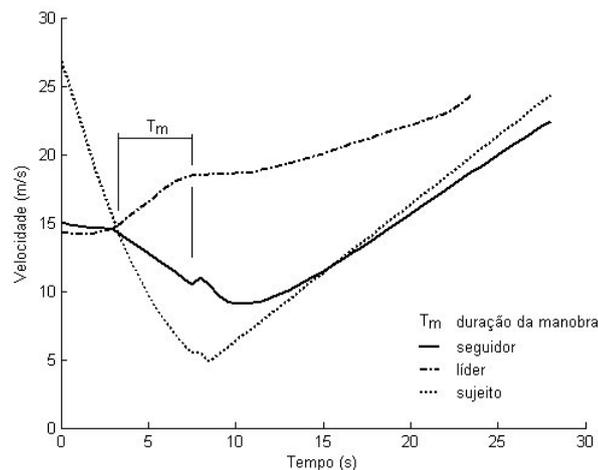


Figura 6.6: Diagrama de velocidade dos veículos durante a inserção cooperativa no modelo implementado no MatLab

líder e o seguidor, ao final da manobra, a velocidade dos veículos envolvidos na manobra sofreram variações menores de desaceleração quando comparados com as variações sofridas pelos veículos envolvidos na manobra de mudança de faixa forçada.

6.3 O Fenômeno da Restrição Temporária

Para demonstrar que esse fenômeno ocorre no modelo implementado no MatLab, foi executado um experimento em que foram aplicados vários fluxos no acesso, sendo mantido constante o fluxo de veículos da rodovia em 1440 *veic/h*, ou seja, próximo do seu valor de saturação, que é de 1800 *veic/h*. O fluxo do acesso foi aumentado gradativamente até que o fluxo total (rodovia + acesso) ultrapassasse o valor de saturação da rodovia. Com isso,

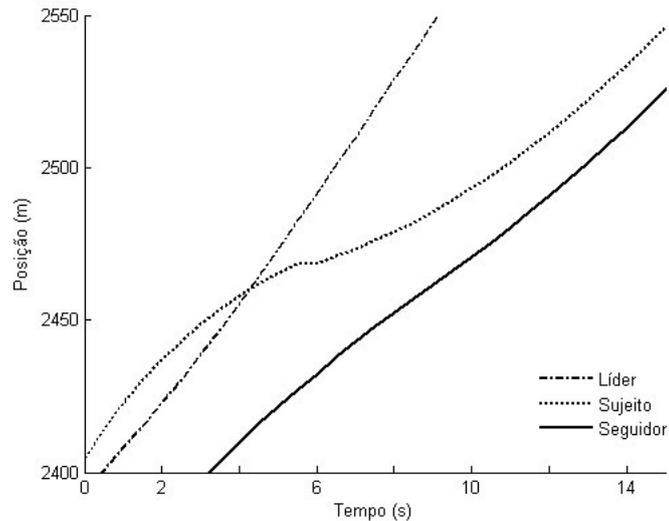


Figura 6.7: Diagrama tempo-distância entre os veículos durante a inserção cooperativa no modelo implementado no MatLab

foi plotado o gráfico da Figura 6.8, com o qual é possível mostrar a queda da capacidade da rodovia de acordo com o aumento do fluxo pelo acesso.

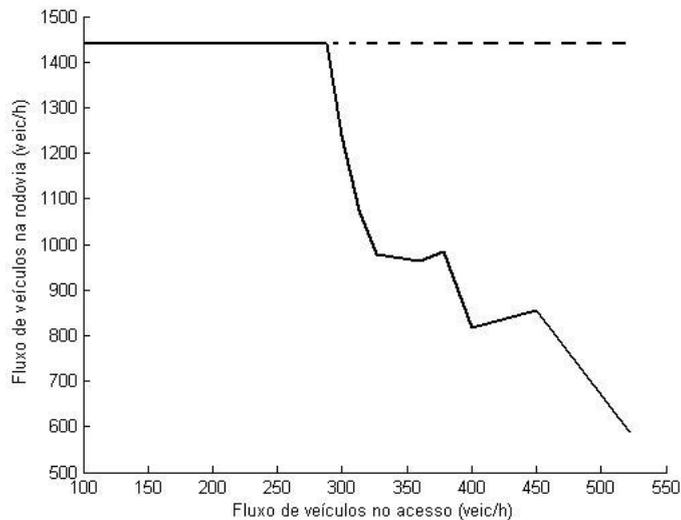


Figura 6.8: Queda da capacidade da rodovia devido ao fluxo de veículos do acesso.

Quando o fluxo do acesso atinge o valor de 300 *veic/h*, o fluxo da rodovia já começa a ser prejudicado. O fluxo total, nesse caso, é de 1740 *veic/h*, inferior ao fluxo de saturação. Isso demonstra que o fenômeno da restrição temporária acontece de forma satisfatória no modelo implementado.

6.4 A Implementação do Controle de Acesso

Após observar que o modelo implementado apresenta o fenômeno da restrição temporária, o controle de acesso foi aplicado ao ambiente modelado. A estratégia escolhida foi a ALINEA e foram aplicados boa parte dos parâmetros utilizados nas simulações do capítulo 4. Contudo, algumas variações ocorreram. Ao invés de se utilizar a “ocupância” da rodovia como variável de entrada, foi utilizada a própria concentração. Isso causou uma mudança na definição do valor de referência. Os parâmetros utilizados para a implementação da estratégia ALINEA são mostrados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Parâmetros Usados na Estratégia ALINEA

Parâmetro	Valor
O_c	42 veic/Km
K_r	3
Pos. Sensor	40 m (jusante)
Ciclo	40 s
Verde mínimo	12 s

A definição dos valores de ciclo e posição de sensor foram feitos experimentalmente. Os melhores resultados foram obtidos com o período de 40 segundos de tempo de ciclo e com o sensor ALINEA posicionado na rodovia a 40 metros a jusante da faixa de aceleração. O controle de acesso foi aplicado aos casos em que o fluxo da rodovia começou a ser prejudicado com a perda da capacidade até que o valor total de fluxo (acesso + rodovia) ultrapassasse o valor de saturação da rodovia. O resultado é apresentado na Tabela 6.2

Tabela 6.2: Resultados do uso do controle de acesso

Fluxo Aplicado		Fluxo Obtido			
Rodovia	Acesso	Rodovia	Acesso	Fluxo Entrada	Fluxo Saída
	300	1285	235	1520	1386
	313	1289	233	1522	1392
1440	327	1290	233	1523	1398
	342	1292	233	1525	1390
	360	1308	243	1551	1420

A melhora nos resultados é notada quando a Tabela 6.2 é comparada com os resultados alcançados (Tabela 6.3) e quando esse mesmo ambiente de simulação não possui o controle de acesso para amenizar os impactos da restrição temporária da via.

Ao se fazer a comparação, percebe-se que a estratégia ALINEA faz o fluxo de veículos na rodovia ser priorizado, enquanto no acesso o fluxo é restringido. Além disso, na Tabela 6.2, é visível que o fluxo de entrada da rede estabiliza-se na faixa de 1500 *veic/h*, contendo a queda contínua que ocorre quando o acesso não é controlado. Ao se comparar os resultados entre as simulações em que não há aplicação do controle de acesso com os resultados em que o controle de acesso é utilizado, observa-se de forma mais explícita (Tabela 6.4) as melhoras

Tabela 6.3: Resultados sem o uso do controle de acesso

Fluxo Aplicado		Fluxo Obtido			
Rodovia	Acesso	Rodovia	Acesso	Fluxo Entrada	Fluxo Saída
	300	1237	300	1537	1361
	313	1076	313	1389	1205
1440	327	979	327	1306	1139
	342	855	342	1189	1011
	360	962	360	1323	1151

ocasionadas pelo uso do controle de acesso na rodovia simulada.

Tabela 6.4: Comparativo entre os resultados com controle e sem controle:

Fluxo sem Controle		Fluxo ALINEA			
Entrada	Saída	Entrada	Ganho	Saída	Ganho
1537	1361	1520	-1,11%	1386	1,80%
1389	1205	1522	8,74%	1392	13,43%
1306	1139	1523	14,25%	1398	18,53%
1189	1011	1525	22,03%	1390	27,26%
1323	1151	1551	14,07%	1420	18,94%

No primeiro caso, o fluxo de entrada na rede sem controle de acesso foi um pouco maior (1,11%) do que na rede quando o controle foi aplicado. Contudo, percebe-se que o fluxo de saída foi maior (1,80%) com a atuação do controle. Isso demonstra que a estratégia de controle causa uma melhora na progressão dos veículos da rodovia. Nos demais casos, a estratégia de controle ALINEA obteve resultados superiores, que demonstram que o controle de acesso é uma estratégia que resulta em melhoras sensíveis do tráfego.

Ao realizar as simulações, foram percebidas limitações no modelo implementado no Matlab. Em virtude dessas limitações, o modelo tornou-se excessivamente rígido. Um exemplo disso é a queda da capacidade da rodovia iniciar-se quando o fluxo do acesso atinge o valor de 300 *veic/h*, ou 16,6% do fluxo de saturação. Esse fato é ocasionado em razão das dificuldades encontradas para calibrar os parâmetros do modelo de perseguição e inserção, já que, durante a manobra de inserção, os veículos envolvidos passam a tolerar temporariamente uma distância menor entre os veículos, acreditando que nenhum acidente possa ocorrer até que a distância de segurança seja recuperada. No modelo de perseguição, essa distância entre os veículos é determinada pela variável d . Esta é obtida pela Equação 4.7, em que é necessário realizar a redução da distância entre os veículos para reduzir o valor de λ . Conforme mostrado na Equação 4.22, a redução de λ acontece quando aumentamos o fluxo máximo de veículos na rodovia. Então, na região do acesso e da faixa de aceleração, foi considerado um fluxo máximo de 2880 *veic/h*. Outra questão que prejudicou o desempenho das simulações foi a dificuldade de ajuste dos valores de redução de velocidade e desaceleração, tanto para a inserção forçada quanto para a cooperativa.

Capítulo 7

Conclusões

O simulador microscópico criado da combinação do modelo de perseguição de Helly com o modelo de inserção proposto, que é baseado no modelo feito por Hidas, demonstra o efeito da restrição temporária que ocorre em rodovias em que há a existência de acessos. Com isso, as vantagens do uso da estratégia de controle de acesso podem ser percebidas.

Apesar dos resultados demonstrarem o comportamento esperado, foram percebidas algumas limitações nesse modelo de simulador microscópico desenvolvido:

- dificuldade para a calibração dos parâmetros do modelo de perseguição e inserção;
- baixa flexibilidade do simulador em atender a uma maior variedade para os fluxos de entrada;
- o ambiente simulado é restrito quanto ao número de vias existentes.

A dificuldade em calibrar os parâmetros do modelo de perseguição e inserção causou, durante a aplicação do modelo de inserção, uma recuperação demorada da velocidade dos veículos que saíam da região crítica, pois, ao mudar de faixa, a distância de segurança do veículo que mudou de faixa em relação ao veículo à sua frente era menor do que a calculada pelo modelo de perseguição. Com isso, o veículo que mudava de faixa permanecia durante muito tempo em baixa velocidade e a onda de choque a montante causava a formação prematura do congestionamento.

A baixa flexibilidade para a variação dos fluxos de entrada da rodovia prejudicou a realização de experimentos mais completos para as validações do modelo de perseguição, pois esses fluxos foram determinados a partir de passos que suportam variações mínimas de meio segundo entre os vários fluxos que deveriam ser aplicados. Isso limitou os valores dos fluxos de entrada aplicados nas simulações e, por isso, não foi possível uma variação mais discretizada dos fluxos de entrada (tanto na rodovia quanto no acesso). Como decorrência,

a determinação exata dos fluxos que causam o fenômeno da restrição temporária foi dificultada.

Um fator que também deve ser levado em consideração diz respeito ao ambiente simulado. O uso de somente uma via para observar o fenômeno da restrição temporária e aplicar a estratégia de controle de acesso permite perceber de forma evidente as vantagens no uso desse controle, porém não é suficiente. Após realizar as simulações do modelo proposto, o mesmo ambiente e parâmetros para o modelo de perseguição foram simulados no SITRA-B+ e o resultado obtido foi maior do que o obtido no modelo matemático proposto. Era esperado que o simulador comercial não apresentasse o fenômeno da restrição temporária para tal caso, mas apresentou. Esse resultado permite demonstrar que a ausência do fenômeno da restrição temporária ocorre no simulador microscópico SITRA-B+ não somente em virtude do modelo de inserção utilizado por esse simulador, como também em razão do modelo de mudança de faixa.

Neste estudo, apesar das limitações encontradas durante a implementação do modelo proposto, foi possível desenvolver, por meio de uma nova proposta de inserção, um simulador que realizou um estudo sobre controle de acesso.

A continuidade deste trabalho seria impedir que os veículos, ao saírem da região crítica, permanecessem em baixa velocidade até que a distância de segurança fosse atingida, realizar um melhor ajuste dos parâmetros de inserção, melhorar a discretização dos fluxos de entrada, e desenvolver um modelo de mudança de faixa para o desenvolvimento de um ambiente de simulação mais realista. Essas ações trariam resultados mais expressivos.

Após a solução das limitações, o próximo estudo deverá considerar a questão das filas que são criadas no acesso. Alguns autores propõem o uso de sensores a uma distância tal que, quando a ocupação desse sensor atingir um valor pré-determinado, o congestionamento será identificado no acesso e a ação de controle substituída por um tempo fixo constante. Com isso, um fluxo fixo de veículos será mantido até as condições de tráfego no acesso voltarem ao normal e o controle de acesso volte a operar. Contudo, as condições nas quais essas mudanças são aplicadas não são detalhadas.

Apêndice A

Código da Entrada de Veículos na Rodovia e Acesso

```
%-----%
%% Entrada de veículos da rodovia: %% -----%
%-----%

if(tempo == carro_in1)
    if(rodovi_car<380)
        total_car1 = total_car1+1;
        veicl(total_car1,SENSOR) = 0;
        veicl(total_car1,POS) = x_0;
        veicl(total_car1,VEL) = v_0;
        veicl(total_car1,ACEL) = a_0;
        veicl(total_car1,HED) = 0;
        veicl(total_car1,CON) = 0;
        veicl(total_car1,FLAG) = 0;
        veicl(total_car1,FASE) = VERD;
        veicl(total_car1,ORIGEM) = 1;
        if (rodovi_car==lider)
            veicl(total_car1,MARCA)=1;
        else
            if(rodovi_car==seguidor)
                veicl(total_car1,MARCA)=3;
            else
                veicl(total_car1,MARCA)=0;
            end
        end
    end
    veicl(total_car1,MERGE)=0;
    total_car = total_car+1;
end
```

```
    rodovi_car = rodovi_car+1;
else
    if(veicl(size(veicl,1),POS)>=dist_v0)
        total_car1 = total_car1+1;
        veicl(total_car1,SENSOR) = 0;
        veicl(total_car1,POS) = x_0;
        veicl(total_car1,VEL) = v_0;
        veicl(total_car1,ACEL) = a_0;
        veicl(total_car1,HED) = 0;
        veicl(total_car1,CON) = 0;
        veicl(total_car1,FLAG) = 0;
        veicl(total_car1,FASE) = VERD;
        veicl(total_car1,ORIGEM) = 1;
        veicl(total_car1,MARCA)=0;
        veicl(total_car1,MERGE)=0;
        total_car = total_car+1;
        rodovi_car = rodovi_car+1;
    else
        if(veicl(size(veicl,1),POS)>=(dist_v0/2))
            total_car1 = total_car1+1;
            veicl(total_car1,SENSOR) = 0;
            veicl(total_car1,POS) = x_0;
            veicl(total_car1,VEL) = (v_0*parc_v0);
            veicl(total_car1,ACEL) = a_0;
            veicl(total_car1,HED) = 0;
            veicl(total_car1,CON) = 0;
            veicl(total_car1,FLAG) = 0;
            veicl(total_car1,FASE) = VERD;
            veicl(total_car1,ORIGEM) = 1;
            veicl(total_car1,MARCA)=0;
            veicl(total_car1,MERGE)=0;
            total_car = total_car+1;
            rodovi_car = rodovi_car+1;
        else
            if(veicl(size(veicl,1),POS)>=20)
                total_car1 = total_car1+1;
                veicl(total_car1,SENSOR) = 0;
                veicl(total_car1,POS) = x_0;
                veicl(total_car1,VEL) = (v_0*parc_v01);
                veicl(total_car1,ACEL) = a_0;
                veicl(total_car1,HED) = 0;
```

```

        veic1(total_car1,CON) = 0;
        veic1(total_car1,FLAG) = 0;
        veic1(total_car1,FASE) = VERD;
        veic1(total_car1,ORIGEM) = 1;
        veic1(total_car1,MARCA)=0;
        veic1(total_car1,MERGE)=0;
        total_car = total_car+1;
        rodovi_car = rodovi_car+1;
    else
        if((veic1(size(veic1,1),POS)>10)&(veic1(size(veic1,1),POS)<20))
            total_car1 = total_car1+1;
            veic1(total_car1,SENSOR) = 0;
            veic1(total_car1,POS) = x_0;
            veic1(total_car1,VEL) = (v_0*0.15);
            veic1(total_car1,ACEL) = a_0;
            veic1(total_car1,HED) = 0;
            veic1(total_car1,CON) = 0;
            veic1(total_car1,FLAG) = 0;
            veic1(total_car1,FASE) = VERD;
            veic1(total_car1,ORIGEM) = 1;
            veic1(total_car1,MARCA)=0;
            veic1(total_car1,MERGE)=0;
            total_car = total_car+1;
            rodovi_car = rodovi_car+1;
        end
    end
end
end
end
carro_in1 = carro_in1+passo_fluxo1;
end
%-----%
%% Entrada de veículos no acesso: %% -----%
%-----%
if(tempo == carro_in2)
    if(size(veic2,1)==0)
        total_car2 = total_car2+1;
        veic2(total_car2,SENSOR) = 0;
        veic2(total_car2,POS) = x_0a;
        veic2(total_car2,VEL) = v_0a;
        veic2(total_car2,ACEL) = a_0;
    end
end

```

```
    veic2(total_car2,HED) = 0;
    veic2(total_car2,CON) = 0;
    veic2(total_car2,FLAG) = 0;
    if(semaforo==VERD)
        veic2(total_car2,FASE) = VERD;
    else
        veic2(total_car2,FASE) = VERM;
    end
    veic2(total_car2,ORIGEM) = 2;
    if(acesso_car==sujeito)
        veic2(total_car2,MARCA)=2;
    else
        veic2(total_car2,MARCA)=0;
    end
    veic2(total_car2,MERGE)=0;
    total_car = total_car+1;
    acesso_car = acesso_car+1;
else
    if(veic2(size(veic2,1),POS)>=(x_0a+60))
        total_car2 = total_car2+1;
        veic2(total_car2,SENSOR) = 0;
        veic2(total_car2,POS) = x_0a;
        veic2(total_car2,VEL) = (v_0a*0.9);
        veic2(total_car2,ACEL) = a_0;
        veic2(total_car2,HED) = 0;
        veic2(total_car2,CON) = 0;
        veic2(total_car2,FLAG) = 0;
        if(semaforo==VERM)
            veic2(total_car2,FASE) = VERM;
            for(testa_semaf=1:(size(veic2,1)-1))
                if(veic2(testa_semaf,FASE)==VERM)
                    veic2(total_car2,FASE) = VERD;
                end
            end
        end
    else
        veic2(total_car2,FASE) = VERD;
    end
    veic2(total_car2,ORIGEM) = 2;
    if(acesso_car==sujeito)
        veic2(total_car2,MARCA)=2;
    else
```

```
        veic2(total_car2,MARCA)=0;
    end
    veic2(total_car2,MERGE)=0;
    total_car = total_car+1;
    acesso_car = acesso_car+1;
else
    if(veic2(size(veic2,1),POS)>=(x_0a+20))
        total_car2 = total_car2+1;
        veic2(total_car2,SENSOR) = 0;
        veic2(total_car2,POS) = x_0a;
        veic2(total_car2,VEL) = (v_0a*0.2);
        veic2(total_car2,ACEL) = a_0;
        veic2(total_car2,HED) = 0;
        veic2(total_car2,CON) = 0;
        veic2(total_car2,FLAG) = 0;
        if(semaforo==VERM)
            veic2(total_car2,FASE) = VERM;
            for(testa_semaf=1:(size(veic2,1)-1))
                if(veic2(testa_semaf,FASE)==VERM)
                    veic2(total_car2,FASE) = VERD;
                end
            end
        else
            veic2(total_car2,FASE) = VERD;
        end
        veic2(total_car2,ORIGEM) = 2;
        if(acesso_car==sujeito)
            veic2(total_car2,MARCA)=2;
        else
            veic2(total_car2,MARCA)=0;
        end
        veic2(total_car2,MERGE)=0;
        total_car = total_car+1;
        acesso_car = acesso_car+1;
    end
end
end
carro_in2 = carro_in2+passo_fluxo2;
end
```

Apêndice B

Código do Modelo Implementado no MatLab

```
%-----%
%% Atualização dos estados: %% -----%
%-----%
for i3=1:size(veic2,1)
    veic2(i3,FLAG)=0;
end contador = 0; p = 1; i1 = 1; i2 = 1;
while (contador ~= total_car)
%% Escolha da Pista: %% -----%
if((size(veic2,1)==0) | (veic2(size(veic2,1),FLAG)==2))
    p=1;
end
if(i1>size(veic1,1))
    p=2;
end
switch (p)
    case (2)
        if(i2==1);
            i = i2;
        else
            if(size(veic2,1)==0)
                lider_do_i = i1-1;
                veic(lider_do_i,POS) = veic1(lider_do_i,POS);
                veic(lider_do_i,VEL) = veic1(lider_do_i,VEL);
                veic(i1,POS) = veic1(i1,POS);
                veic(i1,VEL) = veic1(i1,VEL);
                veic(i1,ACEL) = veic1(i1,ACEL);
            end
        end
    end
end
end
end
```

```
        i = i1;
        p = 1;
    else
        if(veic2(i2,FASE)==VERM)
            lider_do_i = i2-1;
            veic(lider_do_i,POS) = semaf(1,POS);
            veic(lider_do_i,VEL) = semaf(1,VEL);
            veic(i2,POS) = veic2(i2,POS);
            veic(i2,VEL) = veic2(i2,VEL);
            veic(i2,ACEL) = veic2(i2,ACEL);
            veic(i2,FASE) = veic2(i2,FASE);
            i = i2;
        else
            lider_do_i = i2-1;
            veic(lider_do_i,POS) = veic2(lider_do_i,POS);
            veic(lider_do_i,VEL) = veic2(lider_do_i,VEL);
            veic(i2,POS) = veic2(i2,POS);
            veic(i2,VEL) = veic2(i2,VEL);
            veic(i2,ACEL) = veic2(i2,ACEL);
            veic(i2,FASE) = veic2(i2,FASE);
            i = i2;
        end
    end
end
end
case(1)
    if i1==1
        veic(i1,POS) = veic1(i1,POS);
        veic(i1,VEL) = veic1(i1,VEL);
        veic(i1,ACEL) = veic1(i1,ACEL);
        i = i1;
    else
        lider_do_i = i1-1;
        veic(lider_do_i,POS) = veic1(lider_do_i,POS);
        veic(lider_do_i,VEL) = veic1(lider_do_i,VEL);
        veic(i1,POS) = veic1(i1,POS);
        veic(i1,VEL) = veic1(i1,VEL);
        veic(i1,ACEL) = veic1(i1,ACEL);
        i = i1;
    end
end
end
```

```

%Cálculo das variáveis:-----%

%Carro Coelho:
if((i==1)&(i1==1))
    veic(i,POS) = veic(i,POS) + (veic(i,VEL)*passo);
    veic(i,VEL) = veic(i,VEL) + (veic(i,ACEL)*passo);
    if(veic(i,VEL)<Vc)
        veic(i,ACEL) = acel_max;
    end
    if(veic(i,VEL)>=Vc)
        veic(i,ACEL) = 0;
    end
    veic1(i,POS) = veic(i,POS);
    veic1(i,VEL) = veic(i,VEL);
    veic1(i,ACEL) = veic(i,ACEL);
    contador = contador +1;
    i1 = i1+1;
    p = 2;
else
%Inserção da pista de aceleração (veic2) para a rodovia (veic1): -----%
    if((i==1)&(i2==1)&(size(veic2,1)>0)&(veic2(i,POS)>=i_avel))
        falha = 0;
        v_segue = 1;
        while(veic2(i,POS)<veic1(v_segue,POS))
            v_segue = v_segue+1;
        end
        v_lider = v_segue-1;
        gaf = veic2(i,POS)-veic1(v_segue,POS);
%Inserção devido ao free-flow:
        if((v_lider == 0)&(gaf >= gfff))
            veic1(v_segue+1:size(veic1,i)+1,:) = veic1(v_segue:size(veic1,1),:);
            veic1(v_segue,:) = veic2(i,:);
            veic2(i,:) = [];
            veic1(v_segue,FLAG) = 1;
            if(veic1(v_segue,POS)>=pos_sen_alinea)
                veic1(v_segue,SENSOR) = 3;
            end
            total_car2 = total_car2-1;
            total_car1 = total_car1+1;
            contador = contador+1;
            p = 1;
        end
    end
end

```

```

else
    if(v_lider==0)
        gal = gffl+10;
    else
        gal = veic1(v_lider,POS)-veic2(i,POS);
    end
end
if((gaf>=gfff)&(gal>=gffl))
    veic1(v_segue+1:size(veic1,i)+1,:) = veic1(v_segue:size(veic1,1),:);
    veic1(v_segue,:) = veic2(i,:);
    veic2(i,:) = [];
    veic1(v_segue,FLAG) = 1;
    if(veic1(v_segue,POS)>=pos_sen_alinea)
        veic1(v_segue,SENSOR) = 3;
    end
    total_car2 = total_car2-1;
    total_car1 = total_car1+1;
    contador = contador+1;
    p = 1;
else
    if(v_lider==0)
        Rv1 = veic2(i,VEL);
    else
        Rv1 = veic2(i,VEL)-veic1(v_lider,VEL);
    end
    Rvf = veic2(i,VEL)-veic1(v_segue,VEL);
    acel_end = (l_acel-veic2(i,POS));
    if(Rvf > 0)
        gfmin = gminf;
    else
        gfmin = gminf + K_g*(ceil(veic1(v_segue,VEL)-veic2(i,VEL)));
        if(Rvf==0)
            gfmin = gminf + K_g;
        end
    end
end
if(Rv1 > 0)
    if(v_lider==0)
        glmin = gminl;
    else
        glmin = gminl + K_g*(veic2(i,VEL)-veic1(v_lider,VEL));
    end
end
else

```

```

        glmin = gminl;
    end
%Inserção devida a ação coordenada ou forçada:
    if(veic2(i,MERGE)~=0)
        veic2(i,POS) = veic2(i,POS) + (veic2(i,VEL)*passo);
        veic2(i,VEL) = funcao_vel(veic2(i,:));
        veic2(i,ACEL) = funcao_acel ( veic_c(1,:), veic2(i,:),la);
        veic2(i,HED) = veic_c(1,POS)-veic2(i,POS);
        veic2(i,MERGE)=veic2(i,MERGE)-1;
        veic2(i,FLAG) = 2;
        contador = contador+1;
        p = 1;
        if(size(veic2,1)>1)
            i2 = i2+1;
        end
    else
        if((gaf >= gfmin)&(gal >= glmin))
            if(size(veic2,1)>1)
                veic2(i+1,MERGE)=tent_abort;
            end
            veic1(v_segue+1:size(veic1,i)+1,:)=veic1(v_segue:size(veic1,1),:);
            veic1(v_segue,:) = veic2(i,:);
            veic2(i,:) = [];
            veic1(v_segue,FLAG) = 1;
            if(veic1(v_segue,POS)>=pos_sen_alinea)
                veic1(v_segue,SENSOR) = 3;
            end
            total_car2 = total_car2-1;
            total_car1 = total_car1+1;
            contador = contador+1;
            p = 1;
        else
            veic2(i,POS) = veic2(i,POS) + (veic2(i,VEL)*passo);
            veic2(i,VEL) = funcao_vel(veic2(i,:));
            veic2(i,ACEL) = funcao_acel ( veic_c(1,:), veic2(i,:),la);
            veic2(i,HED) = veic_c(1,POS)-veic2(i,POS);
        %Inserção forçada:%-----%
        if((acel_end < lim_ultra)&(Rv1<0))
            gif = gaf-((veic1(v_segue,VEL)*tdf)-(bff/(2*tdf^2)))+
                (veic1(v_segue,VEL)*tdf);
            dpmf = (tdf*veic2(i,VEL)) + veic2(i,POS);

```

```

while (falha~=3)
    if ((gif>=gfmin) & (dpmf<l_ancel))
        if (veic1(v_segue,VEL)<7)
            veic1(v_segue,ACEL) = -bff*0.2;
        else
            veic1(v_segue,ACEL) = -bff;
        end
        falha = 3;
        naforca=naforca+1;
    else
        v_lider = v_segue;
        v_segue = v_segue+1;
        gaf = veic2(i,POS)-veic1(v_segue,POS);
        gif = gaf-(veic1(v_segue,VEL)*tdf)-(bff/(2*tdf^2)+
            (veic1(v_segue,VEL)*tdf));
        falha = falha+1;
    end
end
else
%Inserção cooperativa:%-----%
    if (Rvl<0)
        gic = gaf-((veic1(v_segue,VEL)*tdc)-(bfc/(2*tdc^2)))+
            (veic1(v_segue,VEL)*tdc);
        dpmc = (tdc*veic2(i,VEL)) + veic2(i,POS);
        while (falha~=3)
            if ((gic>=gfmin) & (dpmc<l_ancel))
                veic1(v_segue,ACEL) = -bfc;
                falha = 3;
                cooperativa=cooperativa+1;
                if (falha>0)
                    Rvf = veic2(i,VEL)-veic1(v_segue,VEL);
                    if (Rvf>0)
                        veic2(i,ACEL)=-1.4;
                    end
                end
            else
                v_lider = v_segue;
                v_segue = v_segue+1;
                gaf = veic2(i,POS)-veic1(v_segue,POS);
                gic = gaf-((veic1(v_segue,VEL)*tdc)-(bfc/(2*tdc^2)))+(veic1(v_segue,VEL)*tdc);
                falha = falha+1;
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end
end
    veic2(i,FLAG) = 2;
    contador = contador+1;
    p = 1;
    if(size(veic2,1)>1)
        i2 = i2+1;
    end
end
end
end
end
else
    if ((i==1)&(i2==1)&(size(veic2,1)>0)&(veic2(i,POS)<i_ancel))
        if(veic2(i,FASE)==VERD)
            veic2(i,POS) = veic2(i,POS) + (veic2(i,VEL)*passo);
            veic2(i,VEL) = funcao_vel(veic2(i,:));
            veic2(i,ACEL) = funcao_ancel ( veic_c(1,:), veic2(i,:),la);
            veic2(i,HED) = veic_c(1,POS)-veic2(i,POS);
            veic2(i,FLAG) = 2;
            contador = contador+1;
            p = 1;
            if(size(veic2,1)>1)
                i2 = i2+1;
            end
        else
            if(veic2(i,FASE)==VERM)
                veic2(i,POS) = veic2(i,POS) + (veic2(i,VEL)*passo);
                veic2(i,VEL) = funcao_vel(veic2(i,:));
                veic2(i,ACEL) = funcao_ancel(semaf(1,:), veic2(i,:),la);
                veic2(i,HED) = semaf(1,POS)-veic2(i,POS);
                veic2(i,FLAG) = 2;
                contador = contador+1;
                p = 1;
                if(size(veic2,1)>1)
                    i2 = i2+1;
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

else
    if((i==1)&(i2==1)&(size(veic2,1)==0))
        lider_do_i = i1-1;
        veic(lider_do_i,POS) = veic1(lider_do_i,POS);
        veic(lider_do_i,VEL) = veic1(lider_do_i,VEL);
        veic(i1,POS) = veic1(i1,POS);
        veic(i1,VEL) = veic1(i1,VEL);
        veic(i1,ACEL) = veic1(i1,ACEL);
        i = i1;
        p = 1;
    end
    if((i1<=size(veic1,1))&(veic1(i,FLAG)== 1))
        veic1(i,FLAG) = 0;
        i1 = i1+1;
        p=2;
    else
%Novo valor de d:
        if(p==1)
            if(veic1(i,POS)>=2400)
                lam = lam3;
            else
                lam = lam1;
            end
            d = ((veic(lider_do_i,VEL)/(Vmax - veic(lider_do_i,VEL)))*lam)+1;
        else
            lam = lam2;
            d = ((veic(lider_do_i,VEL)/(Vmax - veic(lider_do_i,VEL)))*lam)+1;
%Posição:
            veic(i,POS) = veic(i,POS) + (veic(i,VEL)*passo);
%Velocidade:
            veic(i,VEL) = funcao_vel(veic(i,:));
%Aceleração:
            veic(i,ACEL) = funcao_acel ( veic(lider_do_i,:), veic(i,:), d);
%Headway:
            veic(i,HED) = veic(lider_do_i,POS)-veic(i,POS);
%Concentração Local:
            veic(i,CON) = 1/veic(i,HED);
%Detector de Colisão:
            if((veic(i,HED) <= l_veic)&(veic(i,POS) < l_rodos))
                k = 1;
                lider_colisao = lider_do_i;
            end
        end
    end
end

```


end

Referências Bibliográficas

- S. Algers, E. Bernauer, M. Boero, L. Breheret, C. Taranto, M. Dougherty, K. Fox, e J.F. Gabard. Review of micro-simulation models. <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/deliv3.html>, Smartest, 1997.
- M. Brackstone e M. McDonald. Car-following: a historical review. *Pergamon - Transportation Research Part F2*, pages 183–196, janeiro 2000.
- L. Chu e X. Yang. Optimization of the alinea ramp-metering control using genetic algorithm with micro-simulation. In *Transportation Research Board - Annual Meeting*, 2003.
- B. C. Crowther. A comparison of corsim and integration for the modeling of stationary bottlenecks. Master's thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- D. L. Gerlough e M. J. Huber. Traffic flow theory. Monografia 165, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1975.
- H. Hadj-Salem, J. M. Blossiveille, e M. Papageorgiou. Alinea: A local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record*, pages 58–64, 1991.
- D. Hanselman e B. Littlefield. *MATLAB 5 Versão do Estudante - Guia do Usuário*. MAKRON Books, 1999.
- P. Hidas. Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. *Elsevier - Transportation Research Part C*, pages 37–62, fevereiro 2004.
- P. Hidas e K. Behbahanizadeh. Sitras: A simulation model for its applications. In *Proceedings of the 5th World Congress on ITS*, Seoul, Korea, 1998.
- A. Kotsialos e M. Papageorgiou. Efficiency versus fairness in network-wide ramp metering. In *IEEE-Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*, Oakland, 2001.
- A. Kotsialos e M. Papageorgiou. Freeway ramp metering: An overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pages 271–281, dezembro 2002.
- L. Magne, S. Rabut, e J.F. Gabard. Towards an hybrid macro-micro traffic flow simulation model. In *Informatics Salt Lake City 2000 Conference*, Salt Lake City, 2000.

- M. Papageorgiou, C. Diakaki, V. Dinopoulou, A. Kotsialos, e Y. Wang. Review of road traffic control strategies. In *Proceedings of the IEEE*, 2003.
- SODIT. *Manuel Utilisateur Logiciel SITRA*. Société pour Développement de l'Innovation dans les Transports, 2002.
- T. Toledo, H. N. Koutsopoulos, e M. E. Ben-Akiva. Modeling integrated lane-changing behavior. In *Transportation Research Board - Annual Meeting*, 2003.
- M. Zhang, T. Kim, X. Nie, W. Jin, L. Chu, e W. Recker. Evaluation of on-ramp control algorithms. Relatório técnico, Institute of Transportation Studies - University of California, Berkeley, CA., 2001.