



Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
FEUP

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Sistemas Inteligentes de Transporte

Lino Manuel Baptista Figueiredo

(Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto)

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Porto, Fevereiro de 2005

Dissertação realizada sob a orientação do
Professor Doutor J. A. Tenreiro Machado,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica do
Instituto Superior de Engenharia do Instituto Politécnico do Porto

e co-orientação do
Professor Doutor José Rui da R. Pinto Ferreira,
do Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores da
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dedico este trabalho em especial às minhas filhas, Ana Filipa e Catarina,

À minha esposa, Ana,

Também aos meus pais, Eulália e Manuel.

Prefácio

“A Imaginação é mais importante que o Conhecimento. O Conhecimento é limitado. A Imaginação engloba o mundo”

Albert Einstein

A globalização mudou para sempre a forma como crescemos, comunicamos e aprendemos. A globalização também desencadeou novos desafios e oportunidades que afectam fundamentalmente nossa prosperidade económica e a forma com que o governo, juntamente com seus depositários, faz julgamentos e toma decisões sobre o futuro. Este novo mundo em transformação exige novas formas de pensamento sobre transporte, incluindo a análise de novas ferramentas, novas alianças e uma nova arquitectura.

A mobilidade tornou-se um aspecto primordial na vida da maioria dos cidadãos. Estima-se que o congestionamento custa actualmente à União Europeia cerca de 40 mil milhões de euros por ano, podendo uma deslocação de cinco quilómetros dentro de algumas cidades, em hora de ponta, demorar mais de quatro horas. Embora a maioria dos problemas de tráfego tenham um cariz local, muitos há que podem ser abordados num nível mais amplo, sobretudo os que envolvem deslocações mais longas. As vantagens da utilização dos Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) são, para o utente triplas: maior segurança rodoviária, exploração máxima da rede rodoviária e impacto ambiental reduzido.

Os SIT são um fenómeno global emergente resultante da importância que a mobilidade adquiriu na sociedade moderna, contemplando os sectores público e privado ([http#1](#)) colocando questões de índole política, económica e social. Por exemplo, os SIT tornam possível a implementação de um determinado número de regras e processos governamentais de uma forma mais económica (e.g., licença alfandegárias e de imigração, concordância na segurança nos transportes e ferramentas de aquisição de dados das vias de comunicação terrestres, e melhoramento da produtividade através da redução de tempos, dos custos de operação, do consumo de energia e do aumento da fiabilidade e segurança ([http#1](#))).

Os SIT pretendem harmonizar a cultura, a indústria, a economia, a natureza e o ambiente e por fim o estilo e qualidade de vida do ser humano. O conceito associado aos SIT não só revoluciona as relações entre as pessoas e os veículos, criando novas relações espaciais, como também facilita a troca de informação e conhecimento, constituindo o núcleo de uma sociedade avançada baseada em informação. Pensa-se que os SIT terão um papel preponderante no enriquecimento da nossa sociedade no século XXI, constituindo a indústria líder, e ao mesmo tempo possuindo um grande potencial para a criação de novas indústrias e exploração de novos mercados, uma vez

que os SIT integram as mais recentes tecnologias providenciando um avanço significativo em termos de competitividade industrial.

Espera-se que o mercado dos SIT, sofra uma expansão muito rápida, durante a próxima década. Países como o Japão e os EUA, sendo potências mundiais na área da tecnologia, serão provavelmente os pioneiros, criando novas oportunidades de negócio, ao mesmo tempo que investirão na investigação e desenvolvimento, necessários para a evolução dos sistemas de transporte contribuindo para o bem-estar mundial.

Agradecimentos

Os agradecimentos seriam vastos e numerosos, no entanto vou referir apenas aqueles que foram talvez, os mais importantes, esperando não me esquecer de nenhum dos que incluo nesta categoria.

Em primeiro lugar quero agradecer ao Professor Tenreiro Machado, pela colaboração, disponibilidade, e excelente orientação, sem os quais a realização desta Tese de Doutoramento nunca teria sido possível. Ao professor José Rui Ferreira pela disponibilidade e colaboração.

Gostaria de agradecer ao Instituto Superior de Engenharia pelo facto de me ter proporcionado a dispensa de serviço docente, o que permitiu a realização deste trabalho assim, como a atribuição de três subsídios para suportar as despesas de deslocação a conferências onde apresentei artigos no âmbito do trabalho realizado.

Também ao programa PRODEP III pelo financiamento concedido ao ISEP para pagamento das propinas de Doutoramento e para suportar a dispensa de serviço docente durante três anos.

À Fundação Luso Americana para o Desenvolvimento, pela concessão de uma bolsa para suportar as despesas de deslocamento a uma conferência, onde apresentei um artigo no âmbito deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia do Porto por ter disponibilizado verbas para apoio a deslocações a conferências, onde apresentei artigos no âmbito do trabalho realizado.

Agradeço também aos colegas do Departamento e do grupo de investigação GRIS, com quem trabalhei e em especial àqueles que se encontravam na mesma altura em processo de Doutoramento, pelo espírito solidário criado o que amenizou o tempo que duraram os trabalhos.

Um agradecimento especial aos colegas Lobinho Gomes e Paulo Sousa pelo apoio prestado no decorrer do desenvolvimento do simulador.

A todos os meus amigos, pelo afastamento, falta de atenção e convívio, mas o tempo não dá para tudo.

Finalmente às pessoas mais importantes da minha vida, a minha família. Às minhas filhas por todo o seu carinho, atenção e paciência, que num momento tão importante, constituiu um forte incentivo e motivação para a conclusão do trabalho.

Em especial, quero agradecer à minha esposa Ana que sempre me apoiou e incentivou, neste trabalho e ao longo de todos os projectos que realizei desde que estamos juntos. Além disso suportou a minha indisponibilidade, os meus desabafos, as minhas dúvidas e incertezas, enfim todos os bons e maus momentos pelos quais se passa quando se realiza um trabalho deste género.

Da mesma forma aos meus pais que sempre me apoiaram incondicionalmente ao longo de toda a minha vida académica, e sofreram comigo os meus problemas. Tenho a certeza de que se sentem orgulhosos.

Por fim estendo os meus agradecimentos a todos aqueles de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho e que não foram aqui mencionados.

Resumo

Neste trabalho propõe-se um Simulador de Sistemas inteligentes de Transporte (*Simulator of Intelligent Transportation Systems* - SITS) baseado numa abordagem microscópica para a simulação de condições reais de tráfego em redes de estradas urbanas e não urbanas, considerando diferentes tipos de veículos, condutores e estradas. Com base nos resultados deste simulador efectua-se a análise dinâmica de diversos fenómenos de tráfego (e.g., dispositivos de controlo de tráfego e diferentes geometrias da rede de estradas considerando cruzamentos e rampas de acesso) através da aplicação de um novo formalismo de modelação baseado na integração da estatística com a transformada de Fourier.

No SITS cada veículo é modelado como uma entidade individual na rede. Para tal desenvolveu-se uma nova estrutura de modelação orientada ao estado (*State-Oriented Modelling* - SOM). Nesta estrutura de modelação cada veículo na rede tem um único estado possível em cada período de amostragem. A transição entre estados depende do modelo de comportamento do condutor e do ambiente circundante. O SITS considera diferentes tipos de modelos para o comportamento do condutor, nomeadamente o seguidor de veículo (*car-following*), o fluxo livre (*free-flow*) e a lógica de mudança de faixa (*lane changing*). Cada veículo na rede assume um dos dois regimes: *free flow* ou *car-following*. As acelerações ou desacelerações são simuladas através de um novo modelo, o modelo de percepção do condutor (*Perception-Driver Model* - PDM). O modelo *lane changing* utilizado no SITS tem uma metodologia que imita o comportamento do condutor no processo de mudança de faixa.

Os elementos mais importantes do SITS são os componentes que compõem a rede de estradas, a definição dos percursos para cada veículo e as decisões tomadas pelo condutor. Nos componentes da rede de estradas estão incluídos a geometria das estradas, os veículos e o controlo de tráfego. A cada condutor é atribuído um conjunto de parâmetros que descrevem o seu comportamento, nomeadamente, a velocidade desejada e o seu perfil de condução (e.g., desde passivo até agressivo). Da mesma forma os veículos também têm as suas próprias características nomeadamente, as dimensões, velocidade máxima e as capacidades de

aceleração e travagem. A definição dos percursos para cada veículo é efectuada através de matrizes do tipo Origem-Destino (O/D), sendo estas definidas como valores de entrada para o modelo.

Os resultados do SITS consistem na representação gráfica animada da rede de tráfego e num conjunto de tipos diferentes de saídas com os dados recolhidos pelos detectores. Estes constituem os dados de entrada para o processo de análise dinâmica.

Foram realizadas várias experiências que permitissem a análise dinâmica de sistemas de tráfego. Salienta-se o facto de que, o fluxo de tráfego é um sistema variante no tempo mas, neste trabalho, mostra-se que a transformada de Fourier pode ser utilizada para a análise de sistemas dinâmicos. De facto o fluxo de tráfego constitui um sistema complexo, mas através da integração da estatística com a transformada de Fourier, dando origem ao conceito de Função de Transferência Estatística (*Statistical Transfer Function* - STF), um sistema dinâmico pode ser analisado na perspectiva da teoria de sistemas. Nesta perspectiva foi adoptado um formalismo baseado nas ferramentas da teoria de sistemas. Além disso, a nova descrição dinâmica integra os conceitos do cálculo fraccionário, o que conduz a um tratamento mais natural da continuidade dos parâmetros da Função de Transferência, intrínsecos ao sistema.

A análise dinâmica motivou o desenvolvimento e a avaliação de desempenho de um novo algoritmo de controlo, que utiliza sinais limitadores de velocidade variáveis (SLVV) para controlar a velocidade do veículo em auto-estrada. Os resultados obtidos mostram que é possível estudar sistemas de tráfego, incluindo o conhecimento obtido a partir de algoritmos de controlo automático.

Palavras chaves: Sistema Inteligente de Transporte

Controlo de Tráfego

Simulação

Sistemas de Ordem Fraccionária

Análise Dinâmica

Abstract

In this thesis a Simulator of Intelligent Transportation Systems (SITS) based on a microscopic simulation approach to reproduce real traffic conditions in an urban or non-urban network considering different types of vehicles, drivers and roads. Based on the SITS package it is performed a dynamical analysis of several traffic phenomena, (e.g., signal control devices and different road geometries considering road junctions and access ramps) applying a new modelling formalism based on the embedding of statistics and Fourier transform.

SITS models each vehicle as a separate entity in the network. It is implemented a new modelling structure called State-Oriented Modelling (SOM). In this modelling structure, every single vehicle in the network has one state for each sampling period. The transition between each state depends on the driver behaviour model and its surrounding environment. SITS considers different types of driver behaviour models, namely car-following, free flow and lane changing logic. Each vehicle in the network is considered to be in one of two driver regimes: free flow and car-following. Accelerations and decelerations are simulated using a new model, the Perception-Driver Model (PDM). The lane changing model in SITS uses a methodology that tries to mimic driver behaviour when producing a lane change.

The most important elements of SITS are the network components, travel demand, and driving decisions. Network components include the road network geometry, vehicles and the traffic control. To each driver is assigned a set of attributes that describe the drivers behaviour, including desired speed, and his profile (e.g., from conservative to aggressive). Likewise, vehicles have their own specifications, including size and acceleration capabilities. Travel demand is simulated using origin destination matrices given as an input to the model. The outputs of SITS consist in a continuously animated graphical representation of the traffic network and a set of different types of printouts of the data gathered by the detectors. These are the inputs to the dynamical analysis process.

Several experiments are carried out in order to analyse the dynamics of the traffic systems. The traffic flow is a time variant system but, in the work, it is shown that the Fourier

transform can be used to analyse the system dynamics. In fact traffic flow is a complex system but by embedding statistics and Fourier transform (leading to the concept of Statistical Transfer Function (STF)), the system dynamics can be analysed in the perspective of systems theory. In this perspective it is adopted a formalism based on the tools of systems theory. Moreover, the new dynamic description integrated the concepts of fractional calculus leads to a more natural treatment of the continuum of the Transfer Function parameters intrinsic in this system.

Motivated by the dynamical analysis it is studied a new control algorithm which adopt a Variable Speed Limit Indicator (VLSS) to control the vehicles speed. The results point out that it is possible to study traffic systems including the knowledge gathered with automatic control algorithms.

Keywords: Intelligent Transportation System

Traffic control

Simulation

Fractional-order systems

Dynamical analysis

Resumé

Ce travail propose un Simulateur de Systèmes Intelligents de Transport (*Simulator of Intelligent Transportation Systems – SITS*) qui a pour base un abordage microscopique pour simuler des conditions réelles de trafic sur un réseau de routes urbaines e non urbaines, considérant différents types de véhicules, de conducteurs e de routes. Ayant pour base les résultats de ce simulateur il faut effectuer l'analyse dynamique des divers phénomènes de trafic (dispositifs de contrôle routier e différentes géométries du réseau routier en prenant en considération des jonctions de routes e des routes d'accès) par l'application d'un nouveau formalisme de modelage basé sur l'intégration de la statistique avec la transformée de Fourier.

Sur le SITS chaque véhicule est modelé comme une individualité sur le réseau. Pour cela une nouvelle structure de modelage orienté à l'état (*State-Oriented Modelling – SOM*) a été développée. Sur cette structure de modelage chaque véhicule sur le réseau a un seul état possible à chaque période de l'épreuve. La transition entre états dépend du modèle du comportement du conducteur et de l'environnement autour de lui. Le SITS considère différents types de modèles pour le comportement du conducteur, comme par exemple le suiveur de véhicule (*car-following*), le livre flux (*free-flow*) et la logique de changement de bande routière (*lane changing*). Chaque véhicule sur le réseau assume un des deux régimes : *free flow* ou *car-following*. Les accélérations ou le contraire sont simulées à travers un nouveau modèle, le modèle de perception du conducteur (*Perception-Driver Model – PDM*). Le modèle *lane changing* utilisé sur le SITS a une méthodologie qui imite le comportement du conducteur sur le procédé de changement de bande routière.

Les éléments les plus importants sur le SITS sont les composés qui structurent le réseau routier, la détermination des parcours pour chaque véhicule et les décisions prises par le conducteur. Les composés du réseau routier incluent la géométrie des routes, les véhicules et le contrôle routier. A chaque conducteur est attribué un ensemble de paramètres qui décrivent son comportement, comme par exemple, la vitesse souhaitée et son profil de conduite (du passif à l'agressif). De la même manière, les véhicules ont aussi leurs propres caractéristiques,

comme par exemple, les dimensions, la vitesse maximale et les capacités d'accélération et de freinage. La détermination des parcours pour chaque véhicule est effectuée par des principes du type Départ – Destination (O/D), sachant que ceux –ci sont considérés comme des valeurs d'entrée pour le modèle.

Les résultats du SITS consistent en la représentation graphique animée du réseau routier et d'un ensemble de différents types de sorties avec les données recueillies par les détecteurs. Ceux-ci constituent les données d'entrée pour le processus de l'analyse dynamique.

Plusieurs expériences ont été réalisées pour permettre l'analyse dynamique des systèmes de trafic. Il faut souligner le fait que le flux routier est un système qui varie dans le temps mais ce travail montre que la transformée de Fourier peut être utilisée pour l'analyse des systèmes dynamiques. En effet le flux routier est constitué d'un système complexe, mais à travers l'intégration de la statistique avec la transformée de Fourier qui mène au concept de Fonction de Transfert Statistique (*Statistical Transfer Function – STF*), un système dynamique peut être analysé sous la perspective de la théorie des systèmes. Sous cette perspective un formalisme ayant pour base des outils de la théorie des systèmes a été adopté. Par ailleurs, la nouvelle description dynamique intègre les concepts du calcul par fraction, ce qui conduit à un traitement plus naturel de la continuation des paramètres de la Fonction de Transfert, intrinsèque au système.

L'analyse dynamique a motivé le développement et l'évaluation des accomplissements d'un nouvel algorithme de contrôle, qui utilise des signes limites des vitesses variables (*Variable Speed Limit Indicators – VSLI*) pour contrôler la vitesse du véhicule. Les résultats obtenus montrent que l'étude des systèmes de trafic routier est possible, ainsi que la compréhension acquise à partir des algorithmes de contrôle automatique.

Mots-clefs : Système Intelligent de Transport

Contrôle de Trafic Routier

Simulation

Systèmes d'Ordre Fractionnaire

Analyse Dynamique

Siglas e Abreviaturas

Apresenta-se a seguir a descrição de algumas siglas e abreviaturas utilizadas ao longo deste trabalho.

CLIOS – Complex, large, integrated open system

FT – Função de Transferência

ITS – Intelligent Transportation Systems

PDM – Perception-driver Model

SACV – Sistemas Avançados de Controlo de Veículos

SAGT – Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego

SAIV – Sistemas Avançados de Informação para Viajantes

SATP – Sistemas Avançados de Transportes Públicos

SATR – Sistemas Avançados de Transportes Rurais

SIT – Sistemas Inteligentes de Transporte

SITS – Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte

SLVV – Sinai Limitadores de velocidade variável

SOM – State-Oriented Modelling

SOVC – Sistemas de Operação de Veículos Comerciais

STF – Statistical Transfer Function

VSLI – Variable Speed Limit Indicators

Índice

Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Problema	3
1.3 Motivação	5
1.4 Objectivos	6
1.5 Estrutura e Síntese da Dissertação	8
Capítulo 2 Sistemas Inteligentes de Transporte	11
2.1 Introdução aos sistemas de transporte	11
2.1.1 Caracterização dos sistemas de transporte	12
2.1.2 Componentes dos sistemas de transporte	13
2.2 Introdução aos sistemas inteligentes de transporte	15
2.2.1 Benefícios ou objectivos dos SIT	17
2.3 Evolução histórica	19
2.3.1 Preparação – (1930-1980)	19
2.3.2 Estudo da viabilidade – (1980-1995)	21
2.3.3 Desenvolvimento de sistemas – (1995-2004)	23
2.4 Principais categorias dos SIT	26
2.4.1 Sistemas avançados de gestão de tráfego	28
2.4.2 Sistemas avançados de informação para viajantes	36
2.4.3 Sistemas avançados de transporte público	41
2.4.4 Sistemas de operação de veículos comerciais	44
2.4.5 Sistemas avançados de controlo de veículos	50
2.4.6 Sistemas avançados de transporte rural	53

2.5	Linhas de investigação promissoras	54
2.5.1	Simulação e modelação	54
2.5.2	Sistemas totalmente automatizados/automáticos	55
2.6	Evolução e perspectivas de desenvolvimentos futuros	55
2.6.1	Desenvolvimento de protótipos	56
2.7	Conclusão	58
Capítulo 3 Modelação e simulação em SIT		61
3.1	Introdução	61
3.2	Modelação e simulação em SIT	63
3.2.1	Modelação e simulação de tráfego	64
3.2.2	Alguns projectos de modelação e simulação em SIT	67
3.2.3	Classificação dos modelos de simulação de tráfego	68
3.3	Modelos de fluxo de tráfego macroscópicos	69
3.4	Modelos de fluxo de tráfego mesoscópicos	72
3.5	Modelos de fluxo de tráfego microscópicos	73
3.5.1	Modelos de aceleração “ <i>Car-following</i> ”	74
3.5.2	Modelos de aceleração “ <i>free-flow</i> ”	79
3.5.3	Modelos de mudança de faixa (<i>lane changing</i>)	81
3.5.4	Algumas considerações	85
3.6	Validação e calibração	86
3.6.1	Dados de validação e calibração	87
3.6.2	Análise de sensibilidade	88
3.7	Limitações dos modelos de simulação de tráfego nos SIT	88
3.8	Técnicas computacionais para modelos de simulação microscópica	91
3.8.1	Programação por restrições	92
3.8.2	Lógica difusa (<i>Fuzzy Logic</i>)	93
3.8.3	Modelação qualitativa	94
3.8.4	Simulação paralela de eventos discretos	95
3.8.5	“ <i>Cellular automata</i> ”	96

3.8.6	Programação orientada aos objectos	97
3.8.7	Algoritmos genéticos	98
3.8.8	Redes neuronais	99
3.8.9	Computação paralela	100
3.8.10	Realidade virtual	102
3.8.11	Sistemas de informação geográfica	103
3.8.12	Sistema baseados em conhecimento	104
3.9	Estado da arte de modelos de simulação de tráfego	106
3.9.1	Modelos de simulação macroscópicos	106
3.9.2	Modelos de simulação mesoscópicos	108
3.9.3	Modelos de simulação microscópicos	110
3.10	Conclusão	122
Capítulo 4 Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte		125
4.1	Introdução	125
4.2	Fases de desenvolvimento do simulador SITS	126
4.2.1	Definição do problema	127
4.2.2	Definição conceptual do modelo	128
4.2.3	Recolha de dados de entrada	128
4.2.4	Construção do modelo de <i>software</i>	128
4.2.5	Validação e calibração do modelo	129
4.2.6	Plano experimentações/experiências	129
4.2.7	Execução da simulação	129
4.2.8	Recolha e armazenamento da informação	130
4.2.9	Análise da informação	130
4.3	Arquitectura global do SITS	130
4.4	Modelação orientada ao estado	132
4.5	Decisão do condutor	133
4.5.1	Regime de condução	133
4.5.2	Ambiente circundante	142
4.5.3	Modelo mudança de faixa de rodagem	142
4.5.4	Geometria da estrada	144

4.6	Interface com o utilizador (GUI)	147
4.7	Controlo de tráfego	150
4.8	Dados de simulação gerados pelo SITS	151
4.9	Calibração e análise de sensibilidade do simulador SITS	155
4.10	Conclusão	160

Capítulo 5 *Análise Dinâmica e Controlo de um Sistema de Tráfego*

5.1	Introdução	161
5.1.1	Notações adoptadas	162
5.2	Análise dinâmica do comportamento de dois veículos numa estrada com 1 faixa de rodagem	164
5.3	Análise dinâmica de uma estrada com 1 faixa de rodagem	167
5.3.1	Função de Transferência Estatística	170
5.3.2	Identificação da <i>STF</i>	174
5.3.3	Número de simulações <i>versus</i> tempo de processamento	176
5.3.4	Cálculo da <i>STF</i> através da Média aritmética ou da Mediana	178
5.3.5	Variação dos parâmetros da <i>STF</i>	179
5.4	Análise dinâmica de uma estrada com várias faixas de rodagem	184
5.4.1	Análise dinâmica de uma estrada com duas faixas de rodagem	185
5.4.2	Análise dinâmica de uma estrada com 3 faixas de rodagem	190
5.4.3	Análise do resultados obtidos	192
5.5	Análise do tráfego de veículos através da Entropia	193
5.5.1	Entropia <i>versus</i> comprimento da estrada	196
5.5.2	Entropia <i>versus</i> máxima variação de velocidade	197
5.5.3	Entropia <i>versus</i> estrada com uma e três faixas de rodagem	198
5.5.4	Entropia <i>versus</i> estrada com uma faixa e uma rampa de acesso	199
5.6	Controlo de tráfego em auto-estrada	200
5.6.1	Sistema de controlo adoptado	204
5.6.2	Análise dinâmica em malha fechada de um sistema de tráfego	206

5.6.3	Varição dos parâmetros da <i>STF</i> _____	208
5.6.4	Análise do comportamento dinâmico <i>versus</i> ρ _____	210
5.6.5	Varição da entropia ao longo da estrada _____	211
5.7	Conclusão _____	212
Capítulo 6 Conclusão _____		215
6.1	Introdução _____	215
6.2	Resumo do trabalho desenvolvido _____	216
6.2.1	Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte - SITS _____	216
6.2.2	Análise dinâmica de tráfego _____	218
6.2.3	Controlo de tráfego em auto-estrada _____	220
6.3	Contribuições da tese _____	221
6.4	Perspectivas de desenvolvimentos futuros _____	224
6.4.1	Simulador de sistemas inteligentes de transporte _____	224
6.4.2	Análise dinâmica de tráfego _____	225
6.4.3	Sistema de controlo de tráfego _____	225
6.5	Conclusão _____	226

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Sistema Inteligente de Transporte _____	3
Figura 2.1 – Taxionomia de Sistemas de Transporte _____	13
Figura 2.2 – Componentes externos de um Sistema de Transporte _____	15
Figura 2.3 - Evolução histórica dos SIT (http#6) _____	19
Figura 2.4 – Primeiro semáforo numa rua de New York em 1928 _____	20
Figura 2.5 - Projectos Euro regionais de ITS (http#38) _____	24
Figura 2.6- Nº de unidades VICS instaladas (VICS Center) (http#39) _____	25
Figura 2.7 – Sistema Via Verde (http#42) _____	31
Figura 2.8 - Recolha de informação para controlo de ramais de acesso (ramp metering) _____	32
Figura 2.9 – Deslocamento das barreiras separadoras das via de uma auto-estrada (http#8) _____	33
Figura 2.10 - Centro de Coordenação Operacional da Brisa _____	35
Figura 2.11 – Video-Hall de controlo _____	36
Figura 2.12 – Visualização da câmara e mapa de estradas com câmaras em Lisboa (http#40) _____	37
Figura 2.13 - Visualização da câmara e mapa de estradas com câmaras em Londres (http#41) _____	38
Figura 2.14 – WEBFLOW32 – Ecrã de fluxo de tráfego em Seattle (http#9) _____	38
Figura 2.15- Sistemas personalizados / portáteis - GPS + GSM + Internet _____	39
Figura 2.16 – Sistema de detecção de acidente _____	40
Figura 2.17 - Vehicle Information and Communication System (VICS) _____	41
Figura 2.18 – Sistema de informação sobre horários de autocarros (http#11) _____	42
Figura 2.19 - Informação sobre a localização dos vários autocarros (http#12) _____	43
Figura 2.20 – Visualização de percurso e criação de alarmes no sistema BUSVIEW _____	43

Figura 2.21 – Centro de Gestão Veículos Comerciais (Figueiredo et al., 2001 b))	45
Figura 2.22 - Identificação, classificação e localização automática do veículo	46
Figura 2.23 – Painel do sistema DIS	47
Figura 2.24 – Fila de camiões no projecto CHAUFFEUR	47
Figura 2.25 – Sistema TUBEXPRESS (http#58)	49
Figura 2.26 – Inserção de mercadorias nas cápsulas (http#58)	49
Figura 2.27 - Veículo com condução automática (http#14)	50
Figura 2.28 - Veículo autónomo OSU (http#13)	51
Figura 2.29 – Sistema ParkShuttle (http#44)	52
Figura 2.30 - Sistema ULTra (http#16)	57
Figura 2.31 - Sistema MAIT (http#43)	58
Figura 3.1 – Conservação do nº de veículos num segmento de estrada	70
Figura 3.2 – Regime car-following	75
Figura 3.3- Modelo proposto por Ahmed et al. (1996)	83
Figura 3.4 – Simulador DYNAMIT	108
Figura 3.5 –Editor gráfico TEDI	110
Figura 3.6 – Simulador AIMSUM	111
Figura 3.7 – Interface gráfico AIMSUM 3D	112
Figura 3.8 – CARSIM (http#25)	112
Figura 3.9 - Simulador HUTSIM	116
Figura 3.10 – Simulador PARAMICS	119
Figura 3.11 – Simulador SITRAS	120
Figura 3.12 – Simulador TRANSIMS	122
Figura 4.1 - Processo de modelação e simulação	127
Figura 4.2 – Arquitectura global do SITS	131
Figura 4.3 – Diagrama de estados do SOM	132
Figura 4.4 – Distância crítica entre dois veículos	135

Figura 4.5 – Distâncias a considerar pelo veículo c quando pretender efectuar uma mudança de faixa. _____	144
Figura 4.6 - Conceito de via e nodo _____	145
Figura 4.7 - Extracto de um ficheiro com informação sobre a rede de estradas _____	147
Figura 4.8 – Interface gráfico do simulador SITS _____	148
Figura 4.9 – Janela de configuração e controlo do simulador SITS _____	149
Figura 4.10 – Janela de visualização do sistema de tráfego _____	149
Figura 4.11 – Parâmetros de simulação do veículo seleccionado e do veículo que segue à sua frente _____	150
Figura 4.12 - Histograma velocidades no início, meio e fim de uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	152
Figura 4.13 – Curvas de nível que representam o número de veículos versus a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	153
Figura 4.14 - Fluxo de tráfego versus tempo simulação (s) e coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	153
Figura 4.15 – Curvas de fluxo versus densidade _____	156
Figura 4.16 - Curvas de nível que representam o número de veículos versus a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [20, 100]$ km h^{-1} _____	157
Figura 4.17 - Curvas de nível que representam o número de veículos versus a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [48, 52]$ km h^{-1} _____	158
Figura 4.18 - Curvas de nível que representam o número de veículos versus a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 5000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	159
Figura 5.1 – Esquema global sobre notação adoptada _____	163
Figura 5.2 - diagramas temporais captados pelos sensores colocados a) no início da estrada (i.e., $x = 0$ m) e b) na coordenada de estrada $x = 500$ m, considerando $v_1^1(0;0) = v_1^2(0;0) = 40$ km h^{-1} , $n_1 = 1$ e $l = 500$ m _____	164

- Figura 5.3 - Diagrama polar da FT $G_{1,1}(s;500,0)$ considerando $v_1^1(0;0) = v_1^2(0;0) = 40 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$ e $l = 1000 \text{ m}$ _____ 165
- Figura 5.4 - diagramas temporais captados pelos sensores colocados a) no início da estrada (i.e., $x = 0 \text{ m}$) e b) na coordenada de estrada $x = 500 \text{ m}$, considerando $v_1^1(0;0) = 40 \text{ km h}^{-1}$, $v_1^2(0;0) = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$ e $l = 500 \text{ m}$ _____ 166
- Figura 5.5 - Diagrama polar da FT $G_{1,1}(s;500,0)$ considerando, considerando $v_1^1(0;0) = 40 \text{ km h}^{-1}$, $v_1^2(0;0) = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$ e $l = 500 \text{ m}$ _____ 166
- Figura 5.6 – Estrada com $n_1 = 1$ faixa de rodagem _____ 168
- Figura 5.7 – Diagrama polar da FT considerando $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$, $n_v = 2000$ veículos e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} (simulação a) _____ 169
- Figura 5.8 - Diagrama polar da FT considerando $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$, $n_v = 2000$ veículos e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} (simulação b) _____ 169
- Figura 5.9 - Diagrama polar da SFT para $\omega \in [0, 0.1]$ rad s^{-1} considerando $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$, $n_v = 2000$ veículos e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} __ 171
- Figura 5.10 - Função de Transferência FT com e sem atraso, calculado pelo método da matriz pseudoinversa. _____ 174
- Figura 5.11 – Tempo de processamento e erro quadrático ϵ_{Bode} versus número de simulações n 177
- Figura 5.12 - Diagramas polares da SFT para $\omega \in [0, 0.07]$ rad s^{-1} considerando a média para a) $n = 500$ e b) $n = 1000$ simulações, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____ 178
- Figura 5.13 - Diagramas polares da SFT para $\omega \in [0, 0.07]$ rad s^{-1} considerando a mediana para a) $n = 500$ e b) $n = 1000$ simulações, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____ 179
- Figura 5.14 – Tempo de atraso τ versus Δv para $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} _____ 180
- Figura 5.15 - Pólo p versus Δv para $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} _____ 181
- Figura 5.16 - Ordem fraccionária α versus Δv para $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} _____ 181
- Figura 5.17 – Tempo de atraso τ versus v_{av} para $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} _____ 182
- Figura 5.18 - Pólo p versus v_{av} para $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} _____ 183

Figura 5.19 - Ordem fraccionária α versus v_{av} para $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $n_i = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	183
Figura 5.20 - Estrada com 2 faixas de rodagem ($n_i = 2$)	185
Figura 5.21 - Diagrama de Bode das amplitudes de $T_{1,k}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $k = 1,2$	186
Figura 5.22 - Diagrama Polar da STF para $\omega \in [0, 0.07] \text{ rad s}^{-1}$ de a) $T_{1,1}(s;1000,0)$ e b) $T_{2,2}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$	187
Figura 5.23 - Diagrama Bode de $T_{1,k}(s;1000,0)$ $v_{av} = 90 \text{ km h}^{-1}$, $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $k = 1,2$	187
Figura 5.24 - Parâmetro k_B de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus v_{av} para $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	188
Figura 5.25 - Parâmetro p de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus v_{av} para $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	188
Figura 5.26 - Parâmetro α de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus v_{av} para $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} .	189
Figura 5.27 - Parâmetro k_B de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus Δv para $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	189
Figura 5.28 - Parâmetro p de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus Δv para $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	189
Figura 5.29 - Parâmetro α de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus Δv para $n_i = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	190
Figura 5.30 - Estrada com 3 faixas de rodagem ($n_i = 3$)	191
Figura 5.31 - Diagrama Bode de $T_{1,k}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_i = 3$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $k = 1,2,3$	192
Figura 5.32 - Número observado de veículos n_i versus velocidade v e posição do sensor x , considerando uma estrada com uma faixa de rodagem, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70] \text{ km h}^{-1}$	194
Figura 5.33 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70] \text{ km h}^{-1}$	195
Figura 5.34 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 5000 \text{ m}$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70] \text{ km h}^{-1}$	197

Figura 5.35 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_{av} = 50$ km h^{-1} _____	198
Figura 5.36 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para estradas com uma e três faixas de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_k(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} , $k = 1, 2, 3$ _____	198
Figura 5.37 - Estrada com uma faixa de rodagem $n_1 = 1$ e uma rampa de acesso _____	199
Figura 5.38 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para estrada com uma faixa de rodagem ($l = 1000$ m) e uma ramal de acesso ($l = 200$ m), com $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_k(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} em ambas as vias _____	200
Figura 5.39 – Malha de controlo _____	201
Figura 5.40 - Estrutura geral de um sistema de controlo de fluxo de tráfego numa faixa de rodagem _____	203
Figura 5.41 - Elementos principais do sistema de controlo adoptado _____	205
Figura 5.42 - Estrutura geral do sistema de controlo adoptado _____	206
Figura 5.43 - Curvas de nível que representam o número de veículos versus a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem e sistema de controlo de velocidade, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	207
Figura 5.44 - Diagrama polar da SFT para $\omega \in [0, 0.1]$ rad s^{-1} de $T_1(s;1000,0)$ do sistema de malha fechada considerando $l = 1000$ m, $n_1 = 1$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	208
Figura 5.45 - Parâmetro τ versus v_{av} para o caso de sistemas de malha aberta e malha fechada, considerando $l = 1000$ m, $n_1 = 1$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $\Delta v = 20$ km h^{-1} _____	209
Figura 5.46 - Parâmetro ρ versus v_{av} para o caso de sistemas de malha aberta e malha fechada, considerando $l = 1000$ m, $n_1 = 1$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $\Delta v = 20$ km h^{-1} _____	209
Figura 5.47 - Parâmetro α versus v_{av} para o caso de sistemas de malha aberta e malha fechada, considerando $l = 1000$ m, $n_1 = 1$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $\Delta v = 20$ km h^{-1} _____	209
Figura 5.48 - Diagrama polar da SFT para $\omega \in [0, 0.1]$ rad s^{-1} de $T_1(s;1000,0)$ do sistema de malha fechada para a) $\rho = 0.25$ e b) $\rho = 0.75$, considerando $l = 1000$ m, $n_1 = 1$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	210
Figura 5.49 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para o caso malha fechada e malha aberta, estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 10000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} _____	212

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Aplicações de SIT (PIARC, 2000) _____	27
Tabela 3.1- Tipos de Modelos de Microsimulação _____	86
Tabela 3.2 - Modelos de Simulação de Tráfego _____	86
Tabela 4.1 – Resultados estimados para o tempo de reacção _____	141
Tabela 5.1 – Parâmetros da função de transferência (5.10) e (5.11) _____	173
Tabela 5.2 - ρ versus τ _____	211

Dissertação

Capítulo 1

Introdução

Neste capítulo faz-se um enquadramento desta tese de doutoramento, e mostra-se a importância do tema no contexto actual dos Sistemas Inteligentes de Transporte. Apresenta-se o problema em questão, a motivação que despoletou o desenvolvimento deste trabalho, os objectivos propostos e a contribuição dada. Finaliza-se o capítulo com um resumo e com a síntese do conteúdo de cada um dos capítulos integrados neste trabalho.

“The most incomprehensible thing about the world is that it is comprehensible”

Albert Einstein

1.1 Introdução

A área de investigação focada neste trabalho enquadra-se no contexto de Sistemas Inteligentes de Transporte. Assim, é importante introduzir e caracterizar com rigor este conceito, que assume, actualmente, uma importância significativa na obtenção e na manutenção de uma mobilidade sustentável, fundamental para a competitividade da sociedade moderna.

Os Transportes têm uma influência directa e uma importância vital no desenvolvimento económico e social da sociedade moderna, onde se verifica um aumento de exigência ao nível da mobilidade. É esta exigência de mobilidade que tem vindo a provocar ao longo do tempo, e principalmente nas últimas cinco décadas, um aumento do número de veículos em circulação. O número crescente dos veículos resultou numa saturação das vias de comunicação, com particular ênfase ao nível dos grandes centros urbanos, onde existe uma necessidade permanente de circulação entre locais geograficamente dispersos. Esta situação conduz à

ocorrência de frequentes congestionamentos do tráfego, acidentes e atrasos nas deslocações, para além do cada vez mais premente problema do aumento da poluição provocada quer pela emissão de gases, quer pelo ruído. Estas questões levam ao aumento da insegurança física e psicológica do ser humano e até à degradação ou perda de espaços públicos resultando numa diminuição do nível da qualidade de vida.

Várias soluções foram adoptadas para reduzir os efeitos provocados por estes problemas. Como exemplos, podem apontar-se a implementação de sistemas de segurança, tais como os cintos de segurança ou os *airbags*, e a construção de mais e melhores vias de comunicação. Apesar disso, o congestionamento de tráfego continua a aumentar, porque o número de veículos em circulação tem, também, aumentado. Assim, torna-se evidente que a solução mais adequada não passa somente pela construção de mais vias de comunicação, uma vez que são dispendiosas, têm um forte impacto ambiental e consomem bastante espaço, o que constitui uma importante limitação principalmente em áreas urbanas onde este é um bem escasso. Por outro lado, é também evidente que a melhoria da infra-estrutura da rede de transportes é essencial para o desenvolvimento económico. Nesta ordem de ideias, tornou-se necessário adoptar estratégias inovadoras, que originaram o conceito de Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), tendente a proporcionar novas formas susceptíveis de criar uma mobilidade sustentável nas nossas comunicações e na sociedade da informação.

De uma forma simplificada pode dizer-se que os SIT utilizam as tecnologias de informação, comunicação e controlo para melhorar o desempenho e a eficiência das operações da rede de transportes e, além disso atravessam áreas como, os transportes, a engenharia, as telecomunicações, o comércio electrónico, as finanças e a indústria automóvel. Esta natureza multidisciplinar aumenta a complexidade do problema porque requer a cooperação e transferência de conhecimento entre as várias áreas de investigação. Assim, a comunidade científica sentiu uma forte motivação para se dedicar ao estudo, investigação e desenvolvimento desta área. Genericamente pode dizer-se que os SIT (Fig. 1.1) são constituídos por utilizadores, vias de comunicação (estradas) e veículos mais inteligentes, de forma a aumentar a eficiência dos transportes, a proporcionar maior conforto e segurança (eivar a qualidade de vida) e preservar o meio ambiente.

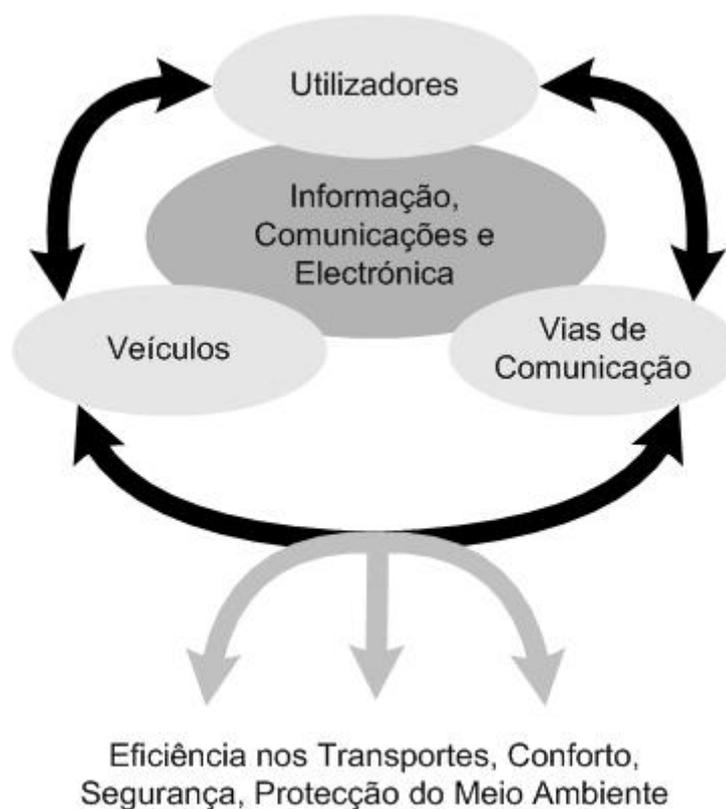


Figura 1.1 – Sistema Inteligente de Transporte

1.2 Problema

O congestionamento de tráfego nas áreas urbanas e nas auto-estradas constitui actualmente um dos problemas mais importantes na área dos transportes. O congestionamento durante as horas de ponta estende-se por vários períodos de tempo, cada vez maiores, ao longo do dia. Este facto implica a perda de mobilidade e de segurança, assim como a degradação da qualidade do ar. Como resultado surgem perdas económicas directas, devido aos atrasos, e indirectas devido ao impacto ambiental. Na maior parte dos casos, a capacidade das estradas não pode ser aumentada devido às restrições anteriormente apontadas. Assim, duas formas de resolver o problema de congestionamento consistem em, melhorar a utilização dos sistemas existentes, através de uma gestão de tráfego mais eficiente e da criação de estratégias operacionais adequadas, e melhorar a geometria das estradas e auto-estradas existentes.

As operações de tráfego nas zonas congestionadas das estradas são muito complexas, uma vez que os condutores são diferentes e, por isso, utilizam abordagens distintas para viajar através dessas zonas enquanto interagem com outros condutores. Para entender a ocorrência de estrangulamentos e arranjar soluções, é necessário efectuar uma análise detalhada sobre as interacções entre veículos. Para tal recorre-se ao desenvolvimento de teorias de tráfego para explicar o comportamento do condutor ao nível microscópico, cujos principais elementos são a aceleração e a mudança de faixa. A modelação e a simulação de tráfego é uma das ferramentas mais importantes com vista a alcançar esse objectivo. Nesta perspectiva, a utilização de técnicas de modelação matemática, para a simulação, constitui uma parte importante do processo de avaliação das iniciativas de transporte. De facto, a simulação matemática permite modelar, identificar e quantificar os prováveis impactos e as taxas de benefício para o sistema de transporte, resultantes da implementação de estratégias de controlo e gestão de tráfego. Assim, pode dizer-se que o processo de modelação e simulação é uma “arte” baseada na observação de fenómenos reais e no entendimento dos mecanismos subjacentes, (nomeadamente as características técnicas tais como aceleração, velocidade máxima ou espaço da estrada a percorrer) que permitem desenvolver programas computacionais baseados na representação desses mecanismos. A simulação microscópica é uma ferramenta adequada para o estudo dos sistemas de gestão de tráfego, através da representação das condições reais de circulação e da modelação do comportamento do condutor, o que permite a análise dinâmica dos efeitos provocados na rede de transporte por qualquer alteração a nível de veículos, das configurações das estradas e do comportamento dos condutores.

O comportamento de aceleração do condutor, quando se encontra no regime seguidor de veículo (*car-following*), tem sido exaustivamente estudado desde 1950. Neste regime assume-se que os veículos seguem sempre o seu líder, isto é, que acompanham o veículo imediatamente à sua frente. Contudo, a estimação dos parâmetros destes modelos usando dados microscópicos (*e.g.*, velocidade de veículo em análise e do seu líder, distância entre veículos e aceleração exercida pelo veículo) recolhidos de sistemas de tráfego reais, não tem sido devidamente explorada. Por outro lado, os investigadores começaram a prestar atenção ao comportamento de aceleração no regime fluxo livre (*free-flow*), no início da década de 80. No regime *free-flow*, os condutores não se encontram muito próximo dos seus líderes e, por isso, têm a liberdade de tentar atingir uma velocidade desejada. Os parâmetros de modelos de aceleração gerais, que

conseguem representar o comportamento do condutor nos regimes *car-following* e *free-flow*, não foram ainda estimados (Ahmed, 1999). Os modelos de mudança de faixa (*lane changing*) são utilizados para a modelação do comportamento do condutor no que diz respeito ao processo de mudança de faixa. Estes modelos começaram ser mais explorados à medida que os simuladores de tráfego microscópicos foram ganhando relevo como importantes ferramentas para o estudo do comportamento de tráfego e para o desenvolvimento e avaliação de diferentes estratégias de controlo e gestão de tráfego.

Neste trabalho, apresenta-se uma plataforma de simulação microscópica para tráfego urbano e não urbano, que permite modelar o comportamento de aceleração e de mudança de faixa do condutor, com o objectivo de efectuar a análise dinâmica de sistemas de tráfego para que se possam estudar novas estratégias de controlo e gestão de tráfego. Esta estratégia inclui o melhoramento de modelos existentes e o desenvolvimento de modelos novos, assim como a utilização de novos formalismos de modelação baseados em estatística e na transformada de Fourier tendo em vista a análise dinâmica dos vários fenómenos associados ao sistema de tráfego.

1.3 Motivação

Tem sido realizada alguma investigação no âmbito dos SIT no sentido de desenvolver sistemas de gestão e informação de tráfego, e de criar estratégias operacionais adequados para lidar com os problemas que resultam de situações de congestionamento. Algumas aplicações dos SIT, tais como o controlo dinâmico de tráfego e a orientação de percursos, têm vindo a ganhar cada vez mais importância como ferramentas eficientes para a gestão de tráfego. Estas aplicações envolvem a disseminação de informação, a partir de um centro de gestão de tráfego, para todos os condutores e a implementação de algumas estratégias de gestão e controlo. O impacto da informação e das estratégias de controlo no fluxo de tráfego só pode ser modelado de uma forma realista através da resposta individual de cada condutor à referida informação. Por exemplo, a avaliação de diferentes estratégias de resposta a incidentes que utilizam sinalização nas vias, necessita da modelação da resposta do condutor à sinalização e de um modelo para o seu comportamento na situação de mudança de faixa. Verifica-se, assim,

que a representação explícita e detalhada do comportamento individual dos condutores assume um papel relevante neste tipo de aplicações.

A simulação microscópica de tráfego é, não só uma ferramenta importante para a análise de tráfego mas também particularmente valiosa no contexto das tecnologias associadas aos SIT e dos sistemas dinâmicos de gestão de tráfego. Em especial tem um papel importante no que concerne à simulação do comportamento do condutor que desempenha um papel importante na análise das características do fluxo de tráfego em presença de tecnologias dos SIT, como a utilização de sinalização nas vias, os painéis de mensagens variáveis o controlo de tráfego e os sistemas de orientação de percursos. A capacidade da estrada pode ser influenciada pelo padrão de aceleração dos condutores e pelo número de mudanças de faixa de rodagem. Portanto, é necessário ter uma particular atenção a estes dois parâmetros para que se consigam perceber as relações e a dinâmica do fluxo de tráfego. Assim, um elemento importante de um simulador de tráfego é o conjunto de modelos do comportamento do condutor que é utilizado para simular o movimento dos veículos na rede de estradas. A fiabilidade dos resultados da simulação depende directamente da modelação efectuada.

1.4 Objectivos

O principal objectivo deste trabalho é dar uma contribuição formal para a evolução dos sistemas de controlo e gestão de tráfego, através da simulação microscópica de sistemas de tráfego reais e da utilização de novos formalismos de modelação que permitem a realização da análise dinâmica de vários parâmetros relacionados com o fluxo de tráfego. Os resultados obtidos pela realização do processo de análise dinâmica constituem elementos de avaliação relativos aos impactos da implementação de estratégias de gestão e controlo no sistema de tráfego real.

A simulação microscópica exige uma descrição detalhada do sistema de tráfego, nomeadamente quanto à geometria da estrada, aos veículos e aos condutores. É necessário identificar convenientemente o sistema e estimar os principais parâmetros que o caracterizam, assim como as variáveis de saída pretendidas para que a modelação do sistema resulte o mais aproximada possível ao sistema real. Para analisar o comportamento dos veículos podem ser

consideradas diferentes geometrias de estradas incluindo cruzamentos, bifurcações e ramais de acesso a auto-estradas. Além disso, poderá ser simulado um sistema de controlo de tráfego utilizando semáforos, sistemas de controlo de ramais de acesso e painéis electrónicos com informação de trânsito (*e.g.*, velocidade máxima permitida). Assim, os elementos considerados num simulador de tráfego são os componentes da rede de estradas, a definição dos percursos para cada veículo e as decisões tomadas pelo condutor. Nos componentes da rede de estradas estão incluídos a geometria das estradas, os veículos e o controlo de tráfego. A cada condutor é atribuído um conjunto de parâmetros que descrevem o seu comportamento, nomeadamente, a velocidade desejada e o seu perfil de condução (*e.g.*, desde passivo até agressivo). Da mesma forma os veículos também têm as suas próprias características nomeadamente, as dimensões, velocidade máxima e as capacidades de aceleração e travagem. A definição dos percursos para cada veículo pode ser efectuada através de matrizes do tipo Origem-Destino (O/D). As decisões tomadas pelo condutor podem ser influenciadas por vários fenómenos nomeadamente, a geometria da estrada, o ambiente circundante, o regime de condução e a mudança de faixa de rodagem. A geometria da estrada faz parte dos dados de entrada, pelo que o simulador deve permitir a especificação da rede de estradas de uma forma simples e rápida. O ambiente circundante refere-se às condições de tráfego à sua volta (*e.g.*, os sinais de trânsito, os semáforos, os peões, as condições da via, as condições atmosféricas e a geometria da estrada), que devem ser consideradas na modelação do sistema. Na modelação do comportamento do condutor é necessário ter em atenção o regime de condução e o processo de mudança de faixa. Deve ser adoptada uma técnica computacional adequada que permita a integração dos vários modelos de cada uma das entidades do sistema de forma a modelar individualmente cada um dos fenómenos e, assim, caracterizar cada um deles com mais pormenor e realismo. O recurso à programação orientado aos objectos permite um estilo de programação modular que é apropriado para situações onde se pretende simular a interacção entre diferentes modelos.

O objectivo fundamental da análise dinâmica de um sistema de tráfego é avaliar a evolução do tráfego de veículos ao longo de uma estrada, o que passa por estimar a influência da velocidade dos veículos, do comprimento da estrada e do número de faixas de rodagem sobre o fluxo de tráfego. Para tal é necessário efectuar um conjunto de experiências utilizando um simulador de tráfego com as características referidas anteriormente. Os resultados gerados pelo simulador têm que ser tratados e interpretados. O recurso a ferramentas de análise

normalmente utilizadas em teorias de sistemas é uma possibilidade a considerar. Apesar do sistema de tráfego ser um sistema variante no tempo, a transformada de Fourier poderá ser uma hipótese para analisar o comportamento dinâmico do sistema.

Numa estrada com várias faixas de rodagem, pode-se tentar obter a Função de Transferência (*FT*) entre o fluxo de tráfego medido por dois sensores colocados em determinados pontos da estrada. Todavia, devido à natureza estocástica dos parâmetros envolvidos na simulação obtêm-se diferentes *FT*'s apesar de terem os mesmos parâmetros de entrada. Este fenómeno torna a análise do sistema muito complexa, não existindo neste momento ferramentas eficientes e capazes de gerar resultados satisfatórios. Para tratar um sistema deste tipo, que inclui tarefas aleatórias num ambiente não estruturado, será necessário recorrer a conceitos alternativos, nomeadamente o recurso a outras ferramentas matemáticas. A análise dinâmica de tráfego requer o desenvolvimento de novos métodos que permitam considerar grandes volumes de dados e relações que dependam do tempo, como por exemplo a integração da estatística (apropriada para lidar com grandes volumes de dados) com a transformada de Fourier (adequada para tratar relações que dependam do tempo). Por outro lado e ainda necessário, considerar a variação contínua dos parâmetros do sistema, pelo que a utilização de um sistema de ordem fraccionária parece ser o processo mais adequado para descrever o comportamento dinâmico do fluxo de tráfego. A entropia, que permite quantificar a dispersão de velocidades verificada num determinado ponto da estrada, é uma ferramenta matemática complementar para analisar a evolução do tráfego de veículos ao longo de uma estrada.

1.5 Estrutura e Síntese da Dissertação

Neste capítulo procedeu-se ao enquadramento do tema desta tese de doutoramento, no âmbito dos Sistemas Inteligentes de Transporte, chamando a atenção para a sua importância no contexto actual. Apresentaram-se o problema considerado e a motivação que levou ao desenvolvimento deste trabalho. Fez-se também, uma descrição dos objectivos propostos finalizando-se o capítulo com um resumo do conteúdo de cada um dos capítulos seguintes.

No capítulo 2 apresenta-se o tema central do trabalho, enquanto objecto de estudo, os Sistemas Inteligentes de Transporte. Faz-se uma breve resenha histórica sobre a sua evolução

e desenvolvimento nos EUA, Europa e Japão. Apresentam-se as suas principais categorias, caracterizando-as genericamente e ilustrando os seus campos de actuação com alguns exemplos. Este capítulo termina com a referência a duas linhas de investigação que parecem bastante promissoras no que diz respeito ao desenvolvimento dos SIT, nomeadamente a modelação e a simulação que são as principais ferramentas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

No capítulo 3 procede-se à definição e ao enquadramento do conceito de modelação e simulação em SIT, ferramenta central nesta investigação, caracterizando-a e situando-a no contexto dos Sistemas de Tráfego. Faz-se a classificação dos modelos de simulação de tráfego em relação ao nível de detalhe, com particular destaque para os modelos microscópicos, nomeadamente os modelos de aceleração *car-following* e *free-flow*, e os modelos de mudança de faixa *lane changing*. São ainda apresentadas algumas das principais limitações dos modelos de simulação de tráfego. Ao mesmo tempo, com base numa síntese bibliográfica, referem-se os vários tipos de técnicas computacionais utilizadas no processo de modelação e simulação de Sistemas de Tráfego, clarificando e caracterizando cada uma delas. Por último, complementa-se a revisão bibliográfica para obter uma panorâmica geral sobre alguns dos principais modelos de simulação de tráfego desenvolvidos até ao momento, no âmbito de outros trabalhos de investigação, com especial ênfase nos modelos de simulação microscópicos.

No capítulo 4 caracteriza-se o simulador desenvolvido designado por Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte (SITS) face às classificações referidas anteriormente. Trata-se de um modelo de simulação microscópico e estocástico para simular condições de tráfego reais em meios urbanos e em auto-estradas. Descreve-se a arquitectura do SITS, os seus módulos constituintes e os mecanismos desenvolvidos, incluindo a técnica de modelação orientada ao estado (*State-Oriented Modelling* - SOM), as técnicas para a modelação da decisão do condutor, nomeadamente os modelos de condução utilizados incluindo o modelo de percepção do condutor (*Perception-Driver Model* - PDM). Apresentam-se os dados resultantes do processo de simulação que são alvo de uma descrição detalhada e, por fim, descreve-se o processo de calibração e análise de sensibilidade com vista à validação do modelo de simulação desenvolvido.

No capítulo 5 procede-se à caracterização da análise dinâmica de um sistema de tráfego apresentando as ferramentas matemáticas adoptadas. Mostra-se que um sistema dinâmico

complexo, como é o caso do fluxo de tráfego, pode ser analisado na perspectiva da teoria de sistemas clássica utilizando um novo conceito, o de Função de Transferência Estatística (*Statistical Transfer Function* - STF) que integra a estatística e a transformada de Fourier. Assim, apresenta-se um novo formalismo que integra os conceitos do cálculo fraccionário na descrição dinâmica do sistema. Complementarmente descreve-se o processo de análise da interferência entre veículos que circulam numa mesma faixa de rodagem através da análise da variação da entropia para diferentes configurações de estrada e diferentes condições de tráfego. Neste capítulo procede-se, ainda, à descrição e à avaliação de desempenho, de um novo algoritmo que utiliza sinais limitadores de velocidade variáveis (SLVV) para controlar a velocidade do veículo em auto-estrada.

Por último, no capítulo 6 apresenta-se um resumo de trabalho desenvolvido, nomeadamente do simulador, incluindo a técnica e os modelos utilizados, da aplicação do novo formalismo matemático para a análise dinâmica do sistema de tráfego, e, ainda, do algoritmo de controlo de velocidade proposto. Apresentam-se também as contribuições originais do trabalho desenvolvido, e apontam-se algumas direcções possíveis a seguir com vista à evolução do simulador, da análise dinâmica e controlo.

Capítulo 2

Sistemas Inteligentes de Transporte

Neste capítulo procede-se à caracterização da área dos Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) apresentando-se as motivações e condições que proporcionaram o seu desenvolvimento. Assim, analisa-se o estado de arte dos SIT apresentando-se a sua evolução histórica, as suas categorias mais relevantes e ainda, uma perspectiva de desenvolvimento futuro no intuito de enquadrar o leitor na diversidade de áreas e tecnologias envolvidas no estudo dos SIT.

2.1 Introdução aos sistemas de transporte

Não se pode falar de Sistemas Inteligentes de Transporte, sem primeiro contextualizar e caracterizar o conceito de Sistemas de Transporte. Os Sistemas de Transporte constituem uma área vasta, alargada e ubíqua, uma vez que a sua importância se faz sentir nos campos político, social e económico. Os Transportes têm uma participação activa em quase todas as actividades sociais (Sussman, 2000).

Os Transportes têm impacto nas pessoas que os utilizam, nas pessoas que os operam e que neles trabalham e até nas pessoas que nem os utilizam, nem lá trabalham. Por exemplo a degradação da qualidade do ar causada pelos motores dos veículos, afecta toda a população.

Os Transportes são multidisciplinares, compreendendo três dimensões: tecnologia, sistemas e instituições.

- **Tecnologia**

Por tecnologia entende-se vias e infra-estruturas, propulsão, combustíveis e sistemas de orientação e controlo. Também se incluem aqui os materiais e a forma como estes são utilizados na construção das vias, infra-estruturas e veículos.

- **Sistemas**

Esta dimensão refere-se à análise da rede e à modelação da forma de interacção entre a procura e a oferta para produzir o fluxo associado à rede de transporte.

- **Instituições**

Esta dimensão constitui uma abordagem pragmática ao desenvolvimento e à operação dos Sistemas de Transporte. Estes são pensados estruturados e realizados por organizações que trabalham num determinado contexto social, político e económico.

Os Sistemas de Transporte podem ser enquadrados numa classe de sistemas denominada de Sistema Aberto, Complexo, Grande e Integrado (CLIOS - *complex, large, integrated open systems*) (Sussman, 2000). Considera-se que um sistema é complexo, quando é composto por um conjunto de subsistemas para os quais não se conhecem totalmente o grau e a natureza das suas inter-relações. O seu comportamento geral é difícil de prever, ainda que o comportamento de um dos seus subsistemas seja previsível. O impacto causado por um CLIOS é elevado em magnitude e em termos de extensão temporal e geográfica. Os subsistemas de um CLIOS são integrados, havendo recirculação de informação e de produtos entre eles. Considera-se que os CLIOS são abertos na medida em que incluem explicitamente aspectos sociais políticos e económicos. Todas estas características se aplicam aos Sistemas de Transporte, daí a sua caracterização como um CLIOS.

2.1.1 Caracterização dos sistemas de transporte

Existem várias formas de caracterizar os Sistemas de Transporte, neste trabalho optou-se pela utilização de uma taxionomia proposta por Sussman em 2000, que pode ser observada na figura 2.1.

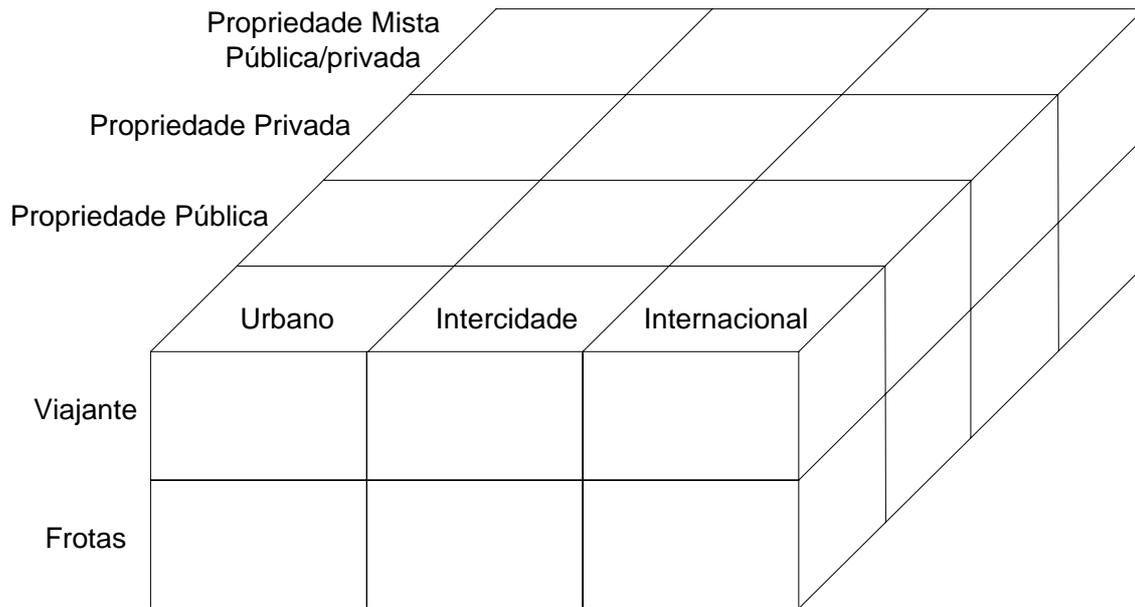


Figura 2.1 – Taxionomia de Sistemas de Transporte

Na taxionomia adoptada pode observar-se a existência de três dimensões. Numa primeira distinguem-se os sistemas que focam o fluxo dos viajantes e os sistemas que focam as frotas de veículos. Apesar de existirem semelhanças na forma de operação destes dois sistemas, existem algumas diferenças fundamentais nas suas características. Numa segunda dimensão distinguem-se as áreas geográficas servidas pelos sistemas de transporte. Consideram-se os transportes nas áreas urbanas, os transportes intercidades e os transportes internacionais. Aqui considera-se a variação de escala dos sistemas de transporte, que será menor nas áreas urbanas e significativamente maior quando se trata do âmbito internacional. A terceira dimensão refere-se à forma de operação dos sistemas de transporte a à entidade que os gere. Assim distinguem-se os sistemas de transporte públicos, os privados e aqueles que resultam de parcerias entre os sectores público e privado.

2.1.2 Componentes dos sistemas de transporte

Um Sistema de Transporte envolve numerosos componentes de origens distintas, que podem ser agrupados segundo duas perspectivas. Uma primeira, que se refere ao próprio sistema, por isso denominada interna – componentes internos, e uma segunda perspectiva que considera a relação do sistema com toda a envolvente externa, por isso denominada externa – componentes externos.

2.1.2.1 Componentes internos

Os componentes internos de um Sistema de Transporte podem ser divididos em três categorias consoante a sua funcionalidade. Assim, são de referir (i) os componentes físicos que constituem o sistema, (ii) os operadores que fazem o sistema funcionar e (iii) os planos de operação que permitem gerir o funcionamento do sistema.

Os **componentes físicos** englobam:

As infra-estruturas (incluindo vias, terminais e estações); os veículos; o equipamento (incluindo os acessórios de sistema); os sistemas de accionamento; os combustíveis e os sistemas de localização, controlo e comunicação.

- Os **operadores** incluem:

Trabalho (realizado por pessoas); trabalho organizado (sindicatos); gestão do sistema (gestão da informação e do conhecimento); competição entre transportes e comunicações (evolução das comunicações que permitem novas formas de trabalho e negócio enquanto as pessoas viajam); planeamento estratégico (planeamento de capitais e investimentos na área dos transportes); gestão das operações (gestão do funcionamento do sistema); tensão entre operações e marketing (orientação ao cliente/custo); gestão da manutenção (infra-estruturas e veículos); investigação operacional (quantificações analíticas do sistema) e administração do sistema de transporte (similar à administração de uma empresa).

- Os **planos operacionais** incluem:

Planos de escalonamento (chegadas e partidas); selecção de tripulações (para os veículos de transportes); distribuição do fluxo (balanceamento do tráfego); padrões de conexão (das vias e dos meios de transporte); negociação do custo/nível de serviço (sob o ponto de vista da empresa); planeamento de contingências (previsão de falhas e formas de as ultrapassar)

2.1.2.2 Componentes externos

Os componentes externos de um Sistema de Transporte são um factor importante a considerar quando se fala na função Transporte, uma vez que são eles que representam a ligação do Sistema de Transporte e o meio envolvente. Na figura 2.2 podem observar-se os componentes externos de um Sistema de Transporte

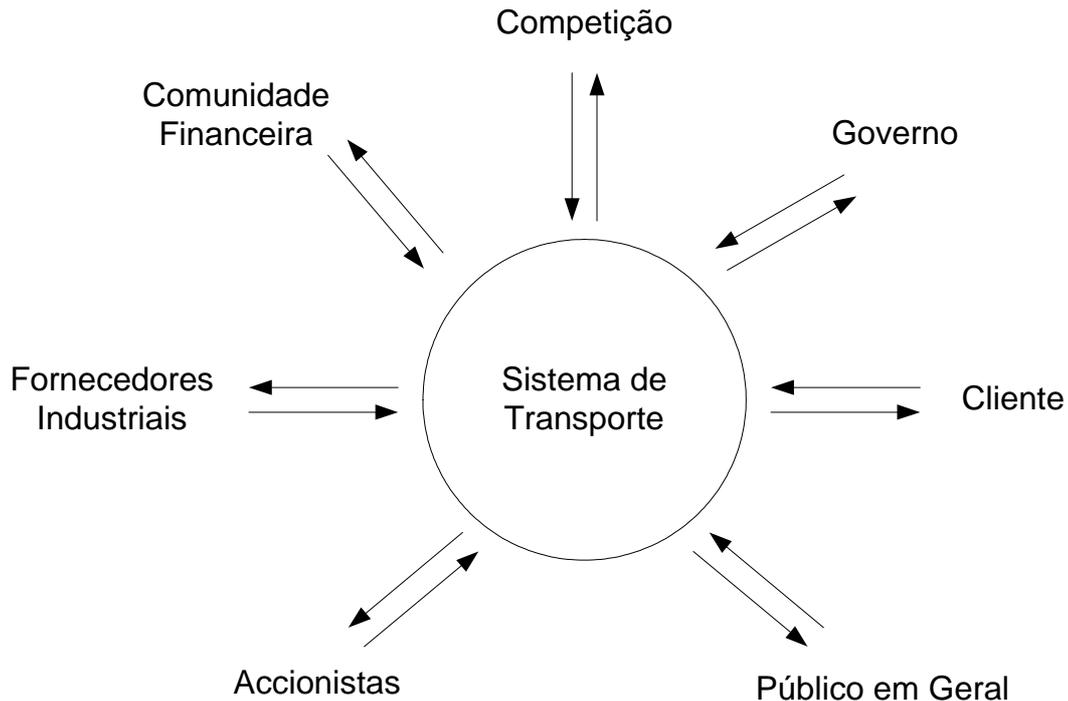


Figura 2.2 – Componentes externos de um Sistema de Transporte

Nesta componente incluem-se: o governo (como primeira entidade promotora do sistema de transporte); a competição (como factor de evolução das empresas ligadas ao sector); a comunidade financeira (como fonte de financiamento); a indústria fornecedora (de infra-estruturas, veículos e equipamentos); os accionistas; o público em geral e, por último, o cliente.

2.2 Introdução aos sistemas inteligentes de transporte

De uma forma simplificada pode dizer-se que os Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) têm por objectivo a optimização dos Transportes em geral, *i.e.*, a optimização de toda a estrutura envolvida no transporte de pessoas e bens fazendo uso de uma vasta gama de

tecnologias para a criação de vias de comunicação, veículos e utilizadores mais “inteligentes”, facilitando a fluidez no transporte de pessoas e mercadorias, como foi referido no Capítulo 1.

São várias as definições existentes para este conceito, a ITS América, um dos organismos mais importantes para o desenvolvimento desta área apresenta a seguinte definição ([http#2](#)):

“Os SIT englobam uma vasta área de tecnologias de informação, comunicações e controlo. Estas, quando integradas nas infra-estruturas dos sistemas de transporte e nos próprios veículos, ajudam a monitorar o fluxo de tráfego, reduzir congestionamentos, sugerir alternativas aos viajantes, aumentar a produtividade, salvar vidas, poupar tempo e dinheiro, reduzindo os impactos na saúde e no ambiente” .

O êxito no desenvolvimento e aplicação destas tecnologias poderá ser a chave para resolver muitos dos problemas de transporte dos nossos dias. As potencialidades dos SIT para encontrar soluções para os transportes europeus do século XXI são apontadas no documento “*A política europeia de transportes no horizonte 2010: a hora das opções*” publicado pela Comissão Europeia em 2003. Numa abordagem visando o aperfeiçoamento do sistema europeu de transportes, devem ser encaradas três questões principais:

- **Segurança** – o transporte rodoviário é, claramente, o meio de transporte com maiores custos em termos de segurança, ceifando 40 000 vidas por ano na Europa;
- **Poluição e saúde** – actualmente existe um grande consenso sobre o facto de a emissão de gases nocivos constituir um perigo real para o futuro da humanidade. Verifica-se um aumento dos problemas respiratórios nas zonas urbanas e, num mundo em que as viagens são uma necessidade quotidiana, o congestionamento crescente do tráfego torna a vida cada vez mais enervante;
- **Congestionamentos** – os engarrafamentos que se registam nos principais itinerários internacionais continuam a ser um problema de fundo e o congestionamento urbano e interurbano exige uma acção imediata.

Uma melhor informação e uma maior fluidez do tráfego tornarão mais previsíveis a duração dos percursos, reduzindo o nervosismo dos condutores e permitindo uma melhor coordenação entre os viajantes e os que aguardam a sua chegada. A redução do congestionamento implicará também uma utilização mais eficiente do combustível,

diminuindo os custos de funcionamento e as emissões nocivas. Os SIT podem também alertar antecipadamente para a ocorrência de acidentes rodoviários e outros incidentes, através de painéis de mensagens variáveis, permitindo aos condutores reduzir a velocidade antes de se depararem com o tráfego parado, diminuindo assim o número de acidentes secundários (Ghosh e Lee, 2000).

2.2.1 Benefícios ou objectivos dos SIT

Os principais objectivos dos SIT, que também podem ser vistos como benefícios, resumem-se a três grandes questões: aumento da Segurança; preservação do meio ambiente e aumento da eficácia e eficiência dos transportes (traduzidos em poupança de tempo e dinheiro).

Aumento da segurança

Um dos objectivos mais importantes é, sem dúvida, o aumento de segurança que os SIT conferem aos veículos e infra-estruturas de transporte. A evolução da tecnologia permitiu o desenvolvimento de sistemas integrados nos veículos cuja função é assistir o condutor durante a viagem, nomeadamente, sistemas de localização e sistemas activos de segurança como, assistente de condução, assistente de mudança de faixa de rodagem, sistema de prevenção de colisão e sistema de detecção de fadiga e erro do condutor. Desta forma verificou-se uma redução da gravidade dos acidentes relacionados com os transportes rodoviários.

A segurança é uma prioridade dos gestores das infra-estruturas, que utilizam uma grande variedade de tecnologias SIT tais como, controlo coordenado de tráfego, controlo de ramais de acesso à vias (*ramp metering*), painéis de mensagens variáveis, sistemas de detecção de acidentes e de tráfego e sistemas de notificação de condições climatéricas. O objectivo é aumentar a qualidade das redes de transporte, monitorando e controlando as condições de utilização das infra-estruturas de forma a assegurar viagens fluidas e em segurança.

Preservação do meio ambiente

A utilização das tecnologias associadas aos SIT produz também, indirectamente, efeitos positivos no impacto ambiental do planeta Terra. Uma grande parte dos benefícios nesta

categoria, assenta no princípio de que a racionalização no consumo do combustível, por parte dos veículos, produz menos emissões de CO₂. São vários os tipos de sistemas que permitem, indirectamente, a referida racionalização de combustível:

- Sistemas de navegação e informação de trânsito que indicam aos condutores quais os percursos mais curtos, de forma a evitar os atrasos por congestionamento de trânsito, e trajectos redundantes;
- Sistemas de informação sobre disponibilidade de parques de estacionamento, que indicam directamente ao condutor um lugar vago em vez de este ter de perder tempo à procura;
- Sistemas de informação em tempo real sobre partidas e chegadas de transportes, que motivam os utentes a utilizar os transportes públicos.

Eficácia e eficiência dos transportes

Os SIT têm um impacto elevado no que diz respeito à redução do factor tempo relacionado com a viagem. A elevada quantidade de informação disponível permite assegurar o planeamento da viagem, reduzindo drasticamente os desperdícios de tempo. Assim, as informações de condições de tráfego e de previsão das viagens permitem uma definição de trajectos, mais precisa e eficiente, aumentando a rapidez das mesmas. As informações sobre horários de transportes públicos permitem a selecção apropriada de um transporte reduzindo os tempos de espera. Também a nível das infra-estruturas, se verifica o efeito dos SIT no que diz respeito à redução do tempo de viagem, por exemplo, através de sistemas de cobrança automáticos, de sistemas de mensagens variáveis e de sistemas de controlo de ramais de acesso que notificam os condutores de potenciais pontos de congestionamento de trânsito, podendo sugerir trajectos alternativos. Os SIT permitem aos gestores de frotas, um controlo mais eficiente do tempo de entregas através da utilização de: sistemas de localização de veículos, sistemas de navegação e sistemas de pesagem electrónica automática.

Na prossecução dos objectivos referidos, tem sido desenvolvida, no âmbito dos SIT, uma vasta gama de produtos e serviços com resultados visíveis em vários níveis: salvamento de vidas humanas; aumento da segurança das infra-estruturas de transporte; redução nos tempos

de deslocação; melhoramento na programação de deslocações e redução do impacto ambiental provocado pela poluição dos transportes.

Na secção seguinte apresenta-se o estado actual da arte na área dos SIT efectuando uma breve referência à evolução histórica dos SIT na Europa, nos Estados Unidos da América (EUA) e no Japão.

2.3 Evolução histórica

Os SIT surgiram no início dos anos trinta, tendo sofrido uma evolução inicial muito lenta uma vez que a tecnologia disponível não permitia a implementação de soluções que iam sendo projectadas, no sentido de dar resposta às necessidades. Os desenvolvimentos principais surgiram na Europa, nos EUA e no Japão (Masaki, 1998), tendo atravessado três fases distintas: preparação, estudo da viabilidade e desenvolvimento de sistemas, como se pode observar na figura 2.3.

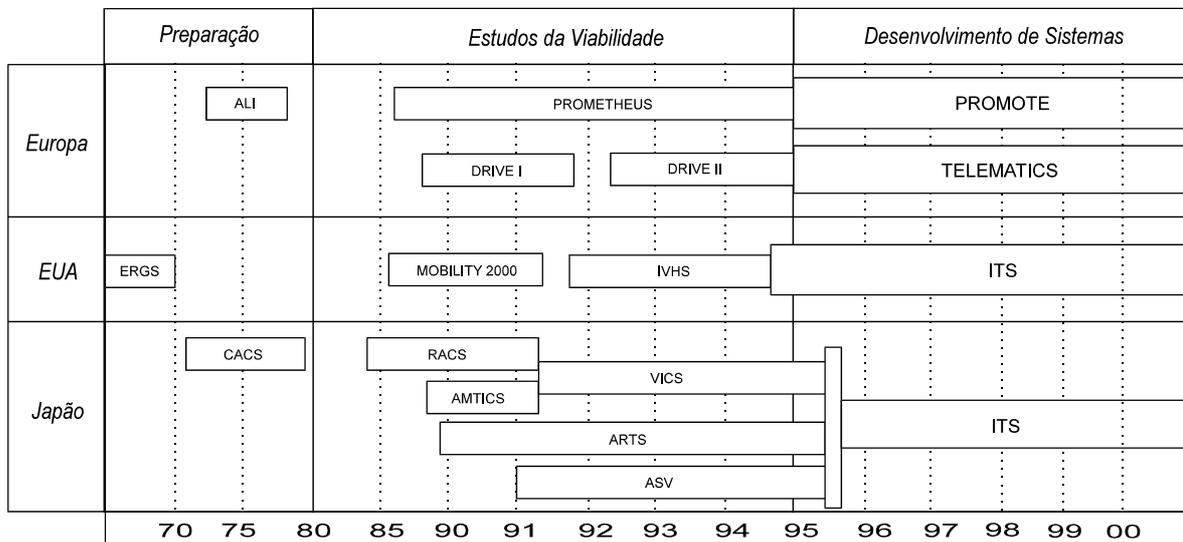


Figura 2.3 - Evolução histórica dos SIT (http#6)

2.3.1 Preparação – (1930-1980)

Foi o primeiro período de desenvolvimento dos SIT. Nesta fase o nível de desenvolvimento tecnológico não era ainda suficientemente elevado, pelo que a construção de novas estradas

era a estratégia mais atractiva. Na literatura é referido com frequência que o primeiro sistema SIT implementado foram os semáforos, em 1928, nos EUA. Posteriormente, em 1939, foi apresentado em New York, o conceito de sistemas de estradas automáticas (AHS). Contudo, é normal considerar-se que o desenvolvimento dos SIT só teve início nos anos 60, com o aparecimento da primeira sinalização de tráfego controlada por computador, nos EUA.



Figura 2.4 – Primeiro semáforo numa rua de New York em 1928

Entre o final dos anos 60 e 1970 foi desenvolvido, nos EUA o ERGS (*Electronic Route Guidance Systems*), que utilizava um sistema de comunicação estrada/veículo de duas vias, para apoiar o processo de selecção de percursos. Durante os anos 70 foram desenvolvidos vários sistemas, nomeadamente o CACS (*Comprehensive Automobile Traffic Control System*) e o ALI (*Autofahrer Leit und Information System*) respectivamente no Japão e na Alemanha, que são basicamente sistemas para definição e selecção de percursos baseados nas condições de tráfego em tempo real (French, 1999). A década de 60 também teve uma grande importância no âmbito dos SIT, caracterizando-se por uma evolução tecnológica significativa na área dos microprocessadores. Foi também nesta década que surgiram os primeiros sistemas GPS (*Global Positioning System*), que são um componente importante dos SIT, embora tenham resultado do desenvolvimento de um projecto militar (Figueiredo *et al.*, 2001 a)).

2.3.2 Estudo da viabilidade – (1980-1995)

O período entre 1980 e 1995 caracterizou-se por uma explosão de programas de desenvolvimento subsidiados conjuntamente pelos governos e pela indústria. Esses programas emergiram na sequência da evolução das tecnologias básicas para os SIT, verificada na fase precedente.

Na Europa, os governos, empresas e universidades de 19 países, estabeleceram o projecto PROMETHEUS (*Program for European Traffic with Efficiency and Unprecedented Safety*). Entre 1987 e 1994, foram desenvolvidas várias tecnologias associadas aos SIT, no âmbito deste projecto. Nos anos 80, foi efectuada a demonstração do veículo de teste VaMoRs em Munique (Graefe e Kuhnert, 1991). Neste protótipo, foram utilizadas duas câmaras de TV para “olhar em frente” com o objectivo de seguir automaticamente uma faixa de rodagem da estrada. Nos anos 90, um grupo liderado pela Daimler-Benz desenvolveu o veículo de teste VITA II (Ulmer, 1994). Este veículo incorporava 10 câmaras e 60 processadores, com o objectivo de manter o veículo no centro da faixa de rodagem, mantendo uma distância de segurança em relação ao veículo da frente e, ao mesmo tempo, evitando colisões com outros veículos através de manobras de ultrapassagem ou mudança de faixa de rodagem sempre que necessário. Outros projectos foram desenvolvidos no âmbito do projecto alargado PROMETHEUS, nomeadamente o projecto ARGO (Broggi *et al.*, 1999), desenvolvido na Universidade de Parma em Itália, que tinha como objectivo a concepção, desenvolvimento e teste de soluções inovadoras que permitissem o desenvolvimento de veículos de condução automática. O protótipo desenvolvido permite três tipos de condução: condução manual, onde o sistema monitoriza a actividade do condutor, alertando-o com sinais ópticos e acústicos no caso de detectar potenciais situações de perigo; condução supervisionada, neste caso o sistema alerta o condutor para a uma potencial situação de perigo e toma o controlo do veículo de forma a manter uma condução segura e condução automática, neste caso o sistema conduz o veículo de forma totalmente automática seguindo uma determinada rota (que pode ser alterada pelo próprio sistema) evitando obstáculos que possam surgir no percurso.

Outro projecto relevante é o DRIVE (*Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe*) para o desenvolvimento e teste de um sistema de comunicação, para apoiar o processo de gestão de tráfego (Tomisuka, 1997). A organização de fundos públicos e privados ERTICO

(*European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization*) foi criada na Europa, com o objectivo de apoiar o refinamento e implementação de um projecto Europeu de Telemática de Transportes (*Europe's Transport Telematics Project*).

Nos EUA, no final dos anos 80, a equipa de estudo Mobility 2000 criou as bases para a formação do IVHS America (*Intelligent Vehicle Highway Systems*) (Janet, 1992), que é um fórum público/privado para a consolidação dos interesses nacionais e a promoção de cooperação internacional na área dos SIT. Em 1994 o USDOT (*United States Department of Transportation*) alterou a sua denominação de IVHS para ITS America (*Intelligent Transportation Society of America*). Nesta altura foram desenvolvidos vários projectos em mais de oito locais dos EUA (Bishop, 1997). Um dos mais importantes foi o AHS (*Automated Highway System*), tendo sido conduzido pelo NAHSC (*National Automated Highway System Consortium*) constituído pelo Departamento de Transportes dos EUA, General Motors, Universidade da Califórnia e outras instituições. No âmbito deste projecto foram demonstrados, nas auto-estradas da Califórnia, vários veículos de teste totalmente automáticos.

No Japão, nos anos 80, foram desenvolvidos também alguns projectos nomeadamente, o RACS (*Road Automobile Communication System*) (Betsold, 1989) pelo Ministério da Obras Públicas e o AMTICS (*Advanced Mobile Traffic Information and Communication System*) (Koshi, 1989) pela Agência Nacional de Polícia. Nos anos 90, através da combinação de esforços com o Ministério dos Correios e Telecomunicações, trabalhando em projectos de normalização, foi possível combinar aqueles dois projectos no VICS (*Vehicle Information and Communication System*), que é um sistema de localização e informação de condições de tráfego, em tempo real, para a elaboração de rotas ou percursos.

Como exemplo de outros projectos desenvolvidos podem citar-se o ARTS (*Advanced Road Transportation Systems*) realizado pelo Ministério das Obras Públicas, cujo objectivo foi o desenvolvimento de sistemas de tráfego com integração de veículos e estradas e o ASV (*Advanced Safety Vehicle*) com o propósito de desenvolver tecnologias de segurança. Algumas organizações industriais e académicas organizaram a sociedade VERTIS (*Vehicle, Road and Traffic Intelligent Society*), que em 2003 se passou a designar de ITS Japan e cuja função é apoiar e realizar actividades que promovam o desenvolvimento dos SIT, nomeadamente, a troca de informação com os seus homónimos Europeus e Americanos, ERTICO e ITS América, respectivamente.

Em 1996, o Ministério das Obras Públicas e vinte e uma grandes organizações, nomeadamente, a Toyota, a Nissan, a Honda e a Mitsubishi, constituíram a associação *Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association*, e desde então têm vindo a desenvolver vários veículos totalmente automáticos para circular em auto-estrada (Tokuyama, 1997).

2.3.3 Desenvolvimento de sistemas – (1995-2004)

Na fase anterior realizaram-se vários projectos conducentes à obtenção da consolidação das bases técnicas para o pleno desenvolvimento e implementação dos SIT.

Por volta de meados dos anos 90, foi adoptada uma política uniformizada para se lidar com os SIT de uma forma consistente e harmoniosa. Este facto conduziu à fase actual, que se caracteriza pelo desenvolvimento de produtos exequíveis. Alguns projectos foram já desenvolvidos e implementados e alguns outros encontram-se ainda em fase de desenvolvimento.

Na Europa, na sequência de vários programas de investigação e desenvolvimento técnico, surgem orientações comunitárias para o desenvolvimento da Rede Transeuropeia de Transportes (RTE-T), cujo objectivo é o estabelecimento de interconexões e interoperabilidades, assegurando continuidade entre os serviços nos trajectos de longo curso nas áreas metropolitanas e através das fronteiras ([http#38](#)). Alguns projectos foram já lançados em toda a União Europeia destinados a resolver os problemas de transporte em regiões específicas. Estas iniciativas “euro-regionais” centram-se em questões SIT específicas, que incluem a melhoria dos sistemas de gestão de tráfego, a disponibilização de informações aos passageiros antes e durante as deslocações e o tratamento de questões relacionadas com a segurança rodoviária e com as situações de emergência. Alguns exemplos são: o SERTI - Serviços de informação transfronteiriça na costa mediterrânea, abrangendo a França, a Riviera Italiana e a Catalunha; o CENTRICO – Serviços de informação sobre a travessia no canal da Mancha; o ARTS – Serviço telemático permanente para gestão de tráfego, incluindo França, Espanha e Portugal; o VIKING – Serviços de informação a viajantes no Norte da Europa e o CORVETTE – Cooperação transfronteiriça nos Alpes. Na figura 2.5 podem ser observadas as áreas geográficas da Europa, abrangidas por alguns dos projectos referidos.



Figura 2.5 - Projectos Euro regionais de ITS ([http#38](#))

Ainda na Europa, mas com um âmbito diferente têm sido realizados outros projectos com resultados interessantes. Um exemplo é o projecto Chauffeur, realizado pela Daimler-Benz e alguns institutos de investigação, que consiste num sistema de controlo automático de veículos utilizado para controlo de camiões. O principal objectivo é o desenvolvimento de um camião não tripulado capaz de seguir automaticamente outro veículo conduzido por um condutor humano ([http#7](#)).

No Japão o desenvolvimento e implementação do sistema ETC (*Electronic Toll Collection System*), que é um sistema de pagamento automático nas portagens, cuja cobrança se efectua de acordo com o tipo de veículo e a distância percorrida, aliviou significativamente o congestionamento de tráfego acumulado junto das portagens. Um outro projecto em desenvolvimento é AHS (*Advanced Cruise-Assist Highway System*), já referido na secção anterior, cujo objectivo é apoiar as acções dos condutores no caso de previsão de acidente, em tempo real, através da coordenação entre os veículos e as vias, o que aumentou significativamente a segurança das viagens.

Ainda no Japão a disseminação de sistemas VICS ([http#39](#)), cujo desenvolvimento teve início na década de 90, aumentou significativamente, nos últimos anos, atingindo em Setembro de

2004 os 10.4 milhões de unidades instaladas, conforme se pode observar no gráfico representado na figura 2.6.

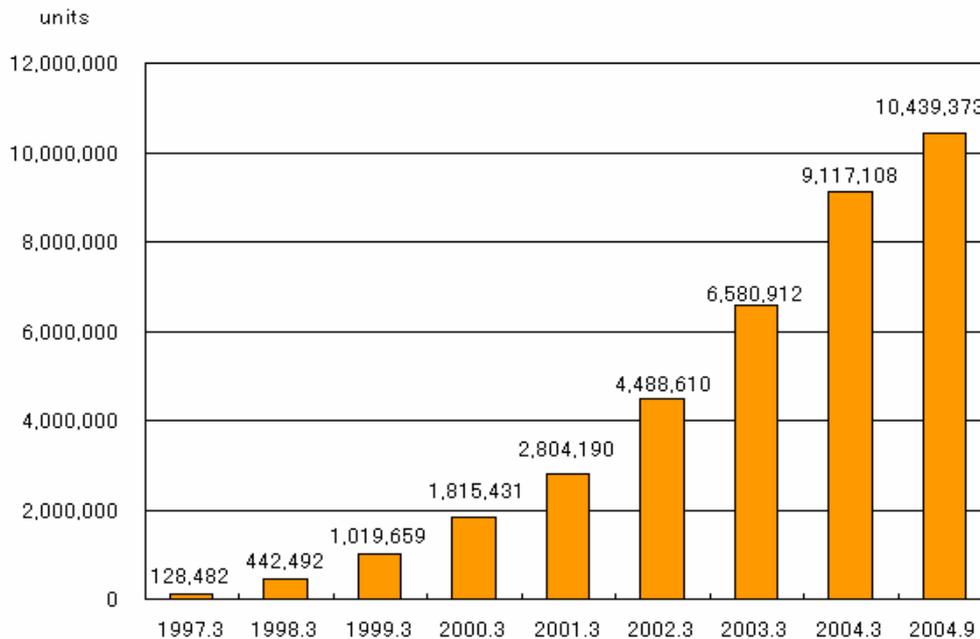


Figura 2.6- Nº de unidades VICS instaladas (VICS Center) (<http#39>)

Nos EUA, no final dos anos 90, o principal objectivo dos programas SIT passou a ser a difusão e integração em larga escala. Foi estabelecida uma parceria entre a Universidade de Berkley, o Departamento de Transportes da Califórnia e outras instituições do sectores público e privado para a programa PATH (*Partners for Advanced Transit and Highways*). O objectivo consiste na aplicação de tecnologia avançada para o aumento da segurança e capacidade das auto-estradas, assim como a redução do congestionamento de tráfego, da poluição e do consumo de energia. No âmbito deste programa, foram desenvolvidos alguns projectos, nomeadamente o ATMIS (*Advanced Transportation Management & Information Systems*) cujo objectivo é providenciar um sistema de informação para a gestão dos transportes e o AVCSS (*Advanced Vehicle Control and Safety Systems*) cujo objectivo é implementar sistemas de segurança e de controlo de veículos.

Alguns outros projectos foram implementados, nomeadamente o Illinois Tollway que fornece um serviço de informação de trânsito e de apoio a incidentes e que se destacou por ter recebido o prémio de segurança pública em 2004. Outro exemplo é o ARTIMIS (*Advanced Regional Traffic Interactive Management Information System*) desenvolvido em parceria pelo

Departamento de Transportes de Ohio e a Kentucky Transportation Cabinet, implementado na região de Cincinnati-Northern Kentucky com o objectivo de efectuar a gestão de congestionamentos de tráfego e incidentes nas auto-estradas em Ohio.

Foram referidos exemplos de sistemas já instalados e em funcionamento, ou ainda em desenvolvimento, com vista à implementação do conceito SIT. No entanto, muitos projectos desenvolvidos nesta área referem-se à construção de protótipos utilizados para a análise e estudo, em laboratório, de alguns aspectos relacionados com os SIT, nomeadamente gestão de tráfego, informação para o viajante e comportamento do condutor. Para o efeito são utilizadas ferramentas de modelação e criadas plataformas de simulação que permitem o estudo e obtenção de resultados e conclusões para o estabelecimento de sistemas no âmbito do conceito SIT. Como exemplos deste tipo de projectos podem citar-se: o DYNASMART (Mahmassani *et al.*, 1994), cujo objectivo é a avaliação de estratégias de informação, medição e controlo de tráfego; o PARAMICS ([http#34](#)) que permite a visualização e simulação de tráfego sendo aplicado à gestão e controlo de tráfego e ao fornecimento de informação aos viajantes e o AIMSUN2 (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*), desenvolvido no âmbito do projecto SMARTTEST cujo objectivo é o estudo do fluxo de tráfego convencional (Barceló e Ferrer, 1997). Os projectos referidos serão alvo de uma descrição mais pormenorizada no Capítulo 3.

2.4 Principais categorias dos SIT

No decorrer da evolução dos programas SIT, onde estiveram envolvidas organizações de vários países, nomeadamente da Europa, dos EUA e do Japão, houve a necessidade de estabelecer uma gama de aplicações no âmbito dos SIT, também denominadas de serviços ao utilizador. A ISO (*International Organization for Standardization*), em 1997, estabeleceu uma taxionomia para as referidas aplicações ou serviços ao utilizador (PIARC, 2000), que pode ser observada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Aplicações de SIT (PIARC, 2000)

Categorias	Aplicações
Gestão de Tráfego (GT)	Apoio ao planeamento de transportes
	Controlo de Tráfego
	Gestão de incidentes
	Gestão da procura
	Política de regulamentos de trânsito
	Gestão da manutenção de infra-estruturas
Informação para Viajantes (IV)	Informação antes da viagem
	Informação durante a viagem
	Informação durante a viagem em transporte públicos
	Serviços de informação pessoais
	Planeamento de rotas e apoio à navegação
Sistemas Avançados de Controlo de Veículos (CV)	Melhoramento da visão
	Operação de veículos automáticos
	Impedimento de colisão longitudinal
	Disponibilização de segurança
	Difusão de restrições pré colisão
Operação de Veículos Comerciais (OVC)	Distância de folga de veículos comerciais
	Processos administrativos de veículos comerciais
	Inspecção automática da segurança das vias
	Monitorização da segurança dentro dos veículos comerciais
	Gestão de frotas de veículos comerciais
Transportes Públicos (TP)	Gestão de transportes públicos
	Gestão da procura/resposta de transportes
	Gestão partilhada de transportes
Gestão de emergências	Notificação de emergências e segurança pessoal
	Gestão de veículos de emergência
	Notificação de incidentes e matérias perigosos
Pagamento electrónico	Transacções financeiras electrónicas
Segurança	Segurança das viagens públicas
	Aumento da segurança para utilizadores idosos ou com deficiência
	Junções inteligentes

Refira-se que as três últimas categorias representadas na tabela, a saber, “Gestão de emergências”, “Pagamento electrónico” e “Segurança” são transversais às cinco categorias anteriores. Por isso considera-se que pode haver um agrupamento das aplicações referidas em seis subsistemas (Shibata, 1999), a seguir identificados:

- Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego (SAGT);
- Sistemas Avançados de Informação para Viajantes (SAIV);
- Sistemas de Operação de Veículos Comerciais (SOVC);
- Sistemas Avançados de Transportes Públicos (SATP);
- Sistemas Avançados de Controlo de Veículos (SACV);
- Sistemas Avançados de Transportes Rurais (SATR).

É de referir que o termo “avançado” está neste momento ultrapassado, uma vez que o termo foi introduzido quando surgiu o conceito de SIT. No entanto, o termo permanece na denominação dos principais subsistemas de SIT, sendo adoptado em quase toda a literatura sobre o assunto. Estes subsistemas podem adoptar-se tanto em ambientes urbanos como rurais. Todavia, a aplicação de alguns deles, tais como o de Gestão de Tráfego e o de Transporte Público, originam maiores benefícios em ambientes urbanos, devido à gravidade dos problemas de congestionamento que estas zonas enfrentam. Os meios rurais têm características diferentes por isso os serviços proporcionados terão contornos diferentes, daí se considerar um subsistema específico para transportes rurais - SATR.

No que diz respeito aos transportes ferroviário, aéreo e marítimo, são já utilizados alguns dos componentes dos SIT, tais como os sistemas de posicionamento global (GPS). No entanto, neste trabalho serão apenas referidas as aplicações e projectos desenvolvidos no âmbito dos SIT aos transportes rodoviários.

A seguir descreve-se mais detalhadamente cada um dos subsistemas referidos.

2.4.1 Sistemas avançados de gestão de tráfego

Os Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego (SAGT) são uma das categorias fundamentais dos SIT. O objectivo é garantir que a capacidade da rede de vias rodoviárias é utilizada ao máximo, *i.e.*, melhorar as condições de tráfego, proporcionando uma melhor qualidade de

serviço, contribuindo para a optimização do Sistema de Transporte. Para o efeito têm que ser combinados três tipos de serviços:

- Coordenação de semáforos e sistemas de cobrança electrónicos, para minimizar atrasos e controlar filas de veículos;
- Controlo de ramais de acesso às vias rápidas e auto-estradas (*ramp metering*), para manter a densidade de veículos abaixo do nível de saturação;
- Detecção e gestão de incidentes, tais como acidentes rodoviários e avarias de veículos.

Os SAGT efectuem a recolha de informação, dentro de uma determinada área geográfica, para posteriormente a transmitirem aos centros de controlo de tráfego. Por sua vez os centros de controlo de tráfego processam esta informação, combinando-a com informação proveniente de outras fontes, incluindo aquela fornecida por veículos que actuam como “detectores móveis” inseridos no fluxo de tráfego. A informação recolhida permite gerir o sistema, seleccionando o número de veículos admitidos nos ramais de acesso às vias rápidas (SMARTTEST Report, 2000), ajustando semáforos e tratando eventuais incidentes. A informação obtida através destes sistemas, pode também ser transferida para os SAIV cujo objectivo é fornecer informação aos viajantes para que estes possam tomar as decisões mais adequadas relativamente às suas viagens ou meios de transporte e horários a adoptar. Assim, os viajantes podem decidir permanecer na sua rota original e sofrer os eventuais atrasos, adoptar uma rota alternativa, escolher um meio de transporte diferente ou trocar a sua hora de partida.

Os três elementos principais dos SAGT, (Figueiredo, *et al.*, 2001 b)) são:

- ***Equipa de recolha de informação***, para monitorar as condições de operação de uma via ou de uma rede de vias;
- ***Sistemas de suporte para os operadores do sistema***, constituídos por câmaras, sensores, semáforos, painéis electrónicos e bases de dados. Ajudam os operadores de sistema no processo de controlo e gestão da rede em tempo real;

- **Sistemas de controlo de tráfego em tempo real**, que utilizam a informação fornecida pelos dois primeiros elementos para modificar a operação dos sistemas de controlo tais como semáforos, sinalização nos ramais de acesso a auto-estradas ou mensagens em painéis electrónicos.

No âmbito dos SAGT foram desenvolvidos alguns sistemas que combinam uma ou mais das três categorias de serviço referidas. A seguir apresentam-se alguns exemplos.

2.4.1.1 Sistemas de cobrança electrónica de portagens

Os sistemas de cobrança electrónica de portagens (EFC – *Electronic Fee Collection*) podem poupar tempo e frustração aos utentes das estradas, permitindo-lhes passar pelas portagens sem parar. Com o sistema actual, já em uso em muitos países, quando o veículo passa no ponto de cobrança uma antena colocada junto à auto-estrada capta o sinal de um pequeno emissor-responder (*transponder*) electrónico colocado na face interior do pára-brisas do veículo. O montante da portagem é cobrado automaticamente aos veículos quando passam na praça de portagem, melhorando a fluidez do tráfego e reduzindo os tempos de espera. A tecnologia usada neste sistema é conhecida pela designação Comunicação Dedicada de Curta Distância (*Dedicated Short Range Communications – DSRC*). Os sistemas actualmente existentes irão evoluir, nos próximos anos, para um sistema europeu universalmente aceite que recorrerá à navegação por satélite (por exemplo, o GALILEO) como melhor forma de cobrar portagens e taxas.

Exemplo da Via Verde

Um exemplo concreto é o sistema da Via Verde (<http#42>), instalado em Portugal, que permite o pagamento de taxas de portagem de uma forma totalmente automática. Funciona através de uma ligação rádio, entre a unidade de bordo (o Identificador) e o equipamento instalado na via. O veículo e o trajecto percorrido são identificados, sendo geradas automaticamente as transacções bancárias correspondentes ao pagamento da taxa de portagem (figura 2.7).

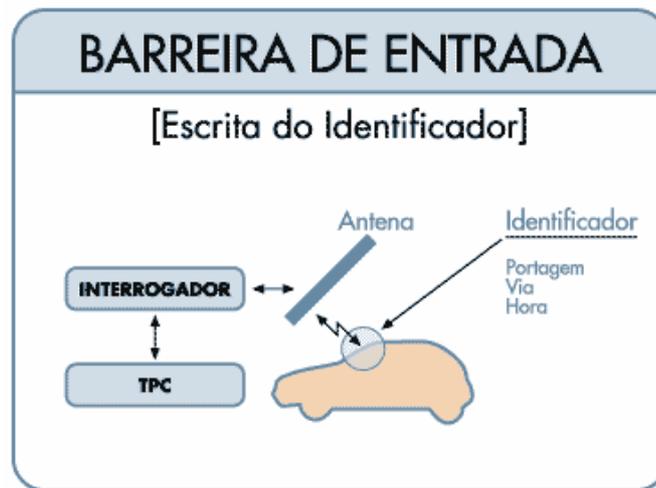


Figura 2.7 – Sistema Via Verde (http#42)

Este sistema foi desenvolvido pela BRISA, em parceria com a empresa SIBS, tendo sido introduzido em 1991, em algumas barreiras de portagem onde a taxa era fixa, sendo apenas dependente da classe do veículo (sistema aberto de cobrança de portagens). Mais tarde o sistema foi generalizado a toda a rede de auto-estradas incluindo, portanto, o sistema fechado onde a taxa também depende do local de entrada. O processo de implantação da Via Verde foi concluído no Verão de 1995, altura em que todas as portagens de Portugal, passaram a dispor de Via Verde. Assim, com este sistema inovador completamente implantado, Portugal tornou-se o primeiro país da Europa com uma rede integrada de portagens “non-stop” electrónica. Actualmente, a utilização deste sistema encontra-se em alargamento a parque de estacionamento e bombas de gasolina, encontrando-se já implementado em alguns casos.

Múltiplas aplicações

A cobrança electrónica de portagens tem sido considerada uma forma eficaz de financiar novas infra-estruturas e melhorar a fluidez do tráfego, tendo a sua utilização sofrido uma enorme expansão em todo o mundo em apenas alguns anos, especialmente nos países e regiões com um grande número de portagens em auto-estradas e pontes. Estão agora a ser aplicadas novas políticas de cobrança que distinguem entre veículos ligeiros, veículos pesados de mercadorias e outros tipos de veículos, com o objectivo de reduzir o congestionamento rodoviário em determinados períodos do dia ou restringir o acesso ao centro das cidades. O princípio básico de que “os utentes devem pagar os custos reais do

transporte” conduziu a sistemas de cobrança ao quilómetro, aplicados pela primeira vez na Suíça em 2000, e seguidamente na Alemanha e na Áustria, em 2003 ([http#38](#)). Estes sistemas são também utilizados nos transportes públicos para simplificar a aquisição de bilhetes e aumentar a capacidade de transporte de passageiros. A rápida passagem de um cartão inteligente específico em frente a um aparelho, por exemplo em Paris, permite aos utentes acederem ao metropolitano, a comboios e autocarros, bem como pagarem as compras em determinadas lojas.

2.4.1.2 Sistemas de gestão de semáforos e controlo de ramais de acesso

A tecnologia SAGT foi usada durante vários anos em algumas áreas metropolitanas para controlo de ramais de acesso (figura 2.8). Este processo consiste na medição de fluxo de tráfego e controlo de ramais de acesso a vias rápidas e auto-estradas. O controlo realiza-se através de semáforos com luzes de cor verde e vermelha colocados no topo dos ramais de acesso. Estes semáforos podem ser temporizados para determinados períodos durante o dia, ou controlados por um conjunto de detectores, colocados nos ramais de acesso e ao longo das auto-estradas, que efectuem a medição do fluxo de tráfego. Este tipo de controlo limita o fluxo de entrada em determinadas vias, mantendo o tráfego nas vias rápidas e auto-estradas fluido, através da eliminação de congestionamentos. Assim, a capacidade da via é rentabilizada, a velocidade média uniformizada e diminuída a probabilidade de ocorrência de acidentes.



Figura 2.8 - Recolha de informação para controlo de ramais de acesso (*ramp metering*)

2.4.1.3 Sistema de gestão de vias

O fluxo de tráfego gerado em horas de ponta numa determinada direcção da via, é geralmente bastante mais elevado do que na direcção oposta. Esta situação deu origem ao desenvolvimento de uma máquina que permite o deslocamento das barreiras de betão que dividem os dois sentidos de uma via, permitindo desta forma o aumento de capacidade da via numa das direcções e conseqüente diminuição na direcção oposta. A utilização deste tipo de máquina permite lidar de uma forma mais eficiente com o fluxo de tráfego para dentro ou para fora das áreas urbanas, através da criação de mais uma faixa de rodagem quando o fluxo se intensifica. Este processo está ilustrado na figura 2.9.



Figura 2.9 – Deslocamento das barreiras separadoras das via de uma auto-estrada ([http#8](#))

2.4.1.4 Sistemas de gestão de incidentes/emergências

Quando ocorre algum incidente nomeadamente, acidente ou avaria, o perigo nesse local aumenta consideravelmente, devido ao facto do(s) veículo(s) envolvido(s) bloquear(em) uma parte ou a totalidade da via, podendo provocar acidentes com conseqüências mais graves do que o incidente inicial. Este problema pode ser reduzido se o incidente for imediatamente detectado e se o local for devidamente protegido. Assim, foram desenvolvidos sistemas que de alguma forma possam diminuir os riscos associados a incidentes.

O sistema COMPANION (*Collective Warning System to Supplement Traffic Management*), desenvolvido na Alemanha ([http#50](#)), é um exemplo deste tipo de sistemas. Consiste num sistema avançado de aviso que, automaticamente, detecta incidentes e imediatamente notifica

os utentes da via de problemas de congestionamento, aconselhando-os a abrandar, ao mesmo tempo que a polícia é notificada da ocorrência a partir do centro de controlo.

Outro exemplo é o programa HIGHWAY HELPER, em funcionamento na cidade de Minneapolis (<http#51>), que tem como objectivo resolver os acidentes e as avarias de veículos nas auto-estradas através de reboques especiais. Este programa permitiu reduzir o tempo total de resposta à resolução de avarias nas auto-estradas e vias rápidas.

A resposta rápida a emergências é uma necessidade fundamental para, por um lado, salvar vidas e socorrer os feridos e, por outro lado, proceder à desobstrução e manter a fluidez do tráfego. Algumas viaturas privadas estão agora a ser equipadas com sensores automáticos de choque e sistemas de localização que podem comunicar directamente com os centros de emergência. Estes sistemas não requerem qualquer actuação do condutor, comunicando a localização exacta do veículo ainda que aquele se encontre incapacitado para tal. Na falta de um centro de controlo, os veículos de emergência podem ser equipados com sistemas independentes de localização que permitem o posicionamento exacto dos recursos.

2.4.1.5 Ponte Vasco da Gama

A Ponte Vasco da Gama (PVG) é um exemplo da aplicação da tecnologia SAGT a nível nacional. A PVG é a maior travessia fluvial de Portugal e uma das maiores da Europa, integrando já sistemas de gestão de tráfego, gestão de portagens e de condições técnicas da rodovia, pilares e tabuleiros. A partir do Centro de Controlo da PVG, é possível controlar qualquer uma das 87 câmaras de vídeo dispostas ao longo dos 18 Km de via, dar indicações para os painéis de mensagens variáveis no caso de acidente ou fecho da via, bem como conhecer as condições técnicas das vias, através dos dados fornecidos por acelerómetros (detectam sismos, a partir dos pilares), inclinómetros (movimentos na vertical) e extensómetros (contração e extensão da via). Com 270 Km de fibra óptica e um sistema de rádio VHF, a PVG pretende ser um modelo de eficácia, efectuando uma operação dinâmica da rodovia (Exame Informática, 2003).

2.4.1.6 Centro de coordenação operacional para gestão de tráfego da Brisa

A Brisa inaugurou em Dezembro de 2004, o Centro de Coordenação Operacional (CCO) de Carcavelos, cujo objectivo é a melhoria da segurança rodoviária, uma melhor gestão de tráfego e uma maior fluidez na rede de auto-estradas da concessionária. Este Centro efectua a gestão de tráfego através da disponibilização de informação de tráfego, da coordenação do trabalho de assistência rodoviária e da gestão dos trabalhos de manutenção (figura 2.10). Antes da instalação do CCO, a gestão de tráfego era realizada autonomamente pelos Centros Operacionais, cada um responsável por uma extensão de cerca de 80 km. O novo CCO assegura a coordenação das actividades desenvolvidas pelos 13 Centros Operacionais espalhados pelo País, aumentando a eficácia e eficiência operacional da concessionária de auto-estradas (AutoFoco, 2004).



Figura 2.10 - Centro de Coordenação Operacional da Brisa

Através da monitorização global e em tempo real da rede de auto-estradas geridas pela Brisa, com *video wall* e 31 operadores em nove postos de controlo (figura 2.11), a concessionária garante uma melhor gestão do tráfego, de forma integrada, uma vez que poderá gerir acidentes ocorridos nas auto-estradas e registar digitalmente toda a informação. O cruzamento de dados, recolhidos por diversos equipamentos, permite ter uma perspectiva global do trânsito, identificar rapidamente situações complicadas, ou até prevêê-las. As principais vantagens do sistema, segundo a Brisa, são a uniformização dos processos, a capacidade de tratar a informação em tempo real, a “visão do todo” e a facilidade de implementar novas instruções,

uma vez que o diálogo se estabelece com uma única entidade. Daqui resulta uma maior segurança e rapidez de resposta em caso de incidente (Lopes e Costa, 2004).



Figura 2.11 – *Video-Hall* de controlo

O CCO permite também, uma melhor gestão da fluidez de tráfego, assegurando assim, um fluxo contínuo na rede Brisa e a coordenação com entidades externas, designadamente, os Bombeiros, a Protecção Civil e a Brigada de Trânsito. Garante também, a informação em tempo real ao cliente das auto-estradas da rede Brisa e permite, entre outros, uma maior eficiência nos trabalhos de manutenção, adequando a intensidade das obras à intensidade do tráfego, evitando que os clientes sejam afectados.

2.4.2 Sistemas avançados de informação para viajantes

O objectivo principal dos Sistemas Avançados de Informação para Viajantes (SAIV) é providenciar aos viajantes, serviços de informação em tempo real sobre as condições de tráfego da rede de transportes. Assim, é possível influenciar a sua tomada de decisão para que estes façam uma utilização mais eficiente da rede de estradas e dos sistemas de transporte conseguindo-se, desta forma, otimizar o fluxo de veículos, reduzir os congestionamentos e diminuir os níveis de poluição. Em alguns sistemas são ainda fornecidos serviços de orientação e assistência na escolha de percursos alternativos ou ideais.

Os SAIV formam a base para a transmissão da informação de tráfego entre os sistemas de monitorização e o viajante comum. Com a sua utilização os viajantes podem decidir, a partir

de casa, do emprego ou de qualquer outro local onde se encontrem, sobre qual a estrada, o meio de transporte, o percurso ou ainda o horário mais adequados para atingirem o seu destino.

Esta informação pode ser fornecida através de painéis electrónicos, sistemas portáteis ligados à Internet (que oferecem informação variada sobre transportes públicos, vias rodoviárias alternativas, estações de serviço, parques de estacionamento e hotéis), sistemas de rádio, ou ainda sistemas integrados nos veículos (mostrando mapas com informação sobre a localização do veículo, o estado das condições de tráfego na vizinhança, atrasos no tráfego e eventuais acidentes).

Dentro dos SAIV podem ser distinguidos vários tipos de sistemas que proporcionam serviços distintos ainda que, em alguns casos complementares.

2.4.2.1 Informação em tempo real da rede de transportes

Um sistema deste tipo é basicamente constituído, por câmaras localizadas em lugares fixos, cujas imagens podem ser visualizadas em ecrãs ou através da Internet fornecendo, assim, informação aos passageiros antes da sua saída (figuras 2.12 e 2.13). A utilização destes serviços a partir da Internet é bastante simples, bastando seleccionar um dos pontos do mapa para obter uma imagem com a informação sobre as condições de tráfego nessa zona. Esta é uma fonte de informação sobre o fluxo de tráfego, congestionamentos e horários de transportes públicos actualizada em tempo real.



Figura 2.12 – Visualização da câmara e mapa de estradas com câmaras em Lisboa (<http#40>)

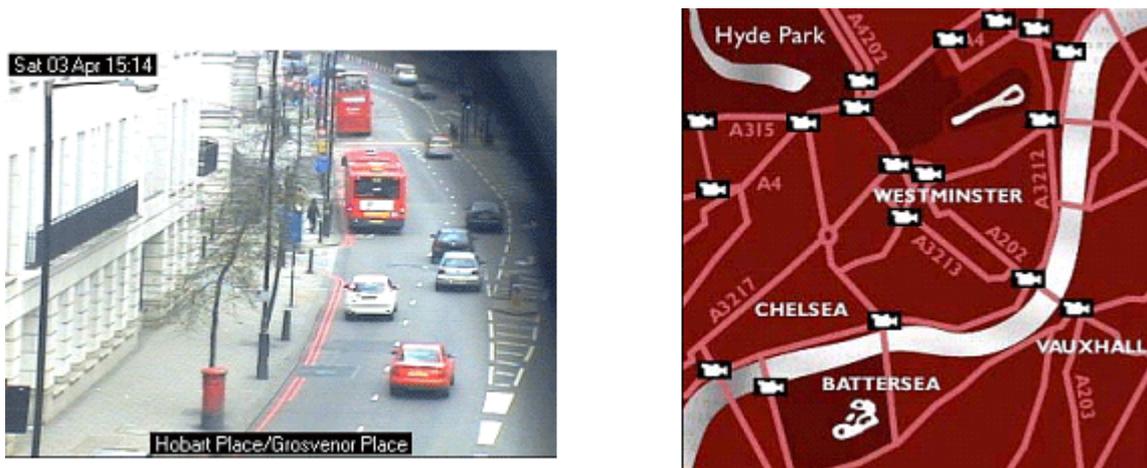


Figura 2.13 - Visualização da câmara e mapa de estradas com câmaras em Londres (http#41)

Outro exemplo é o sistema WEBFLOW32 que inclui mais algumas funcionalidades. Além de fornecer informação em tempo real, sobre o estado do fluxo de tráfego nas vias, disponibiliza ainda informação sobre a ocorrência de incidentes, nomeadamente acidentes rodoviários ou informação sobre vias que estejam a ser alvo de trabalhos de manutenção. Na figura 2.14 pode observar-se um ecrã deste sistema que é utilizado para obter informação em tempo real sobre as condições de tráfego em Seattle, nos Estados Unidos, encontrando-se disponível na Internet (http#9).

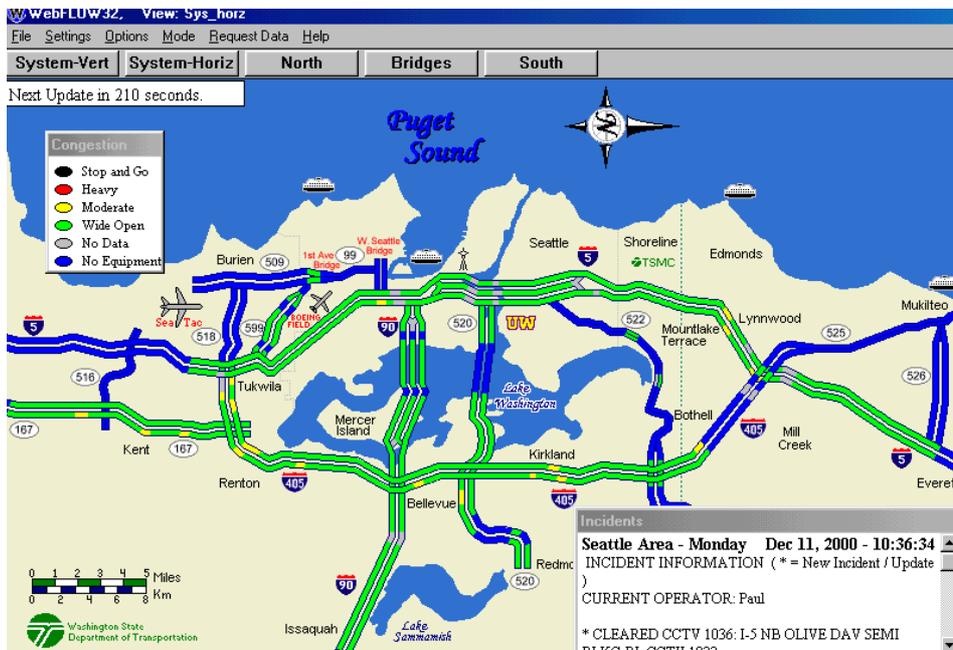


Figura 2.14 – WEBFLOW32 – Ecrã de fluxo de tráfego em Seattle (http#9)

2.4.2.2 Sistemas de mapas e planeamento de percursos

Os sistemas de mapas permitem ver um mapa de estradas dentro do veículo, destacando a sua localização e providenciando informação sobre os arredores. Para o efeito são utilizados sistemas personalizados/portáteis instalados dentro dos veículos como se pode observar na figura 2.15.



Figura 2.15- Sistemas personalizados / portáteis - GPS + GSM + Internet

Um exemplo de um sistema de navegação de bordo é o CARIN desenvolvido pela Philips e instalado em alguns modelos da BMW (<http#52>). Este sistema permite obter informação a partir de sensores instalados nas rodas do veículo (para a distância), e uma bússola electrónica (para calcular a direcção do veículo) com uma ligação por GPS. O computador de bordo, correlaciona estes dados com os do mapa digital no CD-ROM e fornece a posição no mapa com alguns metros de erro de precisão. Quando o condutor introduz no computador (através de um botão) o destino pretendido, o sistema CARIN calcula o percurso e divide-o em secções com instruções de voz e gráficas fáceis de seguir. Os mapas digitais, em CD-ROM, devem ser precisos e actualizados. Estes mapas também fornecem dados sobre locais de interesse, como esquadras de polícia, hotéis, locais de atracção turística e hospitais.

Os sistemas de planeamento de percursos ajudam o viajante a encontrar o percurso óptimo para chegar ao seu destino. A viagem pode incluir mais que um meio de transporte, dependendo das preferências do viajante. Alguns sistemas estão conectados a um centro de informação que proporciona ao condutor informação sobre acidentes e atrasos (figura 2.16). Esta informação permite alterar o percurso em caso de necessidade.

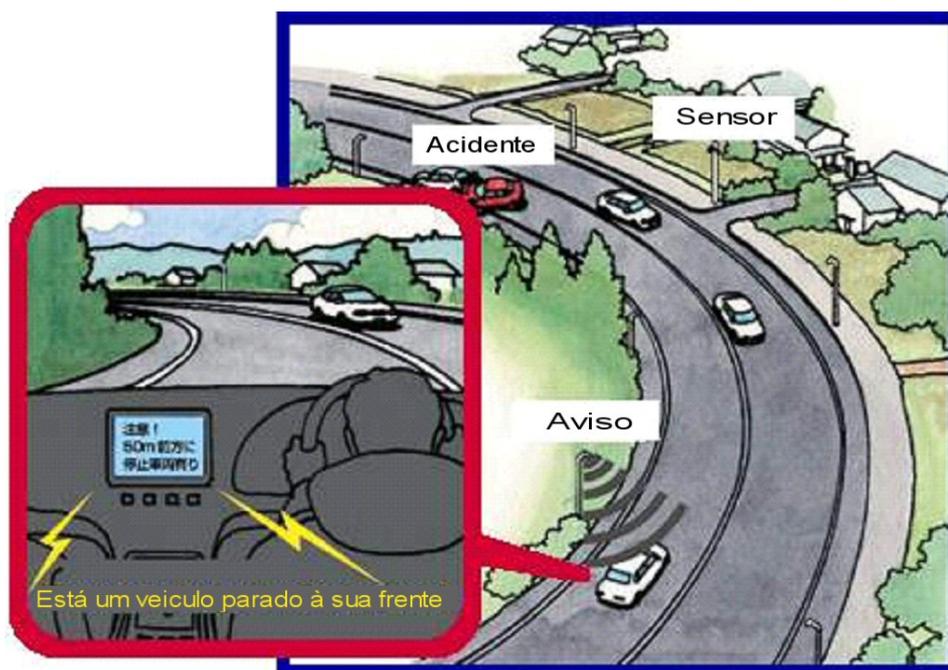


Figura 2.16 – Sistema de deteção de acidente

Um exemplo de um sistema deste tipo é o VICS (*Vehicle Information and Communication System*). Um terminal VICS mostra as coordenadas do veículo num ecrã de mapas e permite a comunicação com as estações fixas para aquisição de informação sobre as condições de tráfego e planeamento de rotas ou percursos. Quando o sistema de navegação de um veículo está equipado com este sistema, o condutor pode aceder (num monitor dentro do veículo) a informação, em tempo real, sobre as condições de tráfego em cada percurso possível até ao seu destino, e calcular o tempo de viagem previsto, tendo em conta as condicionantes de tráfego que existem no momento.

Na figura 2.17 encontra-se representado um exemplo de um sistema de informação e comunicação para veículos (VICS) (<http#10>). Como se referiu anteriormente, estes sistemas encontram-se fortemente implementados no Japão.



Figura 2.17 - Vehicle Information and Communication System (VICS)

2.4.3 Sistemas avançados de transporte público

Os Sistemas Avançados de Transporte Público (SATP) aplicam as novas tecnologias para a operação de veículos de alta taxa de ocupação. Utilizam tecnologias SAGT e SAIV para melhorar o serviço de transportes em massa, permitindo informar o passageiro sobre trajectos, horários e custos de viagens. Além disto, os SATP disponibilizam informação em tempo real sobre qualquer alteração que possa ocorrer nos sistemas de transporte. Através de uma gestão de tráfego eficiente é ainda possível, por exemplo, actuar nos semáforos de forma a dar prioridade aos transportes públicos.

Através dos SATP é possível controlar, planear e melhorar os serviços da frota de autocarros, e prever um serviço mais flexível, eficiente, e em segurança para garantir a satisfação dos clientes e controlar os custos de viagem.

A figura 2.18 mostra um SATP/SAIV desenvolvido num programa de pesquisa SIT na Universidade de Washington que permite mostrar o trânsito e as previsões de chegada de autocarros, indicando os respectivos horários (<http#11>).

Route	Destination	Scheduled	At Bay	Depart Status
5	Downtown Seattle	10:45 AM	6	On Time
16	Northgate	10:41 AM	2	On Time
16	Seattle Ferry Term	10:42 AM	6	Bus Departed
16	Northgate	11:01 AM	2	No Info Avail
16	Seattle Ferry Term	11:02 AM	6	On Time
41	Northgate	10:44 AM	2	Bus Departed
41	Downtown Seattle	10:50 AM	5	27 Min Delay
66E	Northgate P & R	10:55 AM	2	On Time
66E	Downtown Seattle	10:55 AM	5	On Time
67	Northgate P & R	10:41 AM	2	18 Min Delay
67	UW Campus	10:42 AM	5	Bus Departed
67	Northgate P & R	11:11 AM	2	1 Min Delay

Save Time. Buy a Metro Pass. 624-PASS

Last update: Tue Mar 02 10:47:43 PST 1999

Figura 2.18 – Sistema de informação sobre horários de autocarros (<http#11>)

Os SATP também incluem sistemas automáticos de pagamento, através da utilização de cartões do tipo “*smart cards*” que permitem a captura automática de informação sobre os perfis do passageiro e da viagem a realizar, assim como o acesso ao crédito disponível para pagamentos. Para aumentar a segurança, também se incluem sistemas com câmaras (dentro e fora dos transportes públicos) que permitem ao condutor e ao sistema central de supervisão, a detecção e reacção imediatas a qualquer actividade suspeita.

A informação fornecida pode ajudar a aumentar o número de passageiros que preferem deslocar-se em transportes públicos, ao terem disponíveis mais alternativas e um serviço mais fiável. O sistema de transporte público é também beneficiado pela gestão dos sinais de tráfego, pois normalmente é-lhes atribuída prioridade perante os veículos particulares.

Um exemplo de um sistema de localização de autocarros em tempo real é o BUSVIEW, instalado em Washington, cujo objectivo é manter informado o viajante, através de Internet, (figura. 2.19) sobre o estado actual do sistema de transporte público e, assim, permitir ao utente seleccionar com maior exactidão e conforto o transporte mais adequado para a concretização do seu plano de viagem.

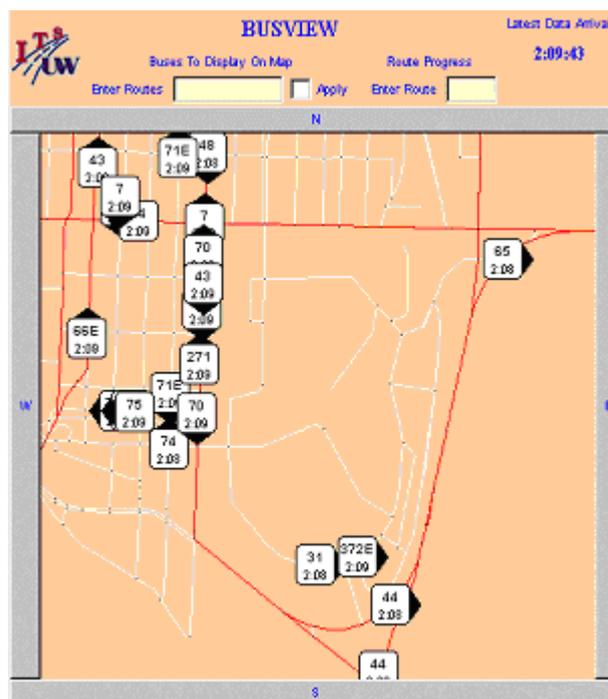
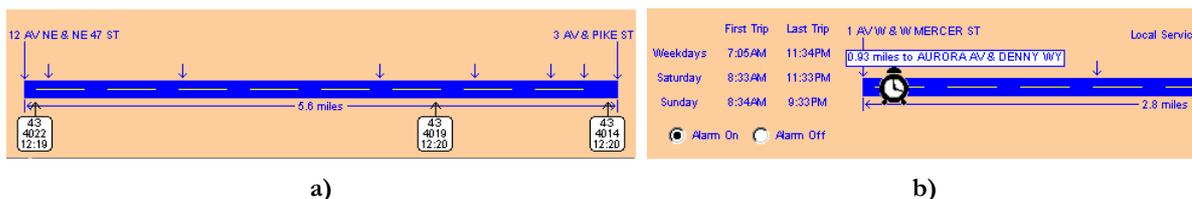


Figura 2.19 - Informação sobre a localização dos vários autocarros (http#12)



a) b)
Figura 2.20 – Visualização de percurso e criação de alarmes no sistema BUSVIEW

Se o utilizador seleccionar um dos autocarros, então o sistema permite visualizar a informação respeitante ao percurso da carreira do autocarro seleccionado, indicando a sua posição bem como a dos restantes autocarros que efectuem o mesmo percurso (figura 2.20 a)). É ainda possível criar alarmes para determinados pontos de percurso, sendo o utilizador notificado quando um autocarro da carreira atingiu esse ponto (figura 2.21 b)).

Outro exemplo de um sistema SATP é dado pelo COUNTDOWN (http#53), criado pelo governo britânico e implementado pela London Transport, dos quais faz parte a LT Buses, sendo cada autocarro e respectivo trajecto especificados pelas diferentes empresas de transportes. Trata-se de um sistema de informação em tempo real de partidas e chegadas de autocarros. As primeiras experiências tiveram bastante sucesso e por isso, o sistema está a ser expandido para cobrir toda a cidade de Londres.

O COUNTDOWN foi instalado em cerca de 400 paragens de autocarros (2% do total de paragens em Londres), em 1000 autocarros (15% do total) e em 50 trajectos (10% do total de quilómetros em trajectos). Este sistema permite a localização automática de veículos e a comunicação via rádio, incluindo sinais de informação nas paragens. Estes sinais informam os utentes sobre chegadas, número e destino do trajecto e tempo para a chegada. Dependendo da paragem, pode ser visualizada informação sobre três a dez autocarros. A qualidade de serviço aumentou e os tempos de espera foram reduzidos. Os utentes optam pela utilização deste meio de transporte e as empresas de transportes controlam melhor as suas frotas de autocarros. Estima-se que, por ano, este sistema seja utilizado por cerca de 80 milhões de pessoas.

Resumindo os SATP permitem:

- Disponibilização de informação actualizada, sobre os sistemas de transporte em massa, possibilitando uma fácil compreensão e adequada às necessidades dos utilizadores, permitindo viagens com partidas exactas e uma grande flexibilidade na reformulação de planos num curto espaço de tempo ou durante a própria viagem;
- Controlo de tráfego dando um tratamento preferencial a veículos de alta ocupação, reduzindo assim os atrasos para os utilizadores dos transportes públicos;
- Disponibilização de métodos de pagamento que permitem um acesso rápido aos transportes;
- Monitorização automática, e em tempo real, das frotas de veículos, permitindo um melhor planeamento e optimização das suas operações.

2.4.4 Sistemas de operação de veículos comerciais

Os Sistemas de Operação de Veículos Comerciais (SOVC) aplicam várias tecnologias dos SIT para melhorar a segurança e a eficiência das operações das frotas de veículos comerciais.

Os sistemas SOVC são bastante úteis para as grandes e médias empresas comerciais de frotas, porque permitem a gestão de todos os veículos, permitindo controlar a velocidade, os horários

de paragem e o cumprimento dos destinos das viagens. Os SOVC incrementam a segurança, permitem acelerar as entregas, melhoram a eficiência operativa e a resposta a incidentes e reduzem os custos operacionais.

Na figura 2.21 encontra-se representado um esquema tipo de um Centro para Gestão Comercial utilizando as tecnologias GPS (*Global Positioning System*) e GSM (*Global System for Mobile Communications*), que permite a localização automática e respectivo controlo dos veículos, optimizando a utilização da frota, poupando tempo e dinheiro e melhorando o serviço prestado ao cliente.

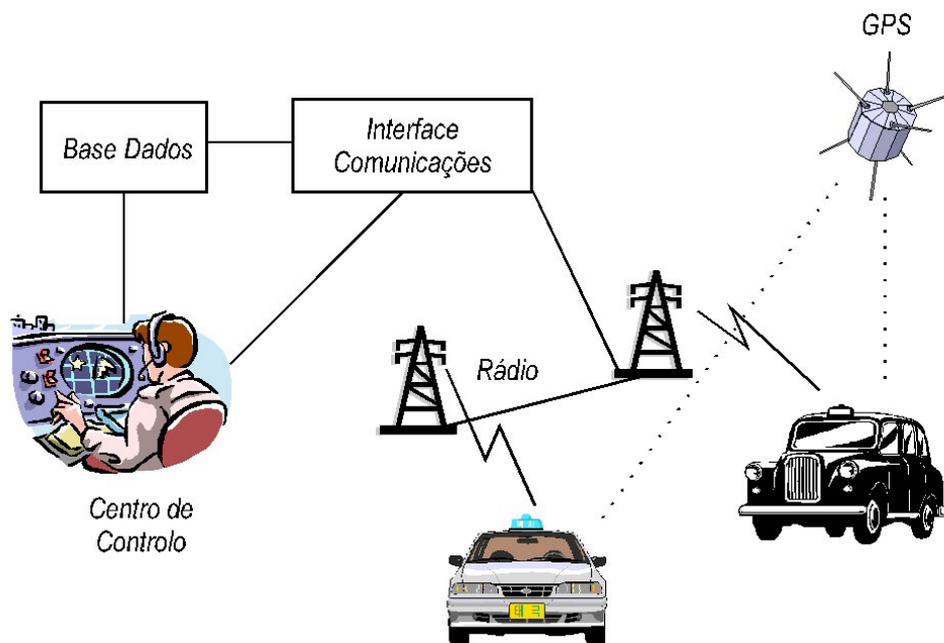


Figura 2.21 – Centro de Gestão Veículos Comerciais (Figueiredo *et al.*, 2001 b))

Os SOVC utilizam algumas tecnologias das áreas de ordenamento de trânsito (Figueiredo *et al.*, 2001 b)), informação para viajantes e controlo de veículos (Fig. 2.22), tais como:

- Identificação Automática de Veículos (IAV);
- Classificação Automática de Veículos (CAV);
- Localização Automática de Veículos (LAV);
- Transmissão Digital de Tráfego em Tempo Real (TDITR).

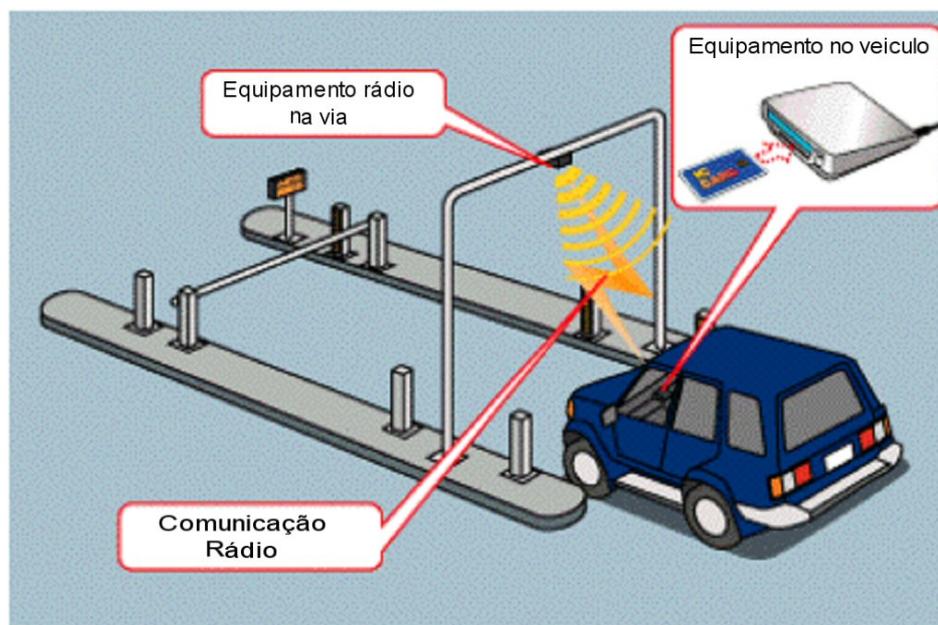


Figura 2.22 - Identificação, classificação e localização automática do veículo

Alguns projectos que foram desenvolvidos no âmbito dos SOVC são apresentados a seguir sendo os exemplos agrupados segundo o objectivo principal.

2.4.4.1 Sistemas de controlo automático

O sistema DIS (*Dynafleet Information System*) consiste num equipamento que se encontra integrado em vários dispositivos electrónicos no camião (http#54), e que assim possibilita a recolha e a análise de dados do tacógrafo e do motor (figura 2.23). Esta informação é disponibilizada ao motorista através de um ecrã, onde também se visualiza a posição do veículo em diferentes mapas. A informação é transmitida à central, onde se observa a posição dos veículos em diferentes localizações e o seu estado (consumo de combustível, tempo parado, velocidades médias, horas de trabalho e as horas de descanso).

O DIS, foi lançado em 1996, sendo actualmente utilizado em sete países europeus (Suécia, Holanda, Reino Unido, Alemanha, França, Áustria e Bélgica).



Figura 2.23 – Painel do sistema DIS

O projecto Chauffeur, realizado pela Daimler-Benz e alguns institutos de investigação (<http#55>), consiste num sistema de *cruise control*, de segunda geração, e num sistema de condução electrónica, para manter o veículo na faixa de rodagem, utilizando três camiões das marcas DaimlerChrysler, IVECO e Renault. Os camiões são organizados em pelotões de três elementos, onde apenas o que vai à frente é conduzido por um operador humano. Os restantes veículos são controlados electronicamente, seguindo o veículo à sua frente, mantendo entre eles uma distância curta mas segura (figura 2.24). Alguns sistemas que contribuem para o funcionamento deste projecto são, por exemplo, travagem activa, direcção electrónica, sensores de vídeo e comunicações veículo a veículo, tendo um controlador de segurança crítico a interagir com os vários subsistemas.



Figura 2.24 – Fila de camiões no projecto CHAUFFEUR

2.4.4.2 Sistemas de pesagem de viaturas

Os sistemas de pesagem de viaturas WIM (*Weigh In Motion*) ([http#56](#)) consistem num conjunto de mecanismos para pesagem automática de veículos de mercadorias em movimento, a partir de sensores embutidos nas estradas. Desta forma não é necessário que o camião pare por completo para efectuar a operação de pesagem.

Estes sistemas foram criados para melhorar o fluxo nas estradas e para evitar que todos os camionistas tivessem que parar para as operações de pesagem. Actualmente, existem na Europa, cerca de mil estações de pesagem WIM a funcionar.

2.4.4.3 Sistemas de prevenção de capotamentos e colisões

Os sistemas de prevenção de capotamento e colisão podem provocar uma redução de 6% a 27% deste tipo de situações. Podem citar-se os sistemas que avisam os motoristas para abrandarem, quando estes excedem a velocidade de segurança nas saídas das vias rápidas, os sistemas de aviso DSIS (*DownHill Speed Information System*) ([http#57](#)), que informam as velocidades recomendadas para as descidas bem como quais as velocidades recomendadas para determinadas categorias de camiões, e ainda os sistemas que avisam os motoristas para a ocorrência de ventos fortes.

2.4.4.4 Sistema de transporte inovador – TUBEXPRESS

À medida que o volume de tráfego aumenta nas vias rápidas e auto-estradas, e dado que as infra-estruturas existentes têm uma capacidade que não poderá ser aumentada, devido à escassez de espaço, surgem soluções alternativas para o transporte de mercadorias. O TUBEXPRESS ([http#58](#)), é uma destas soluções. Consiste num sistema automático para transporte de mercadorias através de tubos (*pipelines*) subterrâneos de cimento (figura 2.25), que efectua a interligação entre os vários centros urbanos.

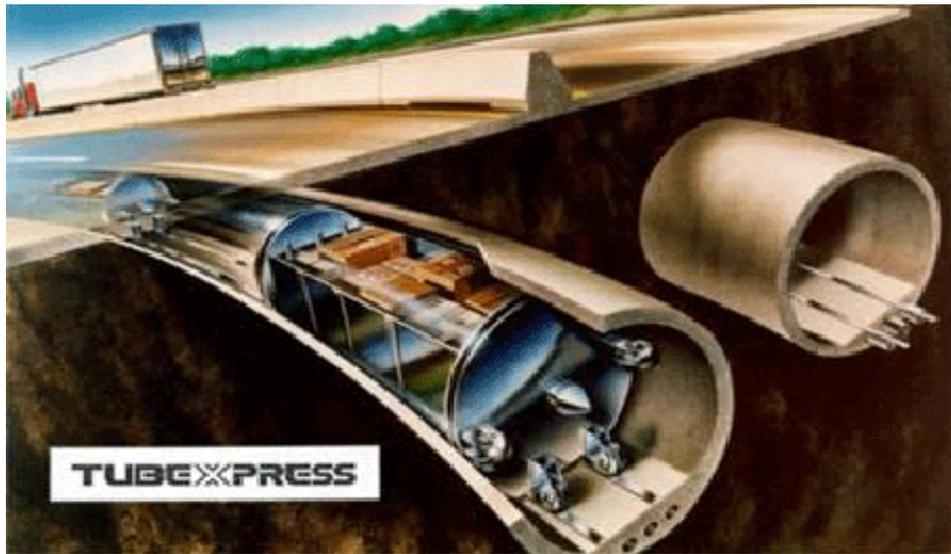


Figura 2.25 – Sistema TUBEEXPRESS (http#58)

As mercadorias são colocadas em veículos que se assemelham a cápsulas e que depois são conduzidos ao longo dos tubos utilizando energia eléctrica (figura 2.26). Esta solução vai permitir reduzir o número de camiões em circulação, com os consequentes benefícios a nível de diminuição de volume de tráfego, de consumo de energia, de poluição e de acidentes.

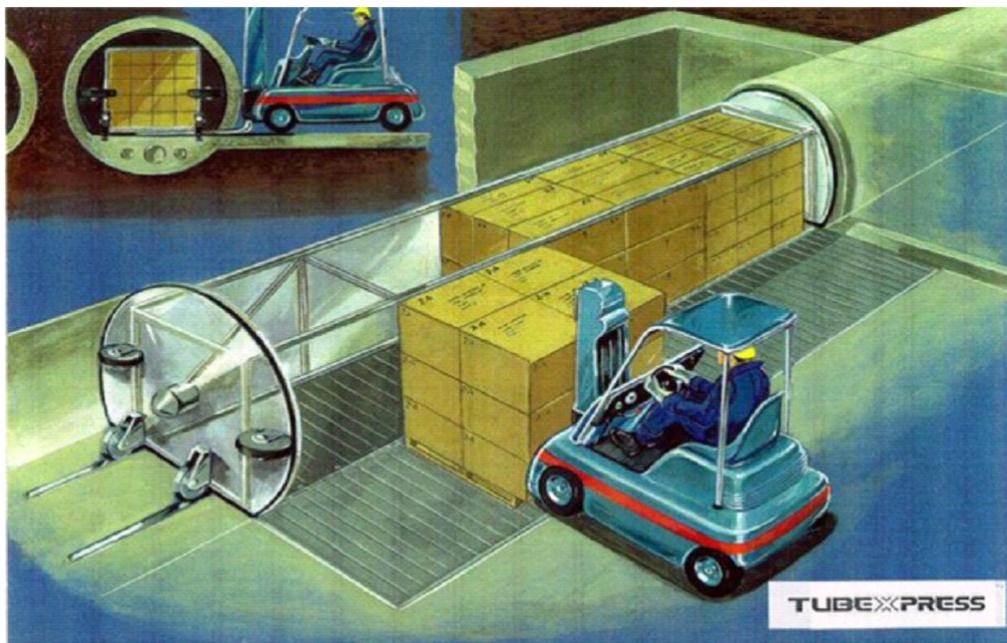


Figura 2.26 – Inserção de mercadorias nas cápsulas (http#58)

2.4.5 Sistemas avançados de controlo de veículos

Os Sistemas Avançados de Controlo de Veículos (SACV) combinam sensores, computadores e controladores, quer nos veículos quer nas infra-estruturas das vias, para alertar e assistir os condutores (ou eventualmente intervir) na condução do veículo (Shladover, 1995). Os objectivos dos SACV incluem melhorar a segurança na condução, diminuir os congestionamentos em auto-estradas urbanas, aumentar a eficiência da rede de estradas e criar novos conceitos para os serviços de transporte terrestre.

Com a utilização dos sensores dentro do veículo, o condutor pode receber informação visual e auditiva sobre o tráfego, perigos a que pode estar sujeito e outras situações que envolvam o veículo que conduz (figura 2.27). Por outro lado, o controlo automático permite uma reacção rápida e eficaz em situações de perigo, tais como a actuação nos sistema de travagem ou aceleração, o que pode ser bastante útil quando de trata de condutores mais idosos ou com menos prática de condução.

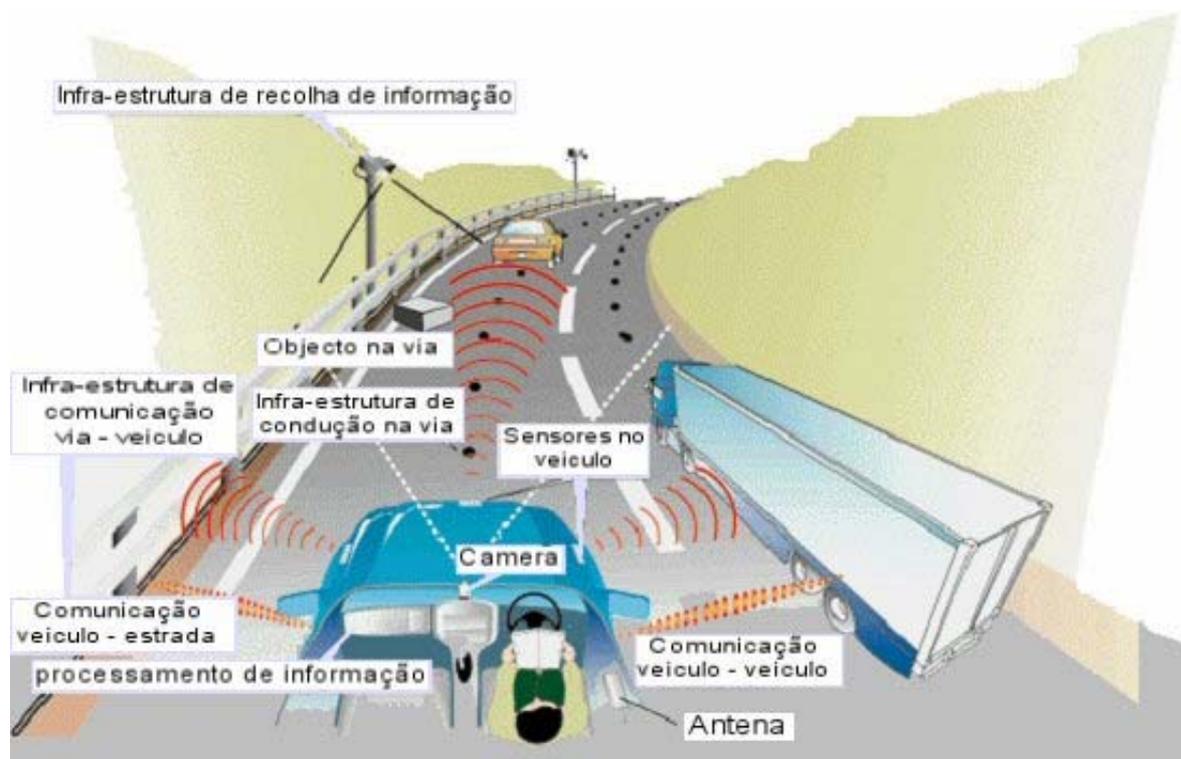


Figura 2.27 - Veículo com condução automática (<http#14>)

Os objectivos dos SACV são:

- Alertar e assistir os condutores - fornecer aos condutores uma melhor informação visual e auditiva sobre os perigos iminentes e a situação geral dentro e fora do veículo;
- Intervir na condução do veículo – são mais rápidos, precisos e fiáveis que os reflexos humanos, ajudando o condutor em situações perigosas. Como exemplos destes sistemas podem referir-se as ajudas ao estacionamento, à condução e a aceleração de forma automática ou a compensação por falta de perícia do condutor.

2.4.5.1 Veículos autónomos

Um exemplo de veículo que integra muitos dos sistemas de controlo referidos é o veículo autónomo OSU, desenvolvido no Centro de Investigação de Transportes Inteligentes da Universidade de Ohio (CITR). Este veículo integra sistemas avançados de controlo, incluindo travagem automática e mudanças de direcção, como forma de evitar colisões com outros veículos ([http#13](#)). Na figura 2.28 pode-se observar um esquema deste veículo com indicação do respectivo equipamento.

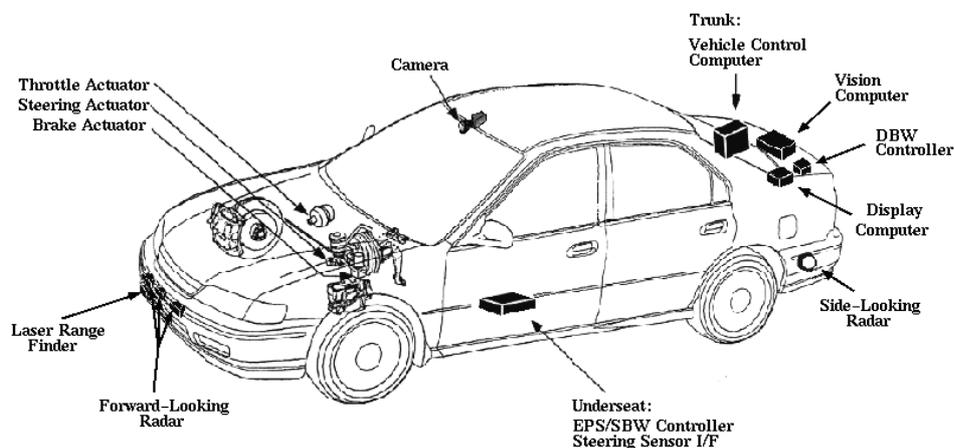


Figura 2.28 - Veículo autónomo OSU ([http#13](#))

Este veículo está equipado com diversos tipos de sensores de forma a complementar a fusão de informação com técnicas de detecção de falhas, nomeadamente um sistema de visão, um sistema de radar e um detector de distância laser, entre outros.

2.4.5.2 Controlo automático de veículos em auto-estradas

Os SAVC, também podem englobar formas de controlo dos veículos em auto-estradas inteligentes e automáticas, associando a comunicação entre veículos ou entre o veículo e a estrada. Este conceito é designado de *Automated Highway System*, sendo os movimentos de todos os veículos numa faixa de rodagem controlados automaticamente pela auto-estrada. Os sistemas de controlo automático permitem que os veículos mantenham uma menor separação (tanto no sentido do fluxo, como lateralmente) e maiores velocidades, aumentando o nível de segurança. Por outro lado, as tecnologias de controlo automático podem também, ser aplicadas em ambientes estruturados, como no caso de veículos de alta ocupação operando sobre carris em zonas urbanas. Uma vez que os benefícios destes sistemas já foram demonstrados, a entrada em operação de estradas automáticas poderá, no futuro, estender-se a cidades completas e, posteriormente, a estradas interurbanas.

2.4.5.3 Sistemas de transporte automáticos

O sistema ParkShuttle encontra-se em funcionamento desde 1997 no Aeroporto de Amesterdão, com o objectivo de efectuar a ligação entre o parque de estacionamento e o terminal do aeroporto ([http#44](#)). O ParkShuttle consiste num conjunto de veículos dotados de tecnologia de navegação automática (um computador e um sistema de navegação electrónica para condução) com o objectivo de transportar passageiros. O ParkShuttle é constituído por uma rede de grande densidade de pequenos veículos de transporte com funcionamento automático a pedido (figura 2.29).



Figura 2.29 – Sistema ParkShuttle ([http#44](#))

O ParkShuttle integra um sistema de segurança, constituído por sensores inteligentes, que analisam a área da frente do veículo e fazem desacelerar e/ou parar o veículo quando é detectado um obstáculo. Uma outra funcionalidade de segurança é fornecida pelo pára-choques, que paralisa imediatamente o veículo quando sofre uma pressão. Existem, ainda, botões de paragem de emergência (situados dentro e fora do veículo) que podem ser usados pelos passageiros. O limite de velocidade é de 40 Km/h, de forma a proporcionar deslocações suaves.

2.4.6 Sistemas avançados de transporte rural

A forma como as tecnologias dos SIT podem ser utilizadas para os meios com menor densidade populacional, logo com um número menor de veículos em circulação, é um desafio que foi aceite por diversas autarquias em zonas rurais. Assim, os SATR foram concebidos para resolver os problemas que podem surgir em zonas rurais (comunidades ou áreas com menos de 50.000 habitantes) ([http#15](#)).

As estradas das zonas rurais têm um conjunto de atributos particulares, tais como estradas estreitas, curvas apertadas e sem visibilidade, reduzida sinalização de trânsito, mistura de utilizadores (*i.e.*, de diferentes tipos), poucos percursos alternativos e poucos meios de comunicação.

Os objectivos principais dos Sistemas Avançados de Transporte Rural (SATR) consistem na previsão do tempo necessário para as viagens, na redução dos acidentes, na redução dos custos e numa maior satisfação dos consumidores (Figueiredo *et al.*, 2002). Assim, pretende-se:

- A implementação de infra-estruturas para controlo e manutenção - através da adaptação dos SAGT e dos SAIV aos meios rurais;
- A segurança para o viajante – através da utilização de sistemas de vigilância e monitorização de veículos, sistemas de comunicação e sistemas de detecção nos veículos;
- A disponibilização de serviços de emergência – aumentando o número de postos SOS.

No entanto, não existem, em desenvolvimento sistemas específicos para meios rurais. O que se passa é somente a adaptação para este tipo de meios, dos sistemas desenvolvidos para os meios urbanos.

2.5 Linhas de investigação promissoras

A vasta gama de aplicações dos SIT evidencia a diversidade de oportunidades de investigação que esta área representa. É a partir do desenvolvimento de acções de investigação que se providenciam as ferramentas básicas e o conhecimento necessários para que a implementação dos SIT possa atingir níveis mais elevados.

Alguns dos projectos desenvolvidos na área dos SIT consistem em protótipos utilizados para explorar ideias e alguns aspectos particulares relacionados com esta área. O objectivo é o desenvolvimento de sistemas totalmente autónomos, o que representa uma tarefa complexa e que requer a disponibilização de elevados recursos económicos e uma vasta gama de tecnologias oriundas de diferentes áreas.

2.5.1 Simulação e modelação

Uma linha de investigação que parece ter uma importância vital na área dos SIT é a simulação e modelação. Com a utilização deste tipo de ferramentas é possível avaliar os resultados de qualquer proposta de desenvolvimento na área dos SIT (Clark e Daigle 1997).

Através da utilização de modelos matemáticos é possível simular situações reais, criando a possibilidade de realização de um tipo de análise que só seria possível através de sistemas reais. Portanto, existe a possibilidade de criar, avaliar e alterar cenários sem haver a necessidade de os implementar realmente. Assim, é possível dizer-se que, no contexto dos SIT, os modelos de simulação são bastante atractivos, uma vez que muitos dos produtos e serviços que se pretendem desenvolver são relativamente novos e é necessário ter-se uma correcta percepção dos impactos e efeitos prováveis que estes produtos poderão ter.

Nos últimos anos têm sido desenvolvidos modelos de simulação para suportarem o processo de análise em quase todas as áreas dos SIT referidas nas secções anteriores, nomeadamente,

informação ao viajante, gestão de tráfego e comportamento do condutor, que serão alvo de uma análise mais pormenorizada no capítulo seguinte.

2.5.2 Sistemas totalmente automatizados/automáticos

Uma linha de pesquisa prometedora é o desenvolvimento de uma nova forma de transporte público, que consiste no conceito de partilha de viatura (*car-sharing*), através da disponibilização de viaturas individuais para utilização pública (Parent, *et al.*, 1994).

Na sua forma mais avançada, este conceito significa que uma viatura pode ser levantada por um cliente num determinado local e ser deixada no local de destino do referido cliente, ficando disponível para um próximo cliente. Existem já, neste momento, algumas experiências em curso em diferentes partes do mundo.

2.6 Evolução e perspectivas de desenvolvimentos futuros

A nível mundial, até ao ano 2000 assistiu-se a uma revolução no desenvolvimento dos SIT, onde os principais avanços ocorreram basicamente através da implementação de:

- sistemas de informações de tráfego (congestionamentos e transportes públicos);
- sistemas de navegação em veículos (congestionamentos/rotas alternativas);
- sistemas de cobrança electrónicos e pagamento, de forma a eliminar os congestionamentos na origem.

Por volta do ano 2005 a revolução nos sistemas de tráfego continuará, através da adição de maior autonomia e funcionalidades, tais como:

- aumento do nível de serviço prestado ao utilizador para o planeamento de viagens, através da disponibilização de informação sobre tráfego e transportes públicos (o utilizador escolhe um destino e o sistema indica o percurso óptimo tendo em conta vários factores, nomeadamente o tempo de viagem);
- diminuição do número de acidentes de trânsito e da sua gravidade, através de sistemas de apoio à condução segura, de detecção rápida de acidentes, de controlo do tráfego e de gestão de emergências.

Por volta do ano 2010 estima-se que começarão a ser implementadas as auto-estradas automáticas, onde se assistirá ao crescimento das infra-estruturas e do nível de equipamento nos veículos. Numa auto-estrada automática o veículo passará numa via de validação para o sistema determinar se este está equipado para funcionar em conformidade com a auto-estrada. Se tal acontecer, o condutor encaminhará o seu veículo em direcção a um portão automático que dará acesso à auto-estrada automática. Uma vez lá, a auto-estrada será capaz de controlar o movimento dos veículos que nela circulam, permitindo que o condutor relaxe até à saída pretendida, através de um processo semelhante ao de admissão. Nesta altura o sistema verificará se o condutor está em condições de retomar o controlo do veículo. Se o veículo não cumprir os requisitos para usufruir do sistema automático, então ele será encaminhado para uma auto-estrada normal. Uma outra alternativa seria um sistema com tráfego misto (automático + manual), em que as faixas são partilhadas por veículos automáticos e manuais. A partir de 2010, prevê-se que se tenha atingido a maturidade dos SIT, através de:

- estabelecimento de uma sociedade avançada de informação e telecomunicações;
- início da era dos utilizadores de veículos automáticos;
- redução drástica do número de mortes por acidentes de viação;
- redução dos congestionamentos;
- redução dos níveis de poluição.

2.6.1 Desenvolvimento de protótipos

São inúmeros os protótipos desenvolvidos até ao momento, pelo que não há espaço para referir a sua totalidade no âmbito deste trabalho. Nesta secção apresentam-se apenas dois exemplos que parecem ser interessantes pelo conceito de transporte automático que concretizam. Os dois protótipos são o sistema ULTra e o sistema MAIT.

O sistema ULTra

O ULTra, é um sistema por pedido (*on demand*), que consiste num conjunto de táxis sem condutor que circulam num trilho próprio, ao longo de uma rede de percursos específicos ([http#16](#)), (figura 2.30).

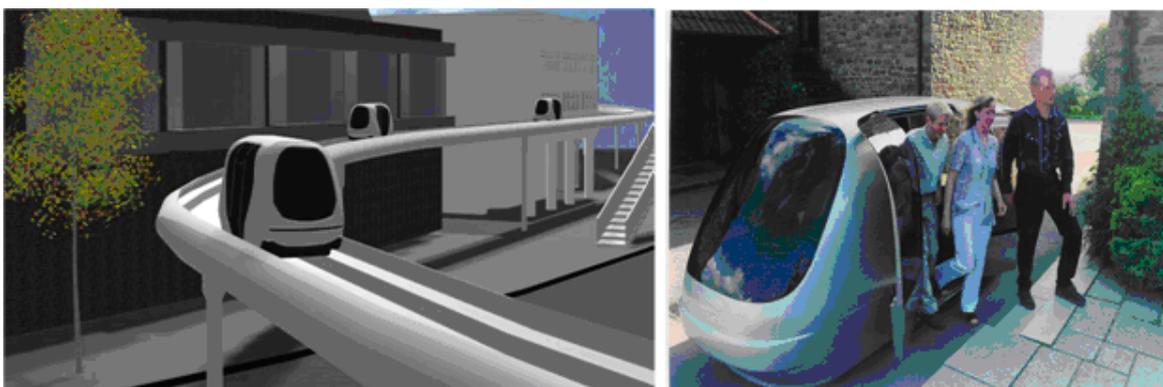


Figura 2.30 - Sistema ULTra ([http#16](#))

Os táxis são veículos eléctricos que não ultrapassam os 40km/h, com capacidade para transportar quatro pessoas, que oferecem serviços de viagem pessoais, transportando sem efectuar paragens, os passageiros até aos seus destinos. Como vantagens apontam-se as seguintes:

- consome muito menos energia por passageiro/quilómetro do que carros, autocarros ou comboios;
- não polui o ambiente, é silencioso e eficiente;
- as viagens são três vezes mais rápidas que para um autocarro, carro ou comboio;
- os custos de gestão são bastante inferiores aos custos de gestão de autocarros, carros ou transporte ferroviário.

Sistema MAIT

O sistema MAIT (Modular Automated Individual Transport) é um sistema de transporte para pessoas ou cargas, porta-a-porta em cabina privada sem condução. Este conceito, integra várias pistas nas quais as cabinas vão circulando, ([http#43](#)).

Assim, existem três componentes modulares:

- Cabinas - o espaço onde os passageiros ou a carga se instalam durante a viagem, conduzidas automaticamente ao longo de uma pista;

- Transportador (*Carrier*) - responsável, pela propulsão. Existem diferentes tipos de transportadores e cada um deles foi concebido para circular numa pista específica. Os transportadores podem “apanhar” as cabinas, e servem de interface mecânico entre estas e a pista;
- Pista (*Track*) – é o caminho a seguir pelos transportadores, podendo ser implementadas ao nível do chão, elevadas ou subterrâneas.

O transporte é efectuado em cabinas que são conduzidas automaticamente através da pista mais adequada para que se atinja o destino da viagem. Numa mesma viagem pode haver necessidade de utilizar mais do que uma das pistas disponíveis. Neste caso a transferência das cabinas entre pistas é realizada de forma automática (figura 2.31).

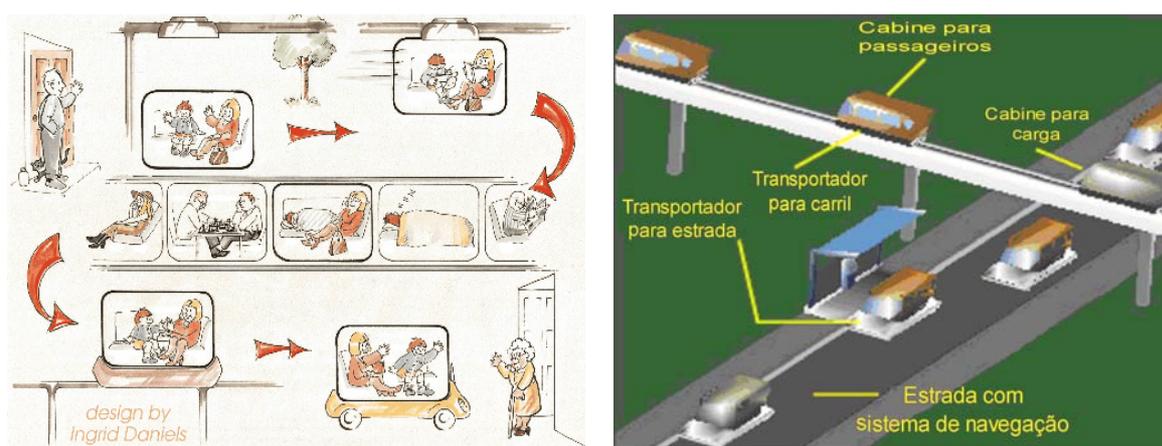


Figura 2.31 - Sistema MAIT (http#43)

2.7 Conclusão

Os SIT envolvem um grande número de áreas. Neste capítulo referiram-se aquelas que parecem ser as mais relevantes. Como conclusão é possível afirmar-se que existe ainda um longo caminho a percorrer com várias direcções a seguir. Uma primeira será o melhoramento contínuo dos sistemas estrada-veículo, tais como sistemas de navegação, computadores de bordo, e transmissão de informação sobre tráfego em tempo real. Uma segunda direcção a

apontar é a introdução dos sistemas totalmente automáticos, tal como o conceito da partilha de viatura (*car-sharing*), inicialmente com um número e uma variedade de aplicações limitados, sendo gradualmente aumentados. Uma terceira possibilidade consiste no desenvolvimento e refinamento dos modelos das estradas, veículos e pessoas, para que seja possível simular e planear correctamente um qualquer sistema na área dos SIT.

Capítulo 3

Modelação e Simulação em SIT

A criação de modelos de simulação de tráfego constitui uma linha de pesquisa importante na área dos SIT, uma vez que possibilita de uma forma relativamente simples e económica, e ao mesmo tempo eficaz e eficiente, o desenvolvimento de ferramentas que permitem efectuar o estudo dos sistemas de transporte. Neste capítulo, após uma revisão da bibliografia, referem-se os critérios de classificação dos modelos de simulação de tráfego, o processo de validação e calibração associado à criação de ferramentas de simulação de tráfego e os tipos de técnicas computacionais mais utilizadas para a modelação. Faz-se, ainda, uma breve apresentação do estado da arte, onde se incluem alguns dos mais importantes projectos desenvolvidos na área de simulação de tráfego.

3.1 Introdução

Os problemas de congestionamento, um pouco generalizados por todo o mundo, constituíram um forte incentivo, a todos os níveis, para a proliferação do interesse na área dos SIT. Como foi já referido no capítulo anterior os SIT incluem entre outros, a gestão de tráfego em tempo real e os sistemas de informação para apoio ao viajante. Neste contexto, uma grande parte da investigação realizada refere-se ao desenvolvimento de modelos e simuladores para o projecto e operação de sistemas de gestão de tráfego eficientes. Assim, verifica-se que as ferramentas de modelação e simulação são elementos essenciais no projecto, avaliação e operação dos sistemas de transporte, devido à sua facilidade de implementação e eficácia nos resultados obtidos.

As ferramentas de modelação e simulação são importantes para a análise de uma vasta gama de problemas dinâmicos que, todavia são de estudo consideravelmente complexo. Estes

problemas estão geralmente associados a processos complexos, que não se conseguem descrever de forma inteligível em termos analíticos. Estes processos caracterizam-se, normalmente, pela existência de interacções entre entidades ou componentes do sistema. A maior parte das vezes, o comportamento de cada uma das entidades e a interacção entre um número pequeno de entidades, são passíveis de ser representados matematicamente com um grau de confiança aceitável. Contudo, é difícil obter uma representação matemática fiável para as interacções simultâneas e complexas entre várias entidades num mesmo sistema (FHWA, 1997).

Os modelos de simulação são os mais apropriados para representar o comportamento de tais sistemas. Através da criação de modelos adequados é possível integrar os comportamentos individuais das entidades e as suas interacções para produzir uma descrição detalhada do desempenho do sistema em termos quantitativos. Os modelos de simulação são representações matemáticas e/ou lógicas (ou abstracções) de sistemas reais, implementadas utilizando uma técnica computacional.

O utilizador de um simulador, uma ferramenta computacional de simulação de tráfego, especifica um cenário (*e.g.*, configuração da rede de auto-estradas, condições de tráfego) e o modelo de simulação fornece como resultado as operações dos sistema em vários formatos como por exemplo, o estatístico e o gráfico.

Drew (1986), define “simulação” como “*a representação dinâmica de uma parte do mundo real, obtida a partir da construção de um modelo, fazendo-o variar ao longo do tempo*”. O modelo de um sistema é uma abstracção e uma aproximação ao mundo real, que consiste numa representação matemática das entidades e parâmetros do sistema. Pode dizer-se que a modelação é uma ferramenta de suporte da simulação. O seu objectivo é a criação de um modelo que represente uma parte ou a totalidade de um sistema, entendendo-se por modelo uma representação matemática das entidades e parâmetros de um sistema.

No processo de modelação procede-se à transcrição do contexto e objectos reais do sistema para parâmetros que possam ser representados sob a forma numérica, para a obtenção do modelo. Nesta fase fazem-se suposições sobre qual o fenómeno importante para o comportamento do sistema. Deve dar-se uma especial atenção a este processo, uma vez que quaisquer erros ou imprecisões introduzidos irão falsear as características do sistema que se

pretende simular, dando origem a resultados distorcidos. A construção de um bom modelo requer decisões bem fundamentadas sobre as suposições adoptadas.

A simulação é uma representação dinâmica do sistema com base num modelo, com o objectivo de facilitar a sua compreensão e análise, projecto e/ou controlo. A simulação por computador tornou-se uma ferramenta comum na avaliação e desenvolvimento de sistemas inteligentes de transporte. Os algoritmos de simulação permitem a realização de um vasto conjunto de análises e avaliações de cenários, como por exemplo, as relativas ao treino de pessoal, à segurança e ao controlo e gestão de tráfego. Além disso permitem, ainda, a realização de previsões com base no cruzamento da informação actual com os dados históricos.

Várias técnicas computacionais podem ser utilizadas para implementar os modelos desenvolvidos e a plataforma de simulação, assim como para auxiliar o processo de análise de dados. Na secção 3.8 apresentam-se algumas das técnicas mais utilizadas para o efeito.

3.2 Modelação e simulação em SIT

As ferramentas de modelação e simulação, aplicadas no âmbito dos SIT, consistem basicamente na representação e modelação do mundo real conforme ele é. Por outras palavras a simulação consiste em representar ruas, casas, sinais de trânsito, veículos e respectivas características, assim como fenómenos relacionados com a dinâmica do sistema de transporte existente, ou seja características de veículos, ultrapassagens e deslocamentos em fila. Assim, é possível simular situações de tráfego tais como: congestionamentos; funcionamento de semáforos; paragens de transportes públicos e acidentes. Estes elementos possibilitam a compreensão do funcionamento do sistema, a avaliação de cenários e o controlo do próprio sistema. No último caso, um dos objectivos é a prevenção e antecipação de acontecimentos que possam influenciar negativamente o desempenho do sistema permitindo a criação de medidas de resposta eficientes.

Nos últimos anos foram desenvolvidos vários modelos de simulação para apoiar o processo de análise em quase todas as áreas dos SITS referidas no capítulo anterior, nomeadamente informação para o viajante, comportamento do condutor e gestão de tráfego.

A simulação de informação para o viajante implica a modelação do comportamento humano, nomeadamente no que respeita à reacção à informação, que representa a escolha de uma entre diferentes alternativas (McQueen e McQueen, 1999). Em muitos casos, o comportamento é representado por uma função custo que representa o custo associado a cada uma das alternativas. Esta função é normalmente desenvolvida com base nos resultados obtidos por trabalhos de investigação.

Um aspecto importante tem a ver com a modelação e a simulação do comportamento do condutor. Devido ao desenvolvimento de veículos que incorporam novos dispositivos tecnológicos, um conhecimento mais aprofundado sobre a interacção entre o veículo e o condutor revela-se de grande utilidade para o projecto do veículo. Alguns projectos em desenvolvimento focam este aspecto em particular. Um destes projectos consiste no desenvolvimento de um modelo capaz de reproduzir comportamento real de um condutor, a nível de condução, baseado em características psicológicas e fisiológicas do ser humano. Por exemplo, o modelo incorpora noções tais como a experiência de condução e o estado de vigília, integrando ainda uma descrição do funcionamento mental do condutor (Afonso *et al.*, 1994). De facto, as questões relacionadas com a simulação da segurança no tráfego são um problema complexo em termos de simulação. Normalmente, em ferramentas de simulação, os condutores são “programados” para evitar colisões. Embora tenham sido efectuadas algumas tentativas para analisar situações de conflito (Sayed, 1997), uma aproximação geral para este problema ainda está por desenvolver. A simulação da segurança no tráfego é por vezes classificada como nanosimulação e pertence ao campo da simulação do ser humano, onde se modela e simula o sistema de percepção-reacção dos condutores e características associadas.

3.2.1 Modelação e simulação de tráfego

As ferramentas para previsão do tráfego são necessárias tendo em conta os sistemas que fazem parte de um plano de desenvolvimento dos SIT (McQueen e McQueen, 1999). A ferramenta mais adequada é o modelo e o algoritmo de simulação de tráfego através do qual se podem identificar, quantificar e analisar os fenómenos que ocorrem. Assim, é possível simular cenários tendo a possibilidade de efectuar análises e obter resultados que permitem a avaliação do sistema.

A modelação é uma ferramenta que pode ser utilizada *off-line* para o desenvolvimento e análise de uma vasta gama de medidas relacionadas com o controlo e informação de tráfego, permitindo, ainda, a realização de previsões a partir do cruzamento dos dados históricos com a informação actual. Na área de gestão de tráfego pode ser utilizada *on-line* como uma parte intrínseca da operação do sistema para o controlo da rede de tráfego. Na área de informação de tráfego fornece informação sobre percursos. Na área de gestão geral das infra-estruturas pode ser utilizada para a previsão das condições do ambiente e do estado das vias.

Com um modelo de simulação, que represente veículos e redes de vias de comunicação, é possível analisar o efeito de qualquer tipo de alteração do sistema, nomeadamente da rede de vias de comunicação, dos veículos ou ainda do comportamento do condutor. Neste tipo de sistemas, a rede de vias de comunicação é representada tipicamente por uma série de nós e ligações. Uma ligação representa o comprimento da via, com características básicas tais como comprimento e largura, e um nó representa a junção entre uma ou mais ligações (ou vias) (Figueiredo *et al.*, 2003 a)). Os veículos são classificados a partir do seu tipo, nomeadamente veículos privados, autocarros (transporte de passageiros) e camiões (transporte de mercadorias). Cada tipo é caracterizado pela aceleração, velocidade máxima e quantidade de espaço ocupado da via.

Um dos primeiros trabalhos de pesquisa nesta área foi a tese de doutoramento de G.L. Gerlough, publicado em 1955 na Universidade da Califórnia, com o título "*Simulation of freeway traffic on a general-purpose discrete variable computer*" (Kalberg, 1971). Um dos modelos mais antigos é o seguidor de veículo *car-following* proposto pela primeira vez em 1958 por Chandler *et al.* Em 1961, Gazis *et al.* apresentaram o modelo *car-following* mais geral que ficou conhecido como Modelo Não linear GM (General Motors), a partir do qual se podem derivar os anteriores. Este modelo é um dos algoritmos mais antigos e o mais adoptado na simulação, onde o movimento de cada veículo é gerido por uma equação diferencial (Gerlough e Huber, 1975). É de salientar que após mais de 40 anos o modelo *car-following* continua a ser estudado e permanece uma das questões básicas da teoria de fluxo de tráfego (McDonald *et al.*, 1998).

3.2.1.1 Funções dos modelos de simulação de tráfego

Em (APAS, 1995) são identificadas quatro funções relativas aos modelos de simulação de tráfego em SIT:

- **Simulação de redes de tráfego incluindo interacção entre veículos.** Um dos principais objectivos dos simuladores consiste em avaliar o comportamento dos veículos em função de um conjunto de parâmetros, nomeadamente condições do piso, do veículo e do condutor, entre outros. A realização deste tipo de avaliação, a partir de dados recolhidos do sistema real é obviamente difícil devido à variabilidade do fluxo de tráfego. Esta característica torna difícil, e dispendioso, o processo de recolha da informação necessária para a produção de resultados com significado estatístico.
- **Previsão e curto prazo.** Os modelos de simulação são utilizados quando se pretende efectuar análises que conduzam à obtenção de resultados imediatos. Por exemplo, pode referir-se a avaliação do sistema em tempo real após um incidente numa estrada, ou a previsão de emissões de gases para a atmosfera, por forma implementar planos que restrinjam a entrada de veículos nos centros das cidades, quando se verificarem emissões superiores a um determinado nível.
- **Melhoria do desempenho de modelos de previsão de fluxo de tráfego.** Os modelos de previsão de fluxo de tráfego são utilizados para a previsão de alterações no fluxo de tráfego quando são efectuadas alterações na rede de estradas. Se a rede integrar um sistema de controlo reactivo, então as interacções entre os fluxos de tráfego que entretanto sofreram alterações podem ser difíceis de modelar sem recorrer à utilização de uma ferramenta de simulação de tráfego.
- **Obtenção de dados para simulação de condução de veículos.** Têm sido desenvolvidos simuladores de condução que permitem a avaliação e desenvolvimento de novos equipamentos para o veículo, de forma a torná-lo mais seguro. Os modelos de simulação de tráfego podem ser utilizados para fornecer ao simulador de condução cenários realistas.

3.2.2 Alguns projectos de modelação e simulação em SIT

Nos últimos trinta anos, foram desenvolvidos vários projectos na área de simulação de tráfego, tais como o CORSIM (FHWA, 1996), o TRANSYT 7F (McTrans, 1996) e o AIMSUN2 (Barceló, 1996) para estudar e controlar o fluxo de tráfego convencional. Novos modelos têm sido implementados, como o INTEGRATION (Van Aerde, 1999), o DYNASMART (Mahmassani *et al.*, 1994) e o METROPOLIS (de Palma *et al.*, 1996), com vista ao estudo das redes de tráfego urbano, para definir estratégias de transmissão da informação, de controlo e de projecto dos sistemas de tráfego.

Os Sistemas Avançados de Informação para Viajantes (SAIV) e os Sistema Avançados de Gestão de Tráfego (SAGT) (Jayakrishnan *et al.*, 1994), foram desenvolvidos no âmbito dos projectos INTEGRATION e DYNASMART.

O projecto INTEGRATION foi desenvolvido nos anos oitenta, por Michel Aerde, na Universidade Queen, no Canadá. Trata-se de um modelo integrado de simulação e de previsão de tráfego. No âmbito dos SIT constituiu o primeiro modelo de simulação a considerar informação sobre o percurso dos veículos (Van Aerde, 1985). O projecto DYNASMART é principalmente uma ferramenta de análise descritiva, para a avaliação de estratégias de informação, medição e controlo de tráfego e para a análise das regras de trânsito ao nível da rede de estradas. O objectivo consiste em estudar a eficiência de determinadas configurações da rede ao invés da definição de configurações óptimas (Jayakrishnan *et al.*, 1994).

O PARAMICS é um projecto de simulação de tráfego que se pode considerar na vanguarda dos SIT. Este projecto explora as possibilidades dos SIT e implementa um sistema que inclui a simulação e a visualização de tráfego. Neste momento as áreas potenciais de aplicação do PARAMICS incluem a gestão de tráfego e seu controlo, bem como o fornecimento de informação para viajantes. O PARAMICS foi usado para a simulação da gestão de tráfego e em sistemas de controlo em várias regiões dos EUA.

Outro exemplo é o projecto INTELIGENT, desenvolvido na Universidade de Leeds. O projecto está vocacionado para modelar e simular problemas dinâmicos de gestão de tráfego originados por incidentes, tráfego de veículos pesados, acidentes ou obras nas estradas. Este

projecto contempla a gestão de incidentes, controlo de cruzamentos, controlo de fluxo motorizado, direcções de rotas dinâmicas e informação de tráfego regional.

Foram realizados numerosos estudos para validar os algoritmos de simulação de tráfego já desenvolvidos. A maioria destes modelos tem funções específicas, como o controlo de sinais luminosos nos cruzamentos, o controlo coordenado de cruzamentos ou a simulação do tráfego numa auto-estrada. Por exemplo, refira-se o SMARTEST que é um projecto de investigação da União Europeia (SMARTEST report, 2000), constituído por um conjunto de ferramentas para a modelação e a simulação, cobrindo as diferentes áreas de SAGT, nomeadamente problemas dinâmicos de gestão de tráfego, tendo sido aplicado no planeamento e teste do sistema de transporte europeu terrestre. O AIMSUN2 (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks*) (Barceló, 1996) foi uma das ferramentas de modelação desenvolvidas no âmbito do projecto SMARTEST (SMARTEST report, 2000). Esta ferramenta utiliza uma abordagem de simulação que reproduz as condições reais de tráfego numa rede urbana de estradas e inclui uma modelação detalhada da rede de tráfego, distinguindo vários tipos de veículos e condutores, considerando ainda incidentes e manobras perigosas.

3.2.3 Classificação dos modelos de simulação de tráfego

O tráfego possui características de um sistema complexo verificando-se estados estáveis/instáveis, comportamentos determinísticos/estocásticos, transições de fase e outros fenómenos com características dinâmicas. Os modelos de simulação de tráfego podem ser classificados de acordo com vários critérios, nomeadamente, a avaliação do comportamento das variáveis independentes, a representação dos processos e os níveis de pormenor.

A avaliação do comportamento das variáveis independentes, relaciona-se com a posição, a velocidade e o tempo. Porém, como quase todos os algoritmos de simulação de tráfego descrevem sistemas dinâmicos onde o tempo é a variável independente fundamental, a classificação baseada no tempo é a mais usual. Podem ser distinguidas duas abordagens: tempo contínuo e tempo discreto.

A representação dos processos pode ser feita por modelos determinísticos ou por modelos estocásticos. No primeiro caso todas as entidades representadas no modelo são definidas através de relações exactas entre entidades. No segundo caso o modelo estocástico incorpora e modela processos que incluem variáveis aleatórias ou funções de probabilidade.

Em relação ao nível de pormenor de representação os modelos de tráfego podem ser classificados em macroscópico, com um nível de detalhe baixo, microscópico, com um elevado nível de detalhe e mesoscópico, com um nível de detalhe intermédio. Na literatura este é normalmente o critério adoptado para classificar os modelos de tráfego (SMARTTEST, 2000). Assim, neste trabalho adopta-se este critério para se proceder à classificação dos modelos de tráfego, fazendo-se, a seguir, uma apresentação de cada um dos três tipos referidos.

3.3 Modelos de fluxo de tráfego macroscópicos

Nos modelos macroscópicos as entidades, assim como as suas actividades e interacções, são representadas com um baixo nível de pormenor. Estes modelos são normalmente utilizados para análise do fluxo de tráfego. O tráfego é representado com um elevado nível de agregação, usando determinadas características tais como o fluxo ou taxa de ocupação, a densidade e a velocidade média. As manobras efectuadas por cada veículo, como por exemplo as mudanças de faixas de rodagem, não são representadas explicitamente.

Neste tipo de modelo o fluxo de tráfego é encarado como contínuo e consideram-se apenas valores médios, ao invés de se tratar cada veículo como uma entidade individual. Assim, definem-se duas funções, que se assume serem contínuas em x (no espaço) e em t (no tempo):

$\rho(x,t)$ - densidade de veículos (em unidades de veículos por unidade de distância).

Representa o número médio de veículos por unidade de distância em deslocamento na estrada, na vizinhança da posição x e no instante t .

$v(x,t)$ - velocidade (em unidades de distância por unidade de tempo). Representa a velocidade média de veículos em deslocamento na estrada, na vizinhança da posição x e no instante t .

O fluxo de veículos é dado por $Q = \rho v$, onde $Q(x, t)$ é igual ao número de veículos que passam na posição x por unidade de tempo.

Os modelos macroscópicos de tráfego baseiam-se na equação do princípio da conservação de massa (3.1). De facto, numa faixa de estrada onde não existem ramais de acesso ou de saída, verifica-se a conservação do número de veículos (Dantzig e Trucker, 2001) como se observa na figura 3.1. Assim, partindo deste pressuposto e considerando os valores médios referidos é possível escrever a equação (3.1).

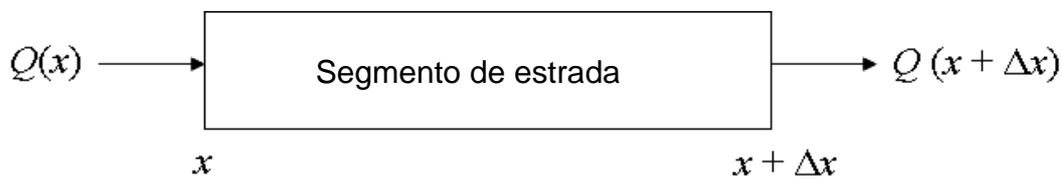


Figura 3.1 – Conservação do nº de veículos num segmento de estrada

$$Q(x) - Q(x + \Delta x) = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta x) \quad (3.1)$$

onde:

$Q(x)$ - fluxo de veículos que entram

$Q(x + \Delta x)$ - fluxo de veículos que saiem

$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta x)$ - veículos acumulados

Rearranjando os termos da equação e dividindo por Δx (que não se altera no tempo), resulta a equação (3.2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{Q(x + \Delta x) - Q(x)}{\Delta x} = 0 \quad (3.2)$$

Como $\Delta x \rightarrow 0$ (variação espacial) o segundo termo da equação pode ser substituído por $\frac{\partial Q}{\partial x}$ resultando a equação da continuidade (3.3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

ou, em ordem a ρ e a v ,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (3.4)$$

De acordo com a equação (3.3) a variação espacial do fluxo de tráfego $\frac{\partial Q}{\partial t}$ é igual à variação temporal da densidade de veículos $-\frac{\partial Q}{\partial x}$.

Para descrever a variação da velocidade no tempo e no espaço, por exemplo em fluxos de tráfego do tipo “para-arranca”, é necessário utilizar uma equação dinâmica de velocidade. A maior parte dos modelos contínuos utiliza a equação do modelo de Helbing (Helbing, 1996) a seguir representada.

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{\tau} (V_e - V) \quad (3.5)$$

onde:

$$V \frac{\partial V}{\partial x} \text{ - transporte}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \text{ - pressão}$$

$$\frac{1}{\tau} (V_e - V) \text{ - relaxação}$$

De acordo com esta equação a alteração da velocidade média do veículo é dada por três termos. O termo *transporte* surge da propagação do perfil de velocidade com a velocidade V dos veículos. O termo *pressão* reflecte uma antecipação de alterações espaciais da situação de tráfego, ou o efeito de dispersão devido à variância finita das velocidades dos veículos. O

termo *relaxação* descreve a adaptação ao equilíbrio dinâmico da velocidade V_e com o tempo de relaxação τ .

O modelo de Helbing é um exemplo de um modelo macroscópico de tráfego para auto-estrada inspirado na teoria cinética dos gases, que inclui os efeitos de alteração espacial do cenário de tráfego e as correlações de velocidade entre veículos.

3.4 Modelos de fluxo de tráfego mesoscópicos

Este tipo de modelos integra aspectos dos modelos macro e dos modelos micro. O modelo mesoscópico representa a maioria das entidades com um elevado nível de pormenor, mas descreve as suas actividades e interacções com um nível de pormenor mais baixo.

Um modelo mesoscópico não distingue veículos individuais, mas especifica o comportamento individual através de condições probabilísticas. Alguns modelos mesoscópicos são obtidos por analogias da teoria Gás-cinético (*Gas-Kinetic*). Com um modelo Gás-cinético podem descrever-se distribuições de velocidade e as localizações em momentos específicos de tempo (Hoogendoorn e Bovy, 2001).

A dinâmica destas distribuições é geralmente orientada por alguns processos que caracterizam o comportamento individual do condutor (por exemplo, aceleração, interacção entre veículos e mudança de faixa). Dois tipos de modelos são utilizados, nomeadamente o modelo Gás-cinético multifaixa (*Multilane Gas-Kinetic*) e o modelo Gás-cinético melhorado (*Improved Gas-Kinetic*). Os dois casos têm uma aproximação semelhante, embora o primeiro considere explicitamente a mudança de faixa.

O DYNASMART é um modelo de simulação de tráfego deste tipo, projectado como uma ferramenta de investigação para o estudo de sistemas SAIV/SAGT. Além disso, avalia as estratégias para providenciar informação aos viajantes, prever padrões de fluxo de tráfego em função dos actuais e planear percursos óptimos para viagens com base nos tempos das viagens simuladas. O DYNASMART é um modelo mesoscópico que usa modelos de fluxo macroscópicos e, simultaneamente, recolhe os movimentos de veículos individuais. Podem ser especificadas diferentes classes tais como o tipo de veículo, a disponibilidade de informação e

as restrições da rede de estradas. Estas classes permitem modelar o comportamento do utilizador em resposta à informação do SAIV. O modelo pode ainda simular semáforos, ramais de acesso e incidentes. O DYNASMART calcula os caminhos óptimos de viagem, baseados nos tempos simulados de viagem e simula os seus movimentos.

3.5 Modelos de fluxo de tráfego microscópicos

O modelo de simulação microscópico descreve o comportamento individual das entidades do sistema (veículos), ao longo do tempo, e as suas interações com um nível de pormenor muito elevado. Os componentes principais de um modelo de simulação de tráfego microscópico são:

- a representação precisa da geometria da rede de estradas;
- a modelação detalhada do comportamento individual dos veículos;
- a reprodução explícita do controlo e planeamento de tráfego.

Com estes componentes é possível modelar diversos sistemas SIT, nomeadamente, sistemas de controlo de tráfego adaptáveis, sistemas de detecção automática de incidentes, sistemas dinâmicos de condução do veículo e sistemas avançados de gestão de tráfego, entre outros.

Os modelos de simulação microscópicos têm como base a equação do movimento (3.6).

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = \frac{dv_i}{dt} = a_i \quad (3.6)$$

onde:

x_i - deslocamento do veículo i

v_i - velocidade do veículo i

a_i - aceleração do veículo i

Actualmente a maior parte dos simuladores de tráfego são de natureza microscópica, baseados na simulação das interações entre os veículos.

A simulação microscópica é essencialmente utilizada para avaliação de cenários podendo, no entanto, ser utilizada em tempo real como uma parte intrínseca da operação do sistema para o controlo da rede de tráfego.

Esta avaliação de cenários tem como objectivos:

- Estudo do controlo dinâmico de tráfego;
- Avaliação de cenários de gestão de incidentes;
- Desenvolvimento de estratégias de orientação de rotas ou percursos em tempo-real;
- Estabelecimento de uma intersecção adaptativa de sinais de controlo;
- Controlo de ramais de acesso a faixas de rodagem;
- Implementação de sistemas de controlo de faixas de rodagem;

Alguns modelos incluem objectivos adicionais tais como a avaliação do número de faixas de rodagem, do comprimento dos ramais de acesso e da curvatura das faixas de rodagem.

Os simuladores de tráfego microscópicos são ferramentas que emulam o fluxo real de veículos numa rede de vias de comunicação. A micro-simulação pode ser usada em paralelo com as operações nas vias de trânsito.

Existem vários modelos de simulação microscópica de tráfego de entre os quais se destacam aqueles que modelam o comportamento da aceleração. Neste caso incluem-se os modelos seguidor de veículo (*car-following*) os modelos de fluxo livre (*free-flow*) e os que modelam o comportamento de mudança de faixa (*lane changing*).

3.5.1 Modelos de aceleração “*Car-following*”

Os modelos do tipo *car-following* surgiram no final da década de 50 e baseiam-se em mecanismos que permitem descrever o processo como um veículo segue o outro. Assim, os modelos tratam filas de veículos que interagem entre si e onde a velocidade de cada veículo é função da velocidade do seu predecessor. Podem ser distinguidos três tipos de modelos *car-*

following: modelos distância segura (*safe distance*), modelos estímulo-resposta (*stimulus-response*) e modelos de psico-espacamento (*psycho-spacing*).

3.5.1.1 Modelos distância segura

Estes modelos descrevem a dinâmica de um veículo em relação ao seu predecessor. Para tal usa-se a regra de Pipe (Pipe, 1953) “Uma boa regra para que um veículo siga outro com uma distância segura é permitir, pelo menos, a distância de um carro entre os veículos, para cada 16,1 Km/h de velocidade de deslocamento”. Através da utilização desta regra é possível determinar uma distância grosseira em relação ao veículo da frente (D_n), de um veículo n que se desloca com uma velocidade v . O factor de velocidade de risco F obtém-se considerando que, os condutores sabem que a sua velocidade é um factor fundamental pois além de tentarem evitar colisões pretendem também minimizar os potenciais estragos provocados por uma eventual colisão. Assim, este factor é modelado considerando que os condutores aumentam o seu tempo em relação ao veículo da frente através do factor de velocidade de risco F linear a v . Por último a distância mínima em relação ao veículo da frente d_{min} , representa o menor espaçamento entre veículos quando parados.

3.5.1.2 Modelos estímulo-resposta

Nestes modelos os condutores tentam seguir o comportamento dos veículos que os precedem (figura 3.2).

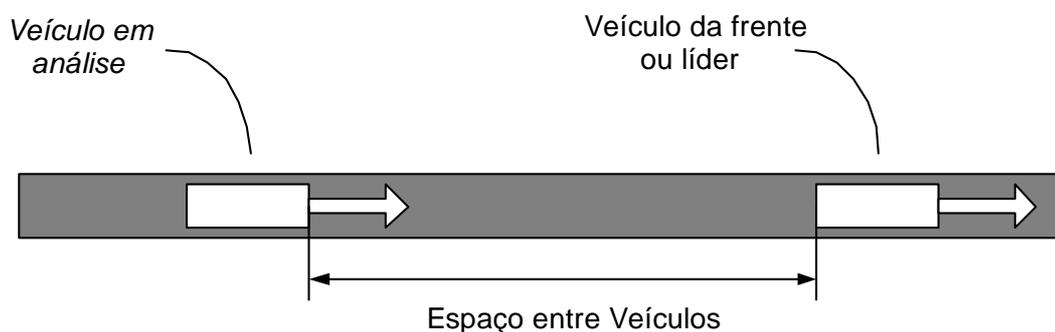


Figura 3.2 – Regime *car-following*

A fórmula geral deste modelo é:

$$resposta_n(t) = sensibilidade_n(t - T_n) \times estímulo_n(t - T_n) \quad (3.7)$$

onde:

t - tempo de observação

T_n - tempo de reacção do condutor n

$resposta_n(t)$ - aceleração/desaceleração aplicada no instante t

O tempo de reacção T_n inclui o tempo de percepção (período de tempo que decorre desde que o condutor recebe o estímulo até ao momento que o pé reage) e o tempo de movimento do pé do condutor (reacção do sistema condutor-veículo). A velocidade relativa em relação ao veículo da frente é geralmente considerada o *estímulo*, sendo a *sensibilidade* um factor de proporcionalidade que poderá ser função de vários factores, como velocidade do veículo e espaço à frente.

Em 1958, Chandler *et. al.*, desenvolveram o primeiro modelo deste tipo, que é basicamente um modelo linear simples. A sua representação matemática pode ser observada na equação (3.8).

$$a_n(t) = \alpha \Delta V_n^{front}(t - T_n) \quad (3.8)$$

onde:

$a_n(t)$ - aceleração aplicada pelo condutor n no instante t

α - constante que representa a sensibilidade

$\Delta V_n^{front}(t - T_n) = [V_n^{front}(t - T_n) - V_n(t - T_n)]$ - estímulo

$V_n(t - T_n)$ - velocidade do veículo no instante $(t - T_n)$

$V_n^{front}(t - T_n)$ - velocidade do veículo da frente no instante $(t - T_n)$

O condutor responde ao estímulo do instante $(t - T_n)$ através da aceleração no instante t . O termo que representa a sensibilidade é o mesmo, independentemente de se tratar de uma situação de aceleração ou de desaceleração, o que representa uma limitação do modelo. Em 1959, Gaziz *et al.*, propuseram um modelo que ultrapassa este problema, através da inclusão

do espaçamento entre dois veículos, no termo da equação que representa a sensibilidade. O modelo é representado através da equação:

$$a_n(t) = \frac{\alpha}{\Delta X_n(t - T_n)} \Delta V_n^{front}(t - T_n) \quad (3.9)$$

onde:

$$\Delta X_n(t - T_n) - \text{espaço entre dois veículos no instante } (t - T_n)$$

Os parâmetros α e T são estimados para o condutor utilizando factores de correlação. Edie (1961), aponta duas limitações ao modelo representado em (3.9). A primeira limitação tem a ver com o ponto de vista comportamental pois a teoria *car-following* não se aplica a tráfego de baixa densidade. A segunda limitação refere-se à relação velocidade/densidade macroscópica, derivada da equação (3.9), pois aponta que à medida que a densidade se aproxima de zero, a velocidade tende para infinito. Assim, para ultrapassar as limitações referidas propõe a alteração do termo que representa a sensibilidade, que passa a ser proporcional à velocidade e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os veículos. O modelo é representado pela equação (3.10).

$$a_n(t) = \alpha \frac{V_n(t - T_n)}{\Delta X_n(t - T_n)^2} \Delta V_n^{front}(t - T_n) \quad (3.10)$$

Neste caso o estímulo continua a ser função da velocidade relativa ao veículo da frente, o que não é realista quando se trata de fluxos de tráfego de baixa densidade, em particular quando a distância entre veículos é elevada. Newell (1961), sugeriu uma relação entre a velocidade e o espaçamento entre veículos dada pela equação (3.11), que substitui a formulação do tipo sensibilidade/estímulo, para explicar a aceleração no modelo *car-following*.

$$V_n(t) = G_n \Delta X_n(t - T_n) \quad (3.11)$$

onde G_n é uma função cuja forma determina a especificação dos modelos apresentados anteriormente. Para G_n são assumidas formas distintas para situações de aceleração e desaceleração.

O modelo desenvolvido por Gazis *et al.*, em 1961, conhecido como Modelo Não Linear General Motors (GM), é o mais geral sendo representado pela equação (3.12).

$$a_n(t) = \alpha \frac{V_n(t)^\beta}{\Delta X_n(t - T_n)^\gamma} \Delta V_n^{front}(t - T_n) \quad (3.12)$$

onde α , β e γ são parâmetros do modelo. A sensibilidade é proporcional à velocidade com expoente β e proporcional à distância entre veículos com expoente γ . O parâmetro α é uma constante de proporcionalidade e a velocidade relativa entre veículos representa o estímulo.

Ozaki estimou, em 1993, os parâmetros do modelo GM (3.12). Assim, utilizou regressão linear para estimar um modelo para o tempo de reacção do condutor e uma correlação linear para estimar os parâmetros α , β e γ . Ozaki considerou quatro factores distintos para a identificação do tempo de reacção: início da desaceleração, desaceleração máxima, início de aceleração e aceleração máxima. Esta abordagem ao tempo de reacção não é consistente com a que foi utilizada por Gerlough e Huber, em 1975. Estes autores definem o tempo de reacção como o somatório dos tempos de percepção e de movimento do pé. Um condutor pode ter tempos de reacção diferentes consoante a capacidade de desaceleração do veículo. Por exemplo, um condutor que conduz em veículo com travões eficazes pode não desacelerar imediatamente, mesmo que o seu predecessor tenha reduzido a sua velocidade, mas poderá fazê-lo somente quando a distância entre os veículos for mais reduzida. Isto não implica que o tempo de reacção seja menor, como Ozaki sugeriu. No entanto, este autor fez uma consideração importante: as condições de tráfego, nomeadamente o espaço entre o veículo e o seu predecessor, e a aceleração do líder, influenciam o tempo de reacção.

Aycin e Benekohal desenvolveram, em 1998, um modelo *car-following* que estima a taxa de aceleração em qualquer instante de tempo. A aceleração no próximo instante obtém-se somando à aceleração actual, o produto da taxa de aceleração estimada pela diferença de tempo para a aceleração actual. Esta estratégia garante a continuidade do perfil de aceleração de um dado condutor.

3.5.1.3 Modelos de psico espaçamento (psycho-spacing)

Os modelos *car-following* apresentam duas limitações sob o ponto de vista comportamental.

Em primeiro lugar o modelo assume que um condutor segue sempre o seu líder, mesmo quando o espaçamento entre eles é significativo. Em segundo lugar, considera que os condutores conseguem ter sempre uma percepção correcta das diferenças em relação à velocidade relativa entre veículos, mesmo quando estas são muito pequenas, e, portanto, considera que os condutores reagem sempre a tais diferenças. Em 1988 Leutzbach propôs um modelo de psico-espaçamento que pretendia ultrapassar as limitações referidas. Leutzbach introduziu o termo nível de percepção, para definir o limite de velocidade relativa que é função do espaçamento entre veículos. Este limite é menor para pequenos espaçamentos, sendo gradualmente aumentado à medida que o espaçamento aumenta. O condutor reage ao estímulo (velocidade relativa entre veículos) apenas quando este excede o nível de percepção. Nenhuma formulação matemática foi proposta para a representação deste modelo. No entanto, Wiedemann já em 1974 desenvolveu um modelo que para além de considerar o nível de percepção incorporava também os conceitos de ultrapassagem e de mudança de faixa. Seguindo a mesma abordagem, Francher e Bareket desenvolveram, em 1998, um modelo similar para o estudo dos sistemas automáticos de *cruise control* (ACC).

Um grande número de modelos de simulação actuais tem como base este tipo de modelos (Hoogendoorn e Bovy, 2001).

3.5.2 Modelos de aceleração “*free-flow*”

Os modelos apresentados na secção anterior aplicam-se exclusivamente a regimes *car-following* que se caracterizam pelo facto de um condutor seguir sempre o seu líder. Quando o espaçamento entre veículos é elevado, ou seja, quando o veículo da frente não interfere no comportamento do veículo em circulação, os condutores tentam atingir uma determinada velocidade ao invés de seguirem o veículo da frente. Este regime denomina-se de fluxo livre (*free-flow*).

Nesta secção incluem-se os modelos que podem ser aplicados a regimes *car-following* e a regimes *free-flow*. Por esta razão alguns autores consideram tratar-se de modelos gerais de aceleração (*general acceleration models*) (Ahmed, 1999).

Em 1981, Gipps desenvolveu o primeiro modelo *car-following* aplicável a ambos os regimes (*car-following* e *free-flow*). Este modelo calcula a aceleração máxima de um condutor, considerando que a velocidade atingida não excede a velocidade desejada e a que a distância entre os veículos não será menor que a distância de segurança mínima. Os parâmetros do modelo não foram estimados com rigor e o tempo de reacção foi definido arbitrariamente para todos os condutores.

Em 1988, Benekohal e Treiterer desenvolveram um modelo de aceleração a que chamaram CARSIM, para simular tráfego em condições normais e em “pára-arranca”. A aceleração de um veículo é calculada para cinco situações distintas, sendo seleccionada a mais adequada para actualizar a velocidade e a posição do veículo. As cinco situações consideradas são as seguintes:

- o veículo está em movimento mas ainda não atingiu a velocidade desejada;
- o veículo atingiu a velocidade desejada;
- o veículo parou e recomeça o movimento a partir dessa posição;
- o movimento do veículo é controlado por um algoritmo *car-following*, no qual existe uma restrição relativa ao espaço entre veículos;
- o veículo está em movimento, de acordo com um algoritmo *car-following* com uma restrição de não colisão.

Neste modelo os tempos de reacção dos condutores são gerados aleatoriamente e se a densidade de tráfego é maior então os tempos de reacção considerados são menores.

Em 1996, Yang e Koutsopoulos desenvolveram o modelo de aceleração utilizado no simulador de tráfego microscópico MITSIM. Com base no espaço entre veículos é atribuído ao condutor um dos três regimes seguintes:

- regime de emergência, se o espaço entre veículos for menor que o limite mínimo;
- regime *car-following*, se o espaço entre veículos for superior ao limite mínimo mas inferior ao limite máximo;

- regime *free-flow*, se o espaço entre veículos for superior ao limite máximo.

No regime de emergência o condutor efectua a desaceleração necessária para evitar a colisão com o seu líder e aumenta o espaço entre veículos. No regime *car-following* utiliza-se o modelo GM (eq. 3.12) para determinar a taxa de desaceleração. No regime *free-flow* o condutor tenta atingir a velocidade desejada, aplicando uma aceleração máxima, se a velocidade actual é inferior à desejada ou uma desaceleração normal, no caso contrário.

Subramanian apresentou, em 1996, um modelo geral de aceleração para o comportamento do condutor nos regimes *car-following* e *free-flow*. O regime onde o condutor se enquadra é dado por uma distribuição de limites de aceleração. No regime *car-following*, considera que os condutores seguem o líder ao passo que no regime *free-flow* é assumido que os condutores tentam atingir a velocidade desejada. A especificação do seu modelo é uma extensão do modelo GM (eq. 3.12). O tempo de reacção foi modelado como uma variável aleatória considerando a variabilidade entre condutores e do próprio condutor. A estimação dos parâmetros do modelo foi realizada com base em dados recolhidos em 1983 em Los Angeles (Smith, 1985).

3.5.3 Modelos de mudança de faixa (*lane changing*)

Estes modelos têm por objectivo a modelação do comportamento do condutor na manobra de mudança de faixa de rodagem. As manobras de mudança de faixa acontecem quando há uma ultrapassagem ou uma mudança de direcção. Estas manobras podem ocorrer em duas situações distintas, quando há pouco trânsito como, por exemplo, numa auto-estrada ou, então, quando existe um elevado grau de congestionamento, como nas vias urbanas. Em ambas as situações a mudança de faixa só é possível se existir espaço disponível na faixa de destino, para que o veículo possa efectuar a manobra em segurança, sem provocar abrandamentos significativos nos veículos que circulam nessa faixa.

O processo de mudança de faixa pode ser obrigatório ou arbitrário. A mudança de faixa é obrigatória quando a faixa actual deixa de ser uma opção. Por exemplo, devido às regras de trânsito, à existência de acidentes ou à necessidade de sair da via, o condutor tem que se deslocar para outra faixa. A mudança de faixa é arbitrária quando o condutor não está satisfeito com as condições de condução na faixa actual. Por exemplo, devido ao facto da

velocidade média da faixa actual ser diferente da velocidade desejada ou à existência de veículos a circular com velocidades inferiores.

Existem vários aspectos a ter em conta nestes modelos. A dificuldade em modelar o comportamento do condutor na mudança de faixa, o facto de ser uma manobra perigosa, a possibilidade de ocorrerem incidentes tendo em conta que existem outros veículos em circulação, ou o posicionamento dos veículos da faixa actual e da faixa de destino, o que implica o conhecimento do fluxo de tráfego em ambas as faixas de rodagem.

Em 1986, Gipps propôs um modelo de decisão para a mudança de faixa onde eram consideradas várias situações de condução urbana, tais como a existência de sinais de trânsito, obstruções e a presença de veículos pesados, que afectavam a atitude do condutor. O processo de decisão de mudança de faixa considerava três factores: necessidade, desejo e segurança. Eram efectuadas análises para diferentes condições de condução, mesmo aquelas em que o condutor se deparava com objectivos contraditórios, sendo estes ordenados usando um processo determinístico. Os parâmetros deste modelo não foram formalmente estimados.

O simulador microscópico de tráfego CORSIM (FHWA, 1998) utiliza o FREESIM para simular auto-estradas e o NETSIM para simular vias urbanas. Este simulador considera dois tipos de mudança de faixa, a saber a obrigatória e a arbitrária. A necessidade ou a vontade de mudar de faixa é determinada através do cálculo de uma factor de risco aceitável para o condutor. Este factor de risco é função da posição relativa do condutor face ao objecto que originou a necessidade de mudança de faixa. Este modelo inclui um conjunto de parâmetros pré-definidos, mas também permite ao utilizador definir os parâmetros que entender.

Em 1996, Yang e Koutsopoulos, desenvolveram um modelo de mudança de faixa em auto-estrada, baseado em regras. Este modelo foi implementado no simulador MITSIM. Como no caso anterior, neste modelo também são considerados os dois tipos de mudança de faixa, isto é, a obrigatória e a arbitrária. A modelação do comportamento do condutor no processo de mudança de faixa, quando em presença de objectivos contraditórios, foi tratada através de uma função probabilística. Um condutor apenas efectua uma mudança de faixa arbitrária, quando a velocidade do seu líder é inferior à velocidade desejada. Neste caso verifica se tem oportunidade de aumentar a velocidade nas faixas vizinhas.

Os autores também desenvolveram um modelo de aceitação de espaço disponível (*gap acceptance*) onde se considera o facto da distância disponível crítica (definida como a menor distância disponível aceitável) ser menor em situações obrigatórias de mudança de faixa do que em situações arbitrárias. Não foi realizado nenhum processo formal para a estimação de parâmetros.

Em 1996, Ahmed *et al.* propuseram um modelo para o comportamento do condutor no processo de mudança de faixa, em auto-estradas, em situações obrigatórias e arbitrárias. O processo de mudança de faixa é modelado como uma sequência de quatro passos: a decisão de mudar de faixa, a escolha da faixa (direita ou esquerda), a aceitação do espaço disponível na faixa desejada e a realização da manobra.

Na figura 3.3 pode observar-se a estrutura do modelo proposto.

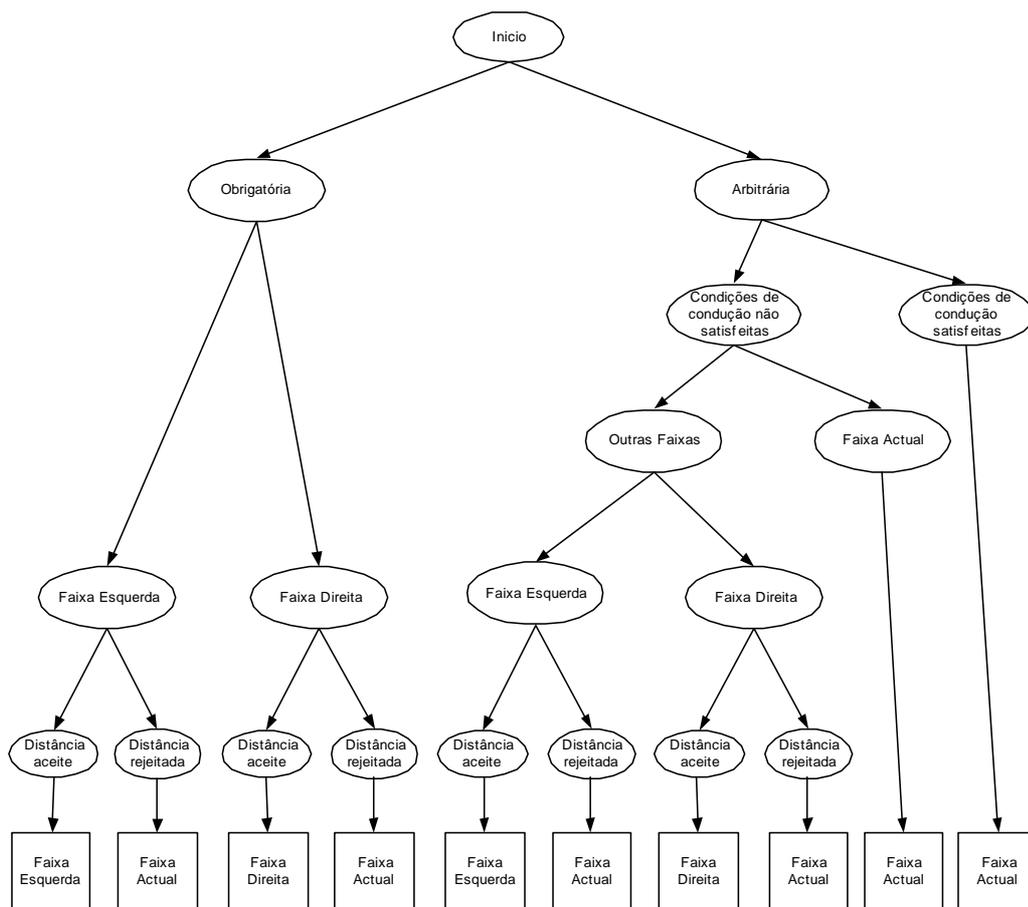


Figura 3.3- Modelo proposto por Ahmed *et al.* (1996)

A modelação destes elementos de decisão foi efectuada utilizando uma plataforma de selecção discreta, que permite a modelação do impacto de diferentes condições de tráfego no comportamento do condutor.

Uma questão implícita na mudança de faixa é o espaço disponível entre veículos de modo a permitir a manobra. Por esta razão é necessário tratar os espaços disponíveis, o que é conseguido através dos modelos de aceitação de espaço disponível (*gap acceptance*). Aliás, este tem sido um dos principais objectivos no que respeita ao desenvolvimento de modelos de comportamento do condutor no processo de mudança de faixa (Ahmed, 1999).

3.5.3.1 Modelos de “*gap acceptance*”

Os modelos de *gap acceptance* permitem verificar se é possível executar a mudança de faixa observando o posicionamento e as velocidades dos veículos líder e perseguidor da faixa destino e, assim, decidir se o espaço entre eles é suficiente para a execução da manobra.

O critério que define a mudança de faixa, após a análise dos espaços disponíveis, consiste na comparação de uma distância mínima aceitável predefinida com a distância existente. A resposta ao problema é do tipo binária, sim ou não. O condutor aceita ou rejeita a distância disponível com base na comparação desta com uma distância mínima crítica:

$$Y_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } G_n(t) \geq G_n^{cr}(t) \\ 0 & \text{se } G_n(t) < G_n^{cr}(t) \end{cases} \quad (3.11)$$

onde:

$Y_n(t)$ é a variável que indica escolha que assume o valor 1 se a distância disponível for aceite e 0 no caso contrário

$G_n(t)$ é a distância disponível

$G_n^{cr}(t)$ é a distância crítica mínima

As distâncias mínimas aceitáveis são normalmente modeladas como variáveis aleatórias que definem o comportamento de vários condutores ao longo do tempo, de forma a considerar a

natureza probabilística das decisões. Para a sua modelação, Herman e Weiss, em 1961 consideraram uma distribuição exponencial, Drew, em 1967, adoptou uma distribuição logarítmica e Miller, em 1972, considerou uma distribuição normal. Daganzo, em 1981, propôs um modelo levando em linha de conta a variação da distância crítica na população, assim como o comportamento do condutor ao longo do tempo. Mahmassani e Sheffi, em 1981, introduziram funções para a representação do factor impaciência nos modelos de *gap acceptance*.

Quando um veículo muda de uma faixa origem para uma faixa destino existem diversas variáveis em jogo. Assim, é necessário considerar o espaço crítico atrás do líder e à frente do perseguidor, o que define o espaço limite para o condutor do veículo decidir se pode, ou não, efectuar a mudança. Outro aspecto que está relacionado com o espaço disponível crítico é a velocidade dos veículos em movimento. Se o espaço resultante do espaço disponível crítico dos dois veículos, líder e perseguidor, na faixa de destino, é satisfatória, então o veículo muda de faixa e no caso contrário a manobra não se realiza. Muitos outros parâmetros que podem afectar a distância crítica mínima são apresentados nos artigos propostos (Brlon, 1988), (Adebisi e Sama, 1989), (Saad *et al*, 1990) e (Hamed *et al*, 1997). Estes parâmetros incluem o tipo de manobra, as velocidades dos veículos na estrada principal, as características geométricas da rede de estradas, a presença de peões, as condições ambientais e atmosféricas. Contudo, a maior parte da investigação realizada é de índole qualitativa e aborda as características macroscópicas do processo, em vez do comportamento microscópico.

3.5.4 Algumas considerações

A adaptação das exigências da modelação às novas tendências de *software* e às ferramentas disponíveis para apoiar os SIT é um factor importante para a evolução dos simuladores microscópicos. Uma realização formal das exigências básicas de um simulador microscópico implica a construção de modelos tão perto da realidade quanto possível, de modo a evitar a geração de erros. A recente evolução dos simuladores microscópicos tirou proveito do desenvolvimento de simuladores com algumas técnicas computacionais para modelação mais avançadas, que serão referidas na secção 3.8.

Há um número considerável de modelos de simulação microscópicos já desenvolvidos. No projecto SMARTTEST, já concluído, foram identificados 58 destes modelos dos quais se listam, por tipo de aplicação, na tabela 3.1, aquelas que se consideram mais importantes.

Tabela 3.1- Tipos de Modelos de Microsimulação

Urbanos	Motorizados	Combinados	Outros
CASIMIR	AUTOBAHN	AIMSUN2	ANATOLL
DRACULA	FREEVU	CORSIM	PHAROS
HUTSIM	FRESIM	FLEXSYT II	SHIVA
MICSTRAN	MIXIC	INTEGRATION	SIMDAC
NEMIS	SISTM	MELROSE	
NETSIM		MICROSIM	
PADSIM		MITSIM	
SIGSIM		PARAMICS	
SIMNET		PLANSIM-T	
SITRA-B+		TRANSIMS	
SITRAS		VISSIM	
THOREAU			

Na tabela 3.2 são apresentados alguns dos modelos de simulação de tráfego mais importantes desenvolvidos durante os últimos quarenta anos, classificados de acordo com os critérios apresentados.

Tabela 3.2 - Modelos de Simulação de Tráfego

Nível Detalhe	Nome do Modelo	Contínuo	Discreto	Determinístico	Estocástico
Micro	INTEGRATION		X	X	
	NETSIM		X		X
	CORSIM		X		X
	TRANSIMS		X		X
	Cellular Automaton – Models		X		X
Meso	DYNASMART		X	X	
	Multilane Gas-Kinetic Models	X		X	
	Improved Gas-Kinetic Models	X		X	
Macro	FREFLO		X	X	
	Helbing Type Models	X		X	
	Cell Transmission Models		X	X	

3.6 Validação e calibração

Na área da simulação a precisão dos dados e dos resultados obtidos tem uma importância significativa nas conclusões tiradas a partir de uma determinada simulação. Por isso, é necessário validar e afinar o modelo de forma que represente com máxima exactidão aquilo

que se pretende simular. O processo de validação e de calibração tem por objectivo verificar e ajustar o sistema para que os resultados sejam obtidos a partir de uma representação o mais próxima possível da situação real a simular.

A calibração distingue-se como sendo o processo que permite a verificação e preparação dos dados de entrada e dos parâmetros de um modelo de forma que os resultados obtidos na simulação sejam coerentes com os dados obtidos do mundo real. Assim, é necessário calibrar o modelo para que os resultados da simulação sejam fidedignos e possam permitir tomar decisões adequadas para a gestão de tráfego.

Por outro lado a validação é a comparação entre os dados de saída da simulação com dados que não fazem parte do processo de calibração. Os dados usados para calibrar ou validar um modelo de micro simulação são medidos a partir de uma situação real de tráfego.

Outra questão a ter em conta antes de se proceder à calibração é a realização de uma análise de sensibilidade de forma a obter um melhor conhecimento dos parâmetros que se pretendem calibrar.

3.6.1 Dados de validação e calibração

Para o processo de validação e calibração é necessário conhecer o comportamento do fluxo de tráfego e os dados a ele associados, pelo que é um processo complexo. No que se refere à calibração a questão crucial encontra-se na capacidade de modelar correctamente o volume de tráfego. A razão desta dificuldade prende-se com o facto de que num caso de engarrafamento o valor certo ou errado de fluxo máximo de tráfego influencia o estado do congestionamento, aumentando o tempo das viagens e os níveis de poluição.

Os dados usados para fazer a calibração e a validação dos parâmetros do modelo de tráfego, isto é, velocidades, fluxos e escolhas de percursos, podem ser obtidos através de várias medições em diferentes pontos da rede ou através de equipamento específico de detecção e medição. Alguns tipos de dados que podem ser usados para validar e calibrar os modelos são: o fluxo e velocidade, o tempo de viagem, a progressão na rede, o tempo total em fila, o comprimento máximo de fila em número de carros, a percentagem de paragens e o tempo de atraso.

3.6.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade surge devido à necessidade de se obter uma melhor compreensão sobre quais os factores que têm maior peso no desempenho do modelo e influência nos resultados. A atribuição de valores aos diferentes parâmetros de um modelo faz parte do processo de calibração. Se os parâmetros de calibração forem fáceis de entender e de medir, então os processos de análise de sensibilidade e calibração, em conjunto com o conhecimento do comportamento do fluxo de tráfego no sistema a estudar, permitem uma fácil compreensão do sistema.

Este processo é demorado e lento visto que há uma grande variedade de parâmetros a analisar e o processo de análise é realizado individualmente. Os parâmetros dependem das características do fluxo de tráfego e do sistema a modelar.

Existem três formas de efectuar a análise de sensibilidade:

- Alteração dos parâmetros do modelo – alterar selecção de percursos (*route choice*), parâmetros locais ou globais e parâmetros dos veículos;
- Alteração a rede – efectuar alterações geométricas na estrutura da rede de estradas;
- Alteração do plano de controlo – modificar, por exemplo, temporização de semáforos.

3.7 Limitações dos modelos de simulação de tráfego nos SIT

Até ao momento foram desenvolvidos muitos modelos de simulação de tráfego, tendo sido identificadas algumas limitações genéricas:

- **Modelação de congestionamentos.** A maior parte dos modelos de simulação utilizam algoritmos simples do tipo *car-following* e *lane-changing* para determinar os movimentos dos veículos. Durante uma situação de congestionamento estes não conseguem reflectir um comportamento do condutor de uma forma realista, pelo que se obtêm, frequentemente, resultados pouco satisfatórios.

- **Modelação ambiental.** Está a ser efectuado um esforço considerável no sentido de desenvolver modelos relativos a emissão de gases com impacto ambiental, para os incorporar na simulação. Para alguns tipos de gases é um processo relativamente simples mas para certas reacções químicas, é bastante mais difícil. Por outro lado, é difícil a aquisição de dados fiáveis, relativos às emissões de gases, para uma variedade razoável de situações de tráfego.
- **Ambientes integrados e dados comuns.** Os modelos de simulação são frequentemente utilizados com outros modelos como, por exemplo, os modelos de previsão de tráfego. Assim, existem dados comuns aos modelos tais como, dados de origem-destino, topologia da rede de estradas e definições dos percursos dos transportes públicos. Porém, cada modelo necessita dos dados num formato distinto, pelo que há necessidade de os converter para o formato desejado.
- **Avaliação da segurança.** A segurança é um aspecto muito complexo. A maior parte dos modelos que prevêem as condições de segurança são ainda muito limitados. De facto, baseiam-se no fluxo de veículos em estradas, ou no processo de mudança de faixa, considerando apenas a velocidade média de circulação mas, na realidade, os veículos circulam com velocidades distintas em diferentes períodos temporais. Além disso, uma grande parte dos sistemas de simulação “ignoram” utentes vulneráveis, como os ciclistas e os peões.
- **Procedimentos normalizados e indicadores de desempenho.** A simulação de tráfego tem que produzir resultados que permitam ordenar as alternativas existentes, de uma forma realista e de acordo com a sua importância. As respectivas posições são função dos indicadores de desempenho escolhidos e dos pesos atribuídos.

Considerando apenas os modelos de simulação microscópica de tráfego é possível identificar algumas limitações no que respeita à modelação do comportamento de condutor (Toledo, 2003). Os modelos referidos na secção 3.5 assumem os seguintes pressupostos:

- **Comportamentos independentes** – As interacções entre as várias decisões que um condutor efectua são ignoradas. Contudo, a consideração de tais interacções pode ser

importante. Por exemplo, o comportamento de aceleração pode ser afectado pelas considerações de mudança de faixa.

- **Comportamento instantâneo** – Numa grande parte dos modelos é assumido que o condutor toma decisões instantâneas. Por outras palavras, num determinado instante o condutor avalia a situação e estabelece imediatamente uma acção. Na realidade, um condutor pode estabelecer um plano de acções a realizar ao longo do tempo.
- **Comportamento reactivo** – Os modelos existentes assumem que as decisões de condução se baseiam apenas nas condições de tráfego actuais ou passadas. Todavia, muitas decisões têm por base a antecipação ou a previsão das futuras condições de tráfego.
- **Comportamento míope** – Nos modelos existentes o comportamento de condução é quase exclusivamente afectado, por considerações relacionadas com a vizinhança local, ou seja, com as relações entre o veículo e aqueles que o rodeiam. Em alguns casos estratégias mais abrangentes deveriam ser adoptadas. Por exemplo, a consideração de uma via urbana com duas faixas e cruzamentos com sinalização de tráfego. Mesmo que as condições de condução sejam melhores na faixa da esquerda, os condutores podem preferir a faixa da direita para evitar atrasos que eventualmente possam ser provocados por veículos que pretendam virar à esquerda. Esta situação pode afectar o comportamento dos condutores antes destes atingirem o cruzamento e terem conhecimento da existência ou não de veículos que pretendem virar à esquerda. Da mesma forma, numa auto-estrada os condutores podem preferir a faixa da esquerda devido à existência de ramais de acesso, uma vez que os veículos que entram na auto-estrada irão provocar um abrandamento na velocidade de circulação na faixa da direita. Mais uma vez, este comportamento pode acontecer, antes dos condutores saberem se existem, ou não, veículos a entrar na auto-estrada.

A aplicação destes modelos em simuladores microscópicos pode resultar em características irrealistas do fluxo de tráfego. O modelo *car-following* considera, de certa forma, a existência de um comportamento passivo, pouco convicto, e, assim, os pressupostos enumerados são perfeitamente aceitáveis. No modelo *lane-changing* considera-se um comportamento que requer a avaliação de uma situação, a antecipação do comportamento de outros condutores e a

tomada de decisão em relação a uma lista de acções a executar ao longo de um período de tempo. Contudo, os modelos existentes assumem que os condutores são puramente reactivos quando enfrentam uma determinada situação. Por exemplo os condutores que pretendem mudar de faixa avaliam a distância disponível e decidem se a aceitam ou não, mas não fazem qualquer esforço no sentido de adaptar a sua posição (alterando a velocidade e aceleração) de forma a tornar aceitável uma distância disponível que nas condições iniciais não seria aceitável.

Estas limitações evidenciam a necessidade de continuar a investir no desenvolvimento de modelos e sistemas de simulação de tráfego que apoiem a evolução dos SIT.

3.8 Técnicas computacionais para modelos de simulação microscópica

Um modelo é uma representação matemática de um sistema ou de um processo físico, através de um conjunto de equações. As técnicas computacionais que permitem a sua implementação em código máquina são técnicas para resolver o modelo e, por isso mesmo designadas de técnicas de modelação por alguns autores (Dantzig e Traucker, 2001), (SMARTTEST, 2000) e (Algers *et al.*, 2001).

Os modelos de simulação microscópica para gestão de tráfego são utilizados há já alguns anos, tendo sofrido uma grande evolução durante este período. Ao mesmo tempo houve um desenvolvimento significativo a nível de ferramentas de computacionais e, conseqüentemente, das técnicas de modelação utilizadas (Algers *et al.*, 2001). Nesta secção apresentam-se algumas técnicas computacionais, que podem ser associadas ao desenvolvimento de modelos de simulação microscópicos.

No conjunto de técnicas computacionais utilizadas para a criação de modelos de simulação microscópica podem ser incluídas:

- Programação por restrições;
- Lógica difusa;
- Modelação qualitativa;

- Simulação de eventos discretos paralelos;
- “*Celular automata*”;
- Programação orientada aos objectos;
- Algoritmos genéticos;
- Redes neuronais;
- Computação paralela;
- Realidade virtual;
- Sistemas de informação geográfica;
- Sistemas baseados em conhecimento;

3.8.1 Programação por restrições

A programação por restrições (*Constraint Programming* - CP) pode ser definida como um paradigma de programação onde um problema é visto como uma questão de satisfação de restrições (*Constraint Satisfaction Problem* - CSP). Assim, o problema é representado de uma forma declarativa e o algoritmo orientado para a resolução de restrições, cuja tarefa é encontrar soluções para o problema. Segundo (Tsang, 1993) um problema de satisfação de restrições é especificado através de: um conjunto finito de variáveis; uma função que relaciona as variáveis com o domínio e um conjunto de restrições (onde cada restrição limita a combinação de valores que um conjunto de variáveis pode tomar simultaneamente).

As restrições podem ser de tipos distintos e incluem, normalmente, restrições lógicas e numéricas. Uma solução para um problema deste tipo (CSP) consiste na atribuição de um valor a cada uma das variáveis do domínio, satisfazendo as restrições a que esta está sujeita. Se o problema for restringido através da utilização de restrições binárias ou unárias, poderá ser representado através de um gráfico de restrições (*constraint graph* ou *constraint network*) onde cada nó representa a variável e cada arco representa a restrição entre variáveis.

O conjunto de restrições é resolvido através de algoritmos de satisfação de restrições, que consistem em procedimentos de pesquisa de associações compatíveis para o conjunto de variáveis no gráfico de restrições.

Aplicação à modelação de tráfego

Na área das aplicações de tráfego e transporte têm sido estudados alguns problemas sob o ponto de vista de investigação operacional, que pode ser descrita como a optimização de um processo sujeito a restrições (*constrained optimisation*)

No que respeita à modelação de tráfego, a utilização de técnicas de programação por restrições tem sido utilizada para modelar o comportamento do fluxo de tráfego na rede. No entanto, é normalmente utilizada como uma ferramenta para a implementação de modelos qualitativos da rede de tráfego. Como exemplos podem citar-se o protótipo KITS (KITS, 1996) e o sistema desenvolvido pela NTT Data Co. (Sugimoto *et al.*, 1992).

3.8.2 Lógica difusa (*Fuzzy Logic*)

A teoria da lógica difusa foi desenvolvida com o intuito de estender a lógica convencional de forma a lidar com o conceito de verdade parcial, isto é, valores que estão entre o totalmente verdadeiro (1) e o totalmente falso (0) (Zadeh, 1965) e (Zadeh, 1973). Desta forma, torna-se possível representar conhecimento vago e impreciso sobre um determinado domínio (Brule, 1992). A teoria da lógica difusa baseia-se na teoria dos conjuntos nublados (*fuzzy sets*). Dado um universo de elementos S, um conjunto difuso F de S é uma representação dos elementos de S no intervalo [0,1]. O valor 0 é utilizado para representar a total não pertença, enquanto que o valor 1 representa a total pertença, pelo que todos os valores entre 0 e 1 representam níveis intermédios de pertença. O valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto nebuloso de qualquer conjunto parcialmente ordenado, ao contrário do que acontece nos sistemas lógicos binários, onde o valor verdade só pode assumir 2 valores: verdadeiro (1) ou falso (0). Assim, a lógica difusa pode ser definida como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação.

Aplicação à modelação de tráfego

A lógica difusa tem sido utilizada em aplicações de controlo e gestão tráfego, mas a aplicação à modelação de tráfego está ainda pouco explorada. No entanto, a sua aplicação já tem sido feita contemplando dois aspectos: modelação avançada do comportamento do condutor e interpretação da informação de tráfego.

O primeiro aspecto foi considerado no projecto TRAnSIMS (Davis, 1994), desenvolvido no Los Alamos National Laboratory, no Novo México. Verificou-se que a simulação difusa permite captar a incerteza associada à especificação do comportamento do condutor, nomeadamente no que concerne a alguns conceitos difusos como visibilidade, condições atmosféricas, condições do piso e outras. O segundo aspecto, foi abordado num modelo para analisar e interpretar informação sobre tráfego no projecto ENTERPRICE (ENTERPRICE, 1996).

3.8.3 Modelação qualitativa

A modelação qualitativa (QM), também conhecida como raciocínio qualitativo (QR) é uma linha de investigação da área da Inteligência Artificial, que surgiu na década de 80 (De Kleer e Brown, 1984), (Forbus, 1984). O objectivo consiste no desenvolvimento de métodos e técnicas que permitem modelar e raciocinar sobre a evolução e o comportamento de sistemas (*e.g.*, dispositivos eléctricos e mecânicos). Estes métodos centram-se na análise das propriedades físicas, funcionais, temporais e espaciais, assim como no comportamento dos sistemas. Os métodos desenvolvidos, têm como objectivo o conhecimento do comportamento do sistema em termos qualitativos e quantitativos como acontece com as técnicas matemáticas clássicas.

Os métodos de modelação qualitativa permitem a geração e análise de representações do comportamento do sistema, num universo de estados possíveis, e utilizam essas representações para a realização de diagnósticos ou previsões.

Aplicação à modelação de tráfego

A aplicação dos métodos de modelação qualitativa à área de modelação de tráfego tem tido o objectivo de obter uma simulação qualitativa da rede de fluxo de tráfego para apoiar a tomada

de decisão na gestão da rede de tráfego. A maior parte das aplicações tratam o problema da simulação de auto-estradas, mas existem algumas que também tratam a simulação de trânsito urbano. Exemplos deste tipo de aplicação são o sistema AURA (Cuena, 1988), que inclui uma simulação qualitativa do fluxo de tráfego em estradas urbanas com o objectivo de analisar situações de congestionamento, e um sistema desenvolvido por Martin *et al.* (1994), cujo objectivo é apoiar a decisão num sistema de controlo de tráfego urbano tendo por base um modelo de simulação qualitativa de uma rede de tráfego urbana. Outras aplicações podem ser observadas em Sugimoto *et al.* (1992) e Sauthier e Faltings (1992).

3.8.4 Simulação paralela de eventos discretos

A simulação paralela de eventos discretos (*Parallel Discrete Event Simulation* - PDES) refere-se à execução da simulação de um único evento, num sistema de computação paralelo (Fujimoto, 1990). Um sistema paralelo pode ser utilizado para a execução do modelo, enquanto que o conceito de escalonamento de eventos é utilizado dentro de cada processo lógico (Lin e Fishwick, 1995). Um processo lógico é um conjunto de componentes básicos do modelo e um processador é um conjunto de processos lógicos num sistema paralelo.

Normalmente as aplicações de simulação de tráfego utilizam intervalos de tempo fixos nos esquemas de escalonamento. No final de cada intervalo de tempo, a posição dos veículos é conhecida e, assim, as suas posições para o intervalo de tempo subsequente são calculadas. A simulação baseada em eventos discretos tem uma abordagem distinta podendo atingir melhores níveis de desempenho nos problemas de simulação de tráfego. Os componentes do modelo consistem em eventos que são activados em determinados instantes no tempo. Os objectos na simulação (veículos e sinais de trânsito) mantêm o seu estado actual e apenas o alteram quando ocorre algum evento. Por exemplo, um sinal de trânsito a tomar a cor vermelha é um evento, assim, o estado de um veículo que se aproxima do sinal altera o seu estado de “em movimento” para “parado”. Um evento seguinte, nomeadamente a alteração da cor do sinal de trânsito para verde, vai provocar uma nova alteração de estado do veículo, passando de “parado” para “a andar” (Hotta *et al.*, 1995).

Aplicação à modelação de tráfego

A simulação paralela de eventos discretos pode ser utilizada para reduzir o tempo de processamento através da utilização das vantagens da computação paralela. O comportamento dos veículos só é simulado quando eles se movimentam, ao invés de actualizar a sua posição em intervalos de tempo fixos. Se se tratar da simulação de uma rede de grande dimensão, onde existe um grande número de eventos, este tipo de abordagem talvez não seja vantajosa. De facto, é necessário comparar a quantidade de intervalos e respectivas actualizações com o número de eventos a simular, para se tirar uma conclusão sobre as hipotéticas vantagens de uma aplicação deste tipo.

Um exemplo de um modelo dinâmico de simulação microscópica, que utiliza uma arquitectura baseada na simulação paralela de eventos discretos para avaliação de estratégias de gestão de tráfego, é o STEER (Clegg e Ghali, 1995). Segundo os autores, são assinaláveis as vantagens em relação à velocidade de execução e à simplicidade de alteração de código.

3.8.5 “Cellular automata”

O primeiro modelo *celular automata* foi concebido por Von Newman em 1949. Nesta abordagem o espaço e o tempo são discretos. O espaço é dividido em intervalos idênticos, que são chamados células, que por sua vez tomam um número finito de estados. Os estados das células são alterados segundo regras locais, pelo que o seu estado varia consoante os estados da célula e das células vizinhas no instante de tempo anterior. A actualização das células é feita em bloco para que, os estados de todas as células da grelha sejam alterados a todos os períodos de tempo. Este modelo foi posteriormente utilizado com o objectivo de modelar o processo biológico de auto-reprodução (Von Neuman, 1963), (Fathy, 1974) e (Wolfram, 1986). Desde então, tem sido utilizado numa vasta gama de aplicações da física como a simulação do transporte de partículas e estudos termodinâmicos.

Aplicação à modelação de tráfego

A aplicação desta técnica à simulação microscópica de tráfego de estrada parece bastante apropriada. Assim, cada via da estrada é dividida em pequenas secções (células) cada uma com o comprimento de um veículo. O movimento dos veículos faz-se saltando de célula para célula

de acordo com as regras que caracterizam o tipo (comportamento) do condutor, respeitando as leis básicas da física relativas ao movimento dos veículos (Nagel, 1966). Isto significa que para o mesmo instante de tempo, os veículos que circulem a maior velocidade saltam mais células do que aqueles que circulam a menor velocidade. Esta técnica proporciona uma grande rapidez computacional na simulação de uma quantidade elevada de veículos em deslocamento ao longo da rede de estradas, permitindo a simulação individual de cada veículo.

O primeiro modelo de simulação de tráfego microscópico do tipo *cellular automata* foi desenvolvido por Nagel e Schreckenberg em 1992. O simulador TRANSIMS desenvolvido no Laboratório Nacional “Los Alamos”, Novo México ([http#36](#)), recorre à utilização desta técnica para a implementação dos modelos de fluxo de tráfego, nomeadamente o *car-following* e o *lane changing* (Stretz e Berkgigler, 1998). Outros investigadores têm utilizado esta técnica com o objectivo de estudar a instabilidade do processo de controlo de tráfego, responsável pelos fenómenos de congestionamento e de fluxo “para-arranca”, em auto-estradas e vias urbanas (Schreckenberg e Wolf, 1998) e (Helbin e Treiber, 1998).

3.8.6 Programação orientada aos objectos

A programação orientada aos objectos é uma evolução natural da programação estruturada, proporcionando um estilo de programação, que reproduz a forma como o ser humano executa as tarefas, pelo que as soluções para o problema são obtidas de uma forma mais natural. (Rodriguez-Moscoso *at el.*, 1989).

Ao contrário da abordagem estruturada, que se centra em acções a executar, a abordagem orientada aos objectos centra-se nos objectos sobre os quais vão ser realizadas as acções. O primeiro passo é determinar que classes é necessário definir e quais são as propriedades e acções a associar a cada uma delas. Cada acção constitui um módulo separado. Uma classe funciona como um molde, isto é, a especificação para os objectos, onde se define o comportamento de todas as variáveis de um determinado tipo (Boote, 1995). A classe envolve e associa funções de dados, controlando o acesso a estes. Na sua definição são especificados os seus atributos e as suas funções membro. As classes relacionam-se entre si através de propriedades de herança, partilha de estruturas ou comportamentos definidos numa ou mais classes através de uma estruturação hierárquica (Booch, 1991), e através de ligações que

modelam as relações entre objectos e classes. Um objecto é a variável que pertence a uma determinada classe, que também pode ser referido como instância, quando a referência é ao objecto em si e não à classe a que pertence (Boote, 1995).

Aplicação à modelação de tráfego

Rodriguez-Mosoco *et al.* (1989) referem que os modelos de simulação de tráfego têm falta de representação explícita sobre as considerações e pressupostos realizados no trabalho. Como resultado, tornam-se cada vez mais complexos de entender à medida que se fazem alterações. Uma solução é optar por programação orientada aos objectos que permite uma representação mais explícita e compreensível sobre o comportamento e propriedades dos veículos. Ao mesmo tempo, devido ao facto de ser um estilo de programação modular e reutilizável, o tempo de desenvolvimento e implementação diminui consideravelmente. Por estes motivos esta foi a técnica de programação escolhida para a implementação do simulador de tráfego desenvolvido no âmbito deste trabalho.

Em Booch (1991) apresenta-se a aplicação de uma abordagem orientada aos objectos para o desenvolvimento de um sistema de gestão de tráfego de uma rede de caminho de ferro. Horiguchi *et al.* (1994, 1996) descrevem o desenvolvimento do modelo de simulação microscópico AVENUE, baseado em programação orientada ao objecto para a modelação do fluxo de tráfego e do comportamento do condutor em relação à selecção de rotas e de faixas de rodagem. Este modelo apresenta um elevado nível de flexibilidade em relação à descrição e alteração do modelo de tráfego (Horiguchi, 1994).

3.8.7 Algoritmos genéticos

Os algoritmos genéticos baseiam-se num modelo abstracto da teoria da evolução (Holland, 1975) e (Goldberg, 1989). Foram desenvolvidos com o intuito de serem utilizados como estratégias de pesquisa geral e são métodos de optimização que funcionam sobre populações de soluções possíveis. Podem ser descritos como mecanismos que imitam a evolução das espécies, resultando daí a sua designação.

Um algoritmo genético procura produzir boas soluções através de uma sequência de transformações unárias e binárias de uma população de soluções aleatórias, sendo este

processo controlado por um esquema orientado para a produção de soluções de elevada qualidade. Estas transformações constituem a fase de recombinação de um algoritmo genético e são realizadas por três tipos de operadores simples: selecção, cruzamento e mutação. A sua função é identificar as propriedades consideradas boas e combiná-las numa nova população que, possivelmente, terá as características da melhor solução, sendo a média dos valores das soluções melhor que a anterior. O processo repete-se até que se atinja alguma solução óptima, ou próxima da óptima, ou após decorrido um determinado número de iterações.

Aplicação à modelação de tráfego

Na bibliografia podem ser encontradas aplicações de algoritmos genéticos em alguns contextos de sistemas de transporte, nomeadamente, na optimização de sinais de tráfego, no projecto de redes de transporte e na transferência dinâmica de tráfego.

A aplicação de algoritmos genéticos, capazes de lidar com critérios múltiplos e gerar um conjunto de soluções óptimas, em vez de uma única solução, tem-se mostrado bastante útil para qualquer um dos contextos. Actualmente só a transferência dinâmica de tráfego se encontra incorporada em sistemas de simulação microscópica, pelo que a aplicação dos algoritmos genéticos se encontra restringida, por enquanto, a este domínio.

De uma forma geral pode afirmar-se que os algoritmos genéticos têm um melhor desempenho em relação a técnicas mais tradicionais como a programação não linear, conseguindo lidar com problemas de maior dimensão e obtendo resultados mais rapidamente (Sadek *et al*, 1997).

3.8.8 Redes neuronais

As redes neuronais, também denominadas de modelos de processamento paralelo distribuído ou modelos conexionistas, têm sido desenvolvidas na tentativa de imitar a capacidade humana de aprendizagem e previsão. Os modelos de redes neuronais distinguem-se pela topologia da rede, pelas características dos nós e pelas regras de treino e de aprendizagem. Podem distinguir-se dois tipos de redes neuronais: aquelas que têm aprendizagem supervisionada, que tentam captar as relações desejáveis entre as entradas e as saídas, e as redes neuronais não supervisionadas ou baseadas em competição, que prosseguem sozinhas na tentativa de encontrar uma correlação útil entre os dados de entrada (Fausett, 1994). As redes neuronais

são constituídas por um conjunto de elementos de processamento muito simples designados de *neurons*. Estes elementos processam a informação de entrada para produzirem uma saída através de uma função designada de transferência. Os *neurons* encontram-se interligados através de conexões “pesadas”, isto é, a informação que circula nas conexões é escalada durante a transmissão, de acordo com o valor do seu peso. Assim, na rede, a saída produzida por um *neuron* pode fazer parte da entrada de outro. A funcionalidade de uma rede neuronal depende em grande parte dos valores dos pesos atribuídos às conexões, que poderão ser actualizados ao longo do tempo, tornando possível a adaptação e aprendizagem da rede.

Aplicação à modelação de tráfego

As redes neuronais são particularmente interessantes para modelar sistemas que não são bem conhecidos ou para representar relações cuja forma lógica ou matemática é complexa. Esta característica torna-as bastante indicadas para a modelação de vários aspectos relacionados com os sistemas de transporte, dado que estes têm um elevado grau de não linearidade. Além disso, a complexidade inerente aos sistemas de tráfego, onde coexistem vários agentes autónomos, torna muito difícil a sua compreensão só através de simples observação. Neste âmbito a natureza semi-automática das redes neuronais pode ajudar a revelar relações que possam estar obscuras. As áreas de maior interesse para a aplicação de redes neuronais são: a modelação do comportamento do condutor, a análise das relações espaciais e temporais complexas em situações de congestão de tráfego, o controlo de tráfego e o processamento de imagem.

3.8.9 Computação paralela

O interesse em representações de larga escala para Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) resultou numa forte investigação sobre a utilização de arquitecturas de computação paralela (Hanebutte e Tentner, 1995) e (Junchaya *et al.*, 1992). O processamento sequencial de modelos de redes não é a melhor solução, uma vez que a capacidade do processador não consegue satisfazer as necessidades de tempo real. A computação paralela é uma solução eficiente para melhorar o desempenho dos modelos de simulação de larga escala, permitindo a resolução de problemas mais rapidamente ou a resolução de problemas de maior dimensão num

determinado período de tempo. Hanebutte e Tentner (1995) sugerem que existe uma relação quase linear entre o tempo de execução e o número de processadores.

Há duas abordagens para a utilização de arquitecturas de computação paralela (Hanebutte e Tentner, 1995). A primeira abordagem inclui o desenvolvimento de novo *software* de simulação que inclua algoritmos para usar em processadores paralelos, enquanto que a segunda é a adaptação de modelos de simulação já implementados, para funcionarem numa plataforma paralela. Por motivos óbvios a segunda abordagem parece ser a mais adequada. Em qualquer um dos casos, a informação e o modelo de simulação devem ser divididos e distribuídos pelos processadores da arquitectura. Desta forma conseguem-se simular redes de maior dimensão, uma vez que as restrições impostas ao tamanho do modelo só dizem respeito às redes resultantes da subdivisão.

Aplicação à modelação de tráfego

A computação paralela pode ser aplicada à modelação de tráfego como uma forma de melhorar o desempenho de procedimentos que sejam pesados em termos computacionais, incluindo a atribuição de tráfego em redes de elevada dimensão e o processo de simulação em si. Esta técnica de atribuição, do tipo tudo ou nada, foi otimizada por Grol e Baker (1991). Cada processador paralelo é responsável pelo cálculo de um único caminho. As melhorias na velocidade de simulação obtidas foram de ordem $n \in \mathbb{N}$, em que n representa o número de caminhos da árvore e, conseqüentemente, o número de processadores.

Como exemplos de sistemas de simulação microscópica que utilizem arquitecturas de computação paralela podem citar-se o AIMSUM2 e o TRAF-NETSIM (Barceló *et al.*, 1996) e (Hanebutte e Tentner, 1995). Ambos usaram decomposição geográfica, de forma a que o estado dos veículos localizados numa determinada região fosse actualizado em paralelo. Um outro exemplo é o modelo de simulação microscópica é o PARAMICS (Duncan, 1996). Numa única estação de trabalho, este modelo consegue modelar uma rede com um máximo de 3500 veículos em tempo real, utilizando um passo temporal de 0.5s. Redes de maiores dimensões podem ser modeladas utilizando a versão paralela multi-processador (Duncan, 1996).

3.8.10 Realidade virtual

A realidade virtual (*virtual reality* - VR) pode ser definida como um ambiente tridimensional (3D) emulado por computador, cujos componentes podem ser visualizados e manipulados interactivamente pelo utilizador. A realidade virtual não é uma tecnologia, mas resulta da convergência de uma série de tecnologias, nomeadamente da capacidade do processador e das placas gráficas utilizadas, simulação áudio e vídeo, computação gráfica e interfaces avançadas para interacção homem máquina (Bubley, 1994). Podem ser considerados diferentes tipos de realidade virtual, que se distinguem entre si pelo nível de incorporação de algumas tecnologias emergentes. De acordo com Bubley (1994) podem distinguir-se os seguintes tipos:

- Sistemas de realidade virtual de ambiente de trabalho (*Desktop*) que são disponibilizados através de computadores pessoais. As aplicações de *software* para escritório tendem, cada vez mais, a incorporar técnicas de visualização avançadas;
- Realidade virtual ambiental ou de ambiente (*environmental*) que permite a simulação no monitor de forma quase perfeita, de um determinado ambiente com paredes, tectos e pavimentos proporcionando a sensação de integração no ambiente;
- Simuladores de realidade virtual que são utilizados para a simulação visual interactiva, como uma ferramenta de análise, verificação, validação e treino. Estes simuladores proporcionam experiências muito similares à realidade pois associam a simulação às suas capacidades de recriação de movimento.

Aplicação à modelação de tráfego

A principal vantagem da utilização da realidade virtual consiste na possibilidade da recreação completa de cenários reais a três dimensões. Assim, a integração da realidade virtual com modelos de simulação microscópica melhora significativamente o interface entre o sistema e o utilizador, tornando possível a representação, simulação e obtenção dos resultados desejados dos ambientes de tráfego.

A realidade virtual pode ser aplicada aos sistemas de simulação microscópicos indirectamente, através da investigação realizada sobre os interfaces condutor-veículo. Através da simulação,

os comportamentos e perfis dinâmicos dos condutores podem ser desenvolvidos e consequentemente implementados nos modelos de tráfego.

3.8.11 Sistemas de informação geográfica

Um sistema de informação geográfica (*Geographic Information System* - GIS) é um sistema de apoio à decisão para a análise e gestão de informação espacialmente referenciada ou georeferenciada e respectivos atributos. Os atributos organizam-se segundo uma série de camadas (*layers*) (*e.g.*, polígonos, linhas e pontos) que são referenciadas em relação às características geográficas com base em mapas. Os módulos de um sistema de informação geográfica relacionam as várias camadas de informação para permitirem a captação, manipulação, armazenamento e análise do conteúdo do mapa e das suas características do espaço. Muitas técnicas diferentes têm sido utilizadas com o intuito de modelar vários aspectos da indústria de transportes como, por exemplo, a modelação do impacto de tráfego, da procura de viagens, da poluição e da emissão de gases. Uma vez que as técnicas usadas são distintas, na maior parte das vezes os resultados obtidos são incompatíveis, sendo necessário a criação de um procedimento para a sua integração (Sutton, 1996). Os sistemas de informação geográfica têm o potencial adequado para funcionarem como sistema integrador, servindo de base para a organização da informação e para o projecto de sistemas de informação (Vonderohe *at al.*, 1993).

Aplicação à modelação de tráfego

O objectivo a longo prazo de um sistema de informação geográfico é disponibilizar um ambiente gráfico uniforme onde se pode integrar informação que pode servir objectivos distintos. Os resultados obtidos devem ter um formato similar ou compatível, de forma a que se possam estabelecer comparações, quer entre resultados quer com outra informação dentro do mesmo GIS. Por exemplo, os volumes de veículos e de trânsito devem poder ser comparados com a quantidade de acidentes, ou com os índices de qualidade do ar (Sutton, 1996).

Num sistema deste tipo, a informação a representar pode ser caracterizada pelos atributos físicos (geométricos, número de faixas de rodagem, intersecções). Todavia, deverá também

incluir os atributos de tráfego (velocidade, volume, acidentes), atributos de viagem (pontos de fim de viagem, rotas e modos) e os atributos operacionais (sinais de tráfego, marcas de pavimento, sinais de trânsito).

A curto prazo, um sistema de informação geográfica pode ser interligado a modelos de transportes que utilizem ferramentas de *software/hardware* específicas. Assim, os ficheiros com os atributos do GIS são integrados com os ficheiros dos modelos de transporte, obtendo-se uma organização da informação que tenta ultrapassar as limitações de cada um deles. Como exemplo deste tipo de integração podem referir-se os sistemas ARC/INFO com TRANPLAN e ARC/INFO com EMME/2, que, apesar de serem modelos de simulação macroscópica, ilustram a possibilidade de realização da referida integração (SMARTTEST, 2000).

Uma outra possibilidade é a utilização de sistemas de informação geográfica em conjunto com os modelos de transporte. Abdel-Aty *et al.* (1997) combinaram os sistemas Maptitude e TRANPLAN para determinação de percursos. O sistema GIS gera as rotas baseadas em condições estáticas enquanto que os modelos de planeamento fornecem redes com base em condições dinâmicas (tempo de viagem e volume de tráfego).

As vantagens de integrar num ambiente GIS, o consumo de combustível, a emissão de poluentes e os modelos de dispersão com modelos de tráfego, foi também demonstrada através do projecto europeu SLAM (SAVE Programme) e (Ambrosino *et al.*, 1996).

3.8.12 Sistema baseados em conhecimento

Os sistemas baseados em conhecimento representam uma área da Inteligência Artificial que atingiu um nível significativo de aplicações em diversas áreas de engenharia e da indústria. Durante a última década esta tecnologia tem sido utilizada cada vez com mais frequência no tratamento de algumas questões relacionadas com os SIT (OECD, 1990) e (OECD, 1992), nomeadamente na monitorização e no controlo de tráfego, na avaliação do impacto de tráfego, no planeamento, na análise e na gestão de infra-estruturas.

Os sistemas baseados em conhecimento têm algumas características particulares que os distinguem das ferramentas computacionais convencionais:

- A conhecimento (informação) armazenado é de natureza declarativa sendo utilizado selectivamente pelo motor de inferência quando necessário;
- A natureza simbólica e declarativa do conhecimento manipulado, em conjunto com a capacidade de aquisição de conhecimento, permite o desenvolvimento de aplicações em níveis mais abstractos e conceptuais;
- A forma como o conhecimento e a informação estão estruturados, em conjunto com as capacidades do motor de inferência, torna as aplicações mais transparentes e interactivas, capazes de fornecer explicações ao utilizador sobre as conclusões atingidas pelo sistema;
- Os sistemas baseados em conhecimento conseguem lidar com informação incompleta, imprecisa ou incerta sobre o problema em questão podendo, mesmo assim, chegar a conclusões.

Os sistemas baseados em conhecimento implementam uma abordagem formal para a resolução do problema, caracterizada por uma tomada de decisão baseada em múltiplas heurísticas. O conhecimento humano e outros tipos de abstracção são formalizados em regras, procedimentos e heurísticas incluídos na base de conhecimento.

Aplicação à modelação de tráfego

Os sistemas baseados em conhecimento apoiam o utilizador do modelo de simulação na tarefa de preparar a simulação. Este apoio pode variar desde a aconselhamento na definição dos parâmetros até à tarefa mais complexa de apoiar a construção de cenários a simular. Por outro lado, os sistemas baseados em conhecimento podem ser utilizados na interpretação dos resultados da simulação e da enorme quantidade de informação que normalmente resulta dos modelos de tráfego. Combinando estes dois aspectos, as capacidades inerentes aos sistemas baseados em conhecimento ficam integradas no ambiente genérico de simulação ajudando o utilizador na manipulação do modelo de simulação.

As técnicas de modelação descritas representam apenas aquelas que são consideradas como as mais promissoras em relação à modelação de tráfego e à simulação microscópica (SAMRTEST, 2000). Como foi já referido, algumas destas técnicas fornecem alternativas aos procedimentos de modelação actualmente utilizados (simulação paralela de eventos discretos, lógica difusa e modelação qualitativa), enquanto que outras são mais adequadas para a implementação do ambiente em que a simulação se realiza (sistemas de informação geográfica, realidade virtual, sistemas baseados em conhecimento, computação paralela). Contudo, é possível, e muitas vezes necessário, combinar algumas das técnicas referidas para a construção de modelos de simulação de tráfego microscópicos.

3.9 Estado da arte de modelos de simulação de tráfego

Nesta secção, após uma revisão da bibliografia, dá-se uma panorâmica geral e sucinta sobre vários projectos de modelação e simulação de tráfego, já desenvolvidos ou em curso. Assim, apresentam-se alguns exemplos referindo genericamente as suas principais características e o seu funcionamento. Os exemplos descritos encontram-se classificados de acordo com os critérios estabelecidos na secção 3.2.3, para a classificação de modelos de simulação de tráfego.

3.9.1 Modelos de simulação macroscópicos

3.9.1.1 CORFLO

O CORFLO foi desenvolvido pela Federal Highway Administration (FHWA), USA, e encontra-se disponível ao público desde 1996 (McTrans, 1996). Trata-se de um simulador macroscópico para análise de tráfego em redes urbanas e auto-estradas. O CORFLO é um modelo de tráfego, que considera automóveis ligeiros, camiões e autocarros num ambiente integrado de vias urbanas e auto-estradas e é constituído por três submodelos distintos, o FREFLO, o NETFLO1 e o NETFLO2.

O FREFLO é um modelo macroscópico de simulação de tráfego em auto-estradas baseado nas equações da conservação de massa e da densidade de velocidade dinâmica. Este modelo foi desenvolvido utilizando a técnica computacional *cellular automata*. O FREFLO permite

simular alterações geométricas da rede de estradas, operações com autocarros, encerramentos de faixas e incidentes.

O NETFLO1 e o NETFLO2 permitem simular o fluxo de tráfego em vias urbanas com diferentes níveis de detalhe, no entanto, há pouca informação publicada sob o desenvolvimento e aplicação destes modelos (Skabardonis, 1997).

Cada submodelo do CORFLO pode ser simulado de forma independente ou de forma integrada. Como vantagens deste modelo podem apontar-se a modelação de extensas redes de tráfego, a existência de diferentes tipos de modelos de controlo de tráfego e a característica de ter um interface amigável. Como desvantagens indica-se o facto de não permitir a modelação dinâmica de sistemas de orientação de percursos.

3.9.1.2 ARTWORK

O ARTWORK é um simulador de artérias urbanas ([http#29](#)). Este modelo permite avaliar o desempenho dos sistemas de controlo de tráfego quando uma estrada é interrompida devido à sinalização de um cruzamento. O objectivo específico deste modelo consiste na simulação do fluxo do tráfego em ruas interrompidas, para obter uma série de medidas de desempenho do sistema, e, assim, validar o modelo lógico utilizando dados do “terreno”. Não existem, na bibliografia dados disponíveis sobre o desenvolvimento deste simulador.

3.9.1.3 FREQ

O FREQ é um modelo de simulação macroscópico e determinístico para fluxo de tráfego em auto-estradas ([http#59](#)). Este simulador permite calcular as capacidades dos engarrafamentos verificados no sistema real, e as capacidades das auto-estradas e dos ramais de acesso com base no “*Highway Capacity Manual*”. O FREQ adopta a teoria da “onda de choque” para modelar a diminuição súbita da capacidade da estrada causada por incidentes de tráfego. A natureza macroscópica e determinística do modelo simplifica significativamente a estimação de parâmetros (Yu, 1998).

3.9.2 Modelos de simulação mesoscópicos

3.9.2.1 DYNAMIT

O DynaMIT foi desenvolvido por Moshe Akiba no MIT, USA (<http#17>). É um simulador mesoscópico para gestão dinâmica de tráfego em tempo real que prevê alterações do fluxo de tráfego e de planeamento de viagens. O planeamento de viagens inclui o tratamento e a organização da informação proveniente dos centros de recolha de informação, permitindo aos viajantes a tomada de decisão no que respeita ao instante de partida, modo de viagem e percurso. Para garantir a credibilidade do sistema de informação, a viagem prevista pelo DynaMIT é consistente e considera as condições do tráfego actuais. Além disso, o DynaMIT prevê um planeamento óptimo com o objectivo de encontrar um percurso ideal para o condutor. O DynaMIT foi concebido para operar em tempo real, aceitar dados provenientes do sistema de monitorização, estimar e prever fluxos de tráfego. O sistema considera diferentes tipos de condutores e classifica o seu comportamento, prevendo os condicionamentos da rede actual de estradas e as condições de tráfego futuras. Com base nestas previsões, e nos resultados provenientes do sistema de controlo do tráfego, gera planos de viagem consistentes com as condições do tráfego previstas.

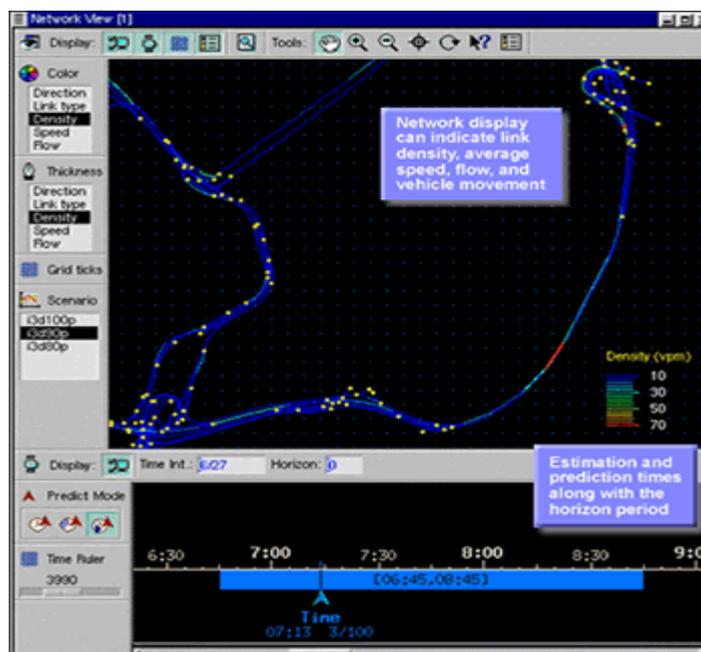


Figura 3.4 – Simulador DYNAMIT

3.9.2.2 DYNEMO

O DYNEMO é um simulador mesoscópico que efectua uma gestão dinâmica de tráfego com base nas condições do tráfego em tempo real (*e.g.*, a formação de filas nos cruzamentos e os congestionamentos em auto-estradas). Este simulador tem um interface gráfico com capacidades de animação, o que o torna uma ferramenta ideal para ilustrar o impacto das várias alternativas de escolha (http#18). A gestão dinâmica de tráfego no DYNEMO baseia-se em: semáforos cronometrados, localização de paragens, ramais de acesso e um sistema de informação ao viajante em tempo real. A sua capacidade para aceder a bases de dados de outros sistemas de informação, minimiza o tempo necessário para codificar manualmente esta informação e reduz a possibilidade de ocorrerem erros com a entrada manual de dados.

Sendo um modelo mesoscópico aplica a lógica dos modelos microscópico e macroscópico para controlar o comportamento dos veículos na rede de estradas. A componente macroscópica gere o comportamento do veículo nas ligações entre nós e a componente microscópica controla a interacção entre veículos nos nós (http#19).

3.9.2.3 DYNASMART

O DYNASMART (*Dynamic Network Assignment Simulation Model for Advanced Road Telematics*) foi projectado por Hani Mahmassani e seus colaboradores no centro de investigação e transportes, da Universidade do Texas (Mahmassani *et al.*, 1994). Este simulador é essencialmente uma ferramenta de análise descritiva, para a avaliação de estratégias de informação, medição e controlo do tráfego e para a análise das regras de trânsito ao nível da rede de estradas no âmbito dos sistemas SAIV e SAGT. O objectivo é estudar a eficiência de determinadas configurações da rede ao invés da definição de configurações óptimas (Jayakrishnan *et al.*, 1994). O DYNASMART permite avaliar estratégias para providenciar informação aos viajantes, prever padrões de fluxo de tráfego em função dos actuais e planear percursos óptimos para viagens com base nos tempos das viagens simuladas. O DYNASMART é um modelo mesoscópico que usa modelos de fluxo macroscópicos baseados no princípio da conservação de massa (eq. 3.1) e na equação da continuidade (eq. 3.3) e, simultaneamente, simula os movimentos de cada veículo através de um modelo microscópico. Podem ser especificadas diferentes classes tais como o tipo de veículo, a disponibilidade de informação e as restrições da rede de estradas. Estas classes permitem

modelar o comportamento do utilizador em resposta à informação do SAIV. O modelo pode ainda simular semáforos, ramais de acesso e incidentes. Este simulador foi usado para estudar a rede de estradas urbanas de Austin, no Texas, e de Anaheim, na Califórnia (<http#20>).

3.9.3 Modelos de simulação microscópicos

3.9.3.1 AIMSUN

O AIMSUN (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks*) (SMARTTEST Report, 2000) foi desenvolvido por J. Marcelo e J.L. Ferrer na Universidade Politécnica da Catalunha em Barcelona. É um ambiente de simulação composto por cinco módulos: o editor gráfico para a rede de estradas TEDI (*Traffic Network Graphical Editor*) (figura 3.5), o simulador microscópico de tráfego AIMSUN (figura 3.6), o interface gráfico AIMSUN3D, com animação para observação de cenários e dos resultados (figura 3.7), uma base de dados de entrada e um módulo para armazenamento dos resultados.

Esta ferramenta tem como objectivo a avaliação e teste de vários sistemas de controlo de tráfego fixos, variáveis ou adaptativos e de diferentes estratégias de gestão de tráfego. Um aspecto a salientar é o editor gráfico TEDI que permite desenhar alterações na rede de estradas e testar futuras alterações ao traçado existente.

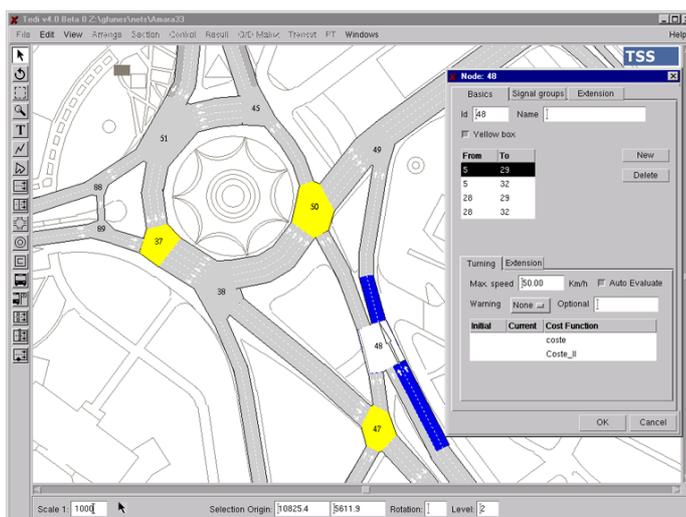


Figura 3.5 –Editor gráfico TEDI

Este simulador é capaz de reproduzir condições de tráfego reais considerando diferentes tipos de estradas, incluindo auto-estradas, estradas urbanas e rotundas. O comportamento de cada condutor é continuamente modelado de acordo com os modelos referidos na secção 3.5, nomeadamente, *car-following*, *lane changing* e *gap acceptance*. O AIMSUN considera diferentes tipos de veículos e condutores e tem a possibilidade de seleccionar vários percursos. Além disso, contempla a modelação do comportamento de peões e de transportes públicos, considerando neste caso os horários, a existência de uma faixa própria para a circular e a sua paragem em pontos específicos durante um determinado período de tempo (http#22). O AIMSUN inclui ainda, uma função de controlo e de gestão de tráfego, gerando resultados sobre fluxos, velocidades, tempos de viagem, consumos de combustíveis e níveis de poluição, que são armazenados e podem ser visualizados graficamente sob a forma animada. Estes resultados são a base das listagens estatísticas

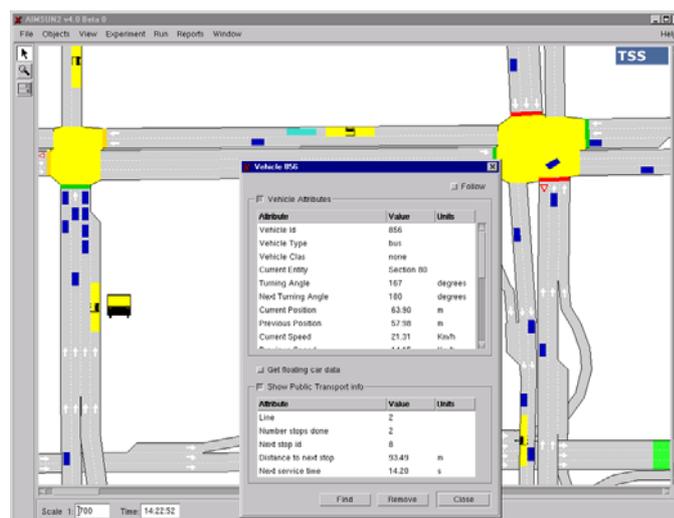


Figura 3.6 – Simulador AIMSUN

O AIMSUN começou como um projecto de investigação, mas actualmente é um produto comercial. Segundo (Ibid, 1987) este simulador tem as vantagens de considerar diferentes redes de tráfego e tipos de modelos para o controlo de tráfego, além de ter uma interface amigável e produzir resultados estatísticos detalhados. Este autor aponta como principal desvantagem o facto considerar sistemas de orientação de percursos com informação proveniente de um sistema externo.

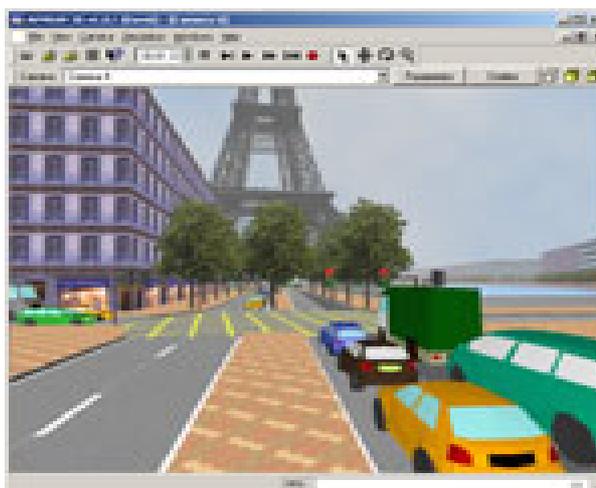


Figura 3.7 – Interface gráfico AIMSUM 3D

3.9.3.2 CARSIM

O CARSIM (*CAR-following SIMulation model*) é um modelo de natureza microscópica usado para o estudo do fluxo de tráfego urbano e em auto-estradas (http#25) em condições normais e em situações de “pára-arranca”. O CARSIM permite simular o comportamento dinâmico de vários tipos de veículos, nomeadamente de transporte de passageiros, de camiões, de ligeiros e de carros de corrida. A modelação do comportamento do condutor é realizada de acordo com o modelo *car-following* tomando em consideração a natureza dual do fluxo de tráfego, *i.e.*, em situações normais e de congestionamento.

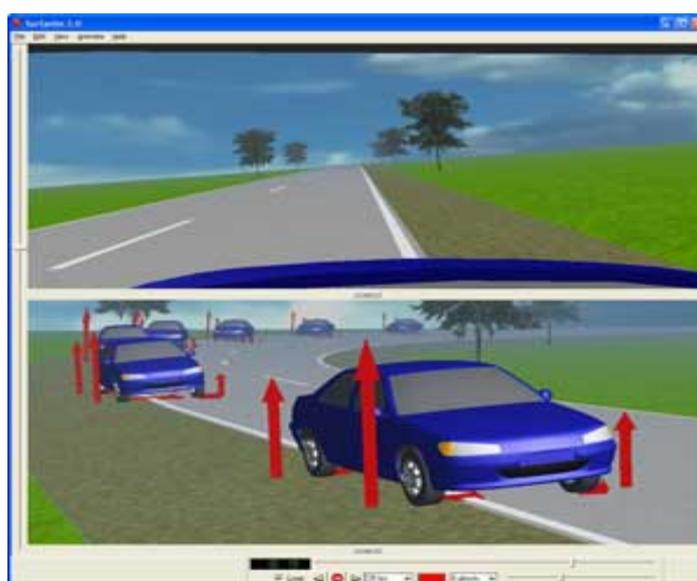


Figura 3.8 – CARSIM (http#25)

3.9.3.3 INTRAS

O modelo da simulação de tráfego denominado INTRAS, foi desenvolvido pela KLD Associates. O INTRAS é um modelo de simulação microscópico, estocástico, com a capacidade de contar o número total de mudanças de faixa. O comportamento de veículos é modelado utilizando algoritmos do tipo *car-following* e *lane changing* altamente detalhados para simular o fluxo de tráfego em auto-estradas da forma mais realista possível. Este simulador foi melhorado pela Federal Highway Administration (FHWA), USA, e está agora disponível ao público como FRESIM (*FREeway SIMulator*) ([http#32](#)).

3.9.3.4 FRESIM

O FRESIM (*FREeway SIMulator*) foi desenvolvido em 1996 pela Federal Highway Administration (FHWA) (McTrans, 1996), USA. Trata-se de um modelo de simulação microscópico para o estudo do fluxo de tráfego em auto-estradas ([http#32](#)). O modelo FRESIM é uma revisão melhorada do modelo INTRAS que inclui algumas evoluções em relação à geometria da rede de estradas e à modelação do comportamento do condutor a partir dos algoritmos de *car-following* e *lane changing*. O FRESIM pode simular as redes de estradas que incluem 1 a 5 faixas directas, 1 a 3 ramais de acesso, curvas, incidentes, zonas de trabalho e faixas auxiliares. As características operacionais incluem a mudança de faixa, existência de ramais de acesso, incidentes e diferentes tipos de veículos e de condutores. O comportamento de cada veículo é representado pela interacção com o seu ambiente circundante, onde se inclui a geometria da auto-estrada e os demais veículos.

3.9.3.5 NETSIM

O NETSIM é um modelo de simulação microscópico que permite a avaliação de alterações introduzidas na rede de estradas. O NETSIM pode avaliar os efeitos de conversão de uma rua de dois sentidos para uma com um só sentido, adicionar faixas ou zonas de inversão de marcha, alterar a posição de uma paragem de autocarro ou instalar um novo sinal ([http#26](#)). O objectivo é avaliar o efeito dos sistemas de controlo de tráfego e das estratégias utilizadas pelos sistemas de gestão de tráfego sobre o nível de desempenho operacional do sistema. Os resultados da simulação do NETSIM incluem os atrasos para cada um dos veículos, a sua

velocidade média, o comprimento das filas de trânsito, a informação sobre a origem e o destino do percurso do veículo e os percursos dos autocarros públicos, entre outros([http#30](#)).

3.9.3.6 CORSIM

O CORSIM foi desenvolvido pela Federal Highway Administration (FHWA) ([http#29](#)), USA, e é uma ferramenta de simulação microscópica, estocástica que combina o modelo de simulação de tráfego urbano NETSIM com o modelo de simulação de tráfego em auto-estradas FRESIM ([http#28](#)). Como em todos os modelos de natureza microscópica, cada veículo é modelado como se fosse uma entidade individual na rede de estradas. O comportamento de cada um é representado no modelo considerando a interação com o ambiente circundante, incluindo o controlo de tráfego e a geometria de estrada. O CORSIM também modela alguns sistemas de controlo de tráfego activos, que têm influência no comportamento dos veículos como sinalização de cruzamentos e controladores dos ramais de acesso (Clark e Daigle, 1997). A modelação do comportamento do condutor é feita segundo a lógica dos algoritmos *car-following* e *lane changing* simulando os movimentos dos veículos a cada instante. O CORSIM é actualmente um produto comercial.

3.9.3.7 DRACULA

O DRACULA foi desenvolvido no Instituto para Estudos dos Transportes, na universidade de Leeds, UK, ([http#26](#)). É um simulador para gestão de tráfego em vias urbanas. A principal diferença em relação às abordagens convencionais da maior parte dos simuladores microscópicos, é que este simulador considera ambientes de tráfego altamente variáveis através da modelação das alterações quotidianas das condições de tráfego como um processo estocástico e discreto no tempo. Os condutores reagem a situações de congestionamento através de um sub-modelo de aprendizagem, com percursos e tempos de partida diários. Existe também um sub-modelo que representa a variabilidade quotidiana das capacidades da rede (por exemplo devido aos acidentes). Além disso, é também usado um sub-modelo de tráfego para o deslocamento dos veículos através da rede. Neste simulador é possível representar as escolhas e as experiências de cada condutor e o movimento individual dos veículos através da rede de estradas.

3.9.3.8 FLEXYT II

O FLEXYT-II (sucessor do FLEXYT-I) foi desenvolvido no centro de investigação do transporte nos Países Baixos em 1994 (McTrans, 1996). Este programa é uma ferramenta de simulação microscópica baseada em eventos, para estudar os sistemas de gestão de tráfego. Este simulador usa um modelo estocástico, no qual os veículos se movem através da rede de estradas interagindo com a própria rede. O FLEXYT-II usa uma linguagem especial de controlo do tráfego chamada FLEXCOL-76, que se baseia nas regras da álgebra booleana.

A nível de resultados surgem tabelas que contêm os atrasos dos veículos, os comprimentos das filas, os indicadores do estado de rede e alguns aspectos ambientais como o consumo de combustível e a emissão de gases tóxicos. Com o FLEXYT-II é possível efectuar análises sobre o impacto de diversas estratégias de gestão dinâmica do tráfego, incluindo os ajustes dos sinais de tráfego, o controlo dos ramais de acesso e as alterações na estrutura da rede de estradas. No que respeita às alterações na estrutura da rede de estradas pode-se incluir a disposição dos cruzamentos, o comprimento das estrada, o número de faixas de rodagem e o efeito da existência de faixas específicas para os determinados tipos de utilizadores. Como vantagem pode apontar-se o facto de modelar explicitamente as auto-estradas e os cruzamentos e como desvantagem o seu interface gráfico limitado.

3.9.3.9 FREEVU

O FREEVU (*Freeway Evaluation with Visual Understanding*) foi desenvolvido por Ruce Helling e o John Shortreed na universidade de Waterloo, Ontário, Canadá (<http#23>). Trata-se de uma extensão do INTRAS, adaptado para o projecto e análise de auto-estradas. Permite ao utilizador especificar uma secção da auto-estrada incluindo faixas, saídas e entradas, limites de velocidade pré-definidos, e posições de sensores. O movimento dos veículos é modelado segundo o algoritmo clássico de aceleração *car-following* com restrições para evitar colisões. No entanto também inclui algoritmos do tipo *lane changing* para o comportamento do condutor e algumas restrições de desempenho dos veículos.

3.9.3.10 HUTSIM

O HUTSIM foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia dos Transportes na Universidade Técnica de Helsínquia, Finlândia em 1989 ([http#31](#)). Trata-se de uma ferramenta de microsimulação especialmente desenvolvida para a simulação de sinais de tráfego, podendo ser ligado directamente a controladores reais de sinalização, tornando, por isso, possível testar e avaliar estratégias de controlo de sinalização. Isto significa que apenas o fluxo de tráfego e os cruzamentos são simulados, a informação sobre sinalização provém do sistema real. Recentemente o âmbito do HUTSIM foi alargado para simular o tráfego urbano em geral ([http#31](#)). Como vantagens pode referir-se o facto de ser uma ferramenta de simulação flexível e versátil, onde pode ser simulada qualquer estratégia de controlo. Como desvantagem aponta-se a sua limitação para simular redes de estradas de dimensões elevadas, devido ao elevado nível de detalhe exigido por este simulador, para a descrição da rede de estradas.

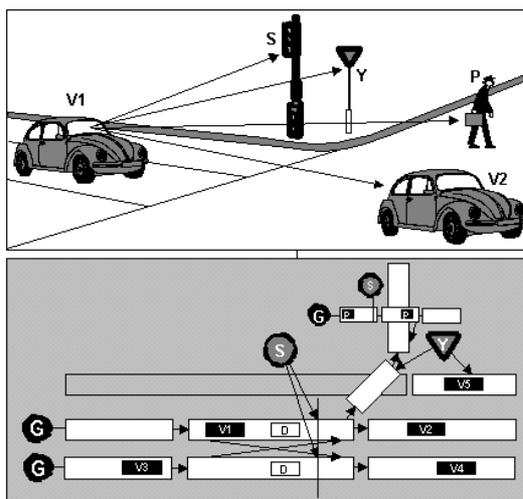


Figura 3.9 - Simulador HUTSIM

3.9.3.11 INTEGRATION

O projecto INTEGRATION foi desenvolvido nos anos oitenta por Michel Aerde, na Universidade Queen, Canadá, encontrando-se actualmente disponível ao público (Aerde, 1999). Trata-se de um modelo integrado de simulação e de previsão de tráfego. No âmbito dos SIT constituiu o primeiro modelo de simulação a considerar informação sobre o percurso dos veículos (Van Aerde, 1985). O INTEGRATION permite simular os movimentos laterais e

longitudinais de cada veículo com a definição de um décimo de segundo. O comportamento do condutor é modelado segundo um algoritmo do tipo *car-following*. Também foi desenvolvido um algoritmo de *gap acceptance* para modelar as paragens e as curvas à esquerda dos veículos na presença de sinalização que a isso os obrigue. O INTEGRATION permite a variação contínua da densidade de tráfego ao longo de uma estrada para demonstrar a dispersão de uma fila de veículos. Este simulador considera a taxa de eficiência de sistemas de orientação de percurso, o impacto dos ramais de acesso, o efeito das estratégias de controlo de sinalização, e a existência de incidentes (Algers *et al.*, 2001).

3.9.3.12 MELROSE

O MELROSE (*Mitsubishi ELectric ROad traffic Simulation Environment*) foi desenvolvido por Yukio Goto da empresa Mitsubishi Eléctrico Corporation, em 1993, não se encontrando ainda disponível ao público ([http#23](#)). Trata-se de um simulador microscópico desenvolvido com o objectivo de avaliar o desempenho global de sistemas de gestão de tráfego e permite simular o fluxo de tráfego em zonas urbanas e auto-estradas. O processo de simulação é discreto no tempo e realizado sobre cada veículo utilizando o seu modelo de movimento. O comportamento do condutor foi modelado segundo os algoritmos *car-following* e *lane changing*. Os resultados são fornecidos sob a forma de dados estatísticos onde se incluem para cada veículo, o tempo do percurso, a velocidade média e os atrasos médios, entre outros.

3.9.3.13 MICROSIM

O MICROSIM foi desenvolvido por Kai Nagel, Michael Schreckenberg e Marcus Rickert na Universidade de Cologne na Alemanha ([http#30](#)). O MICROSIM tem como objectivo a simulação rápida de cenários do sistema de tráfego. Os modelos deste simulador foram implementados usando a técnica *cellular automata*. Este simulador permite modelar detalhes da rede de estradas tais como, cruzamentos com semáforos e cruzamentos com sinais de stop ou de cedência de prioridade. Também inclui planos de percursos, velocidades máximas, aceleração dos veículos e variações máximas de velocidade e aceleração. Este modelo foi desenvolvido com a finalidade de avaliar as estimativas de tempo de viagem de determinados percursos e avaliar a resposta da rede ao aumento de volume de tráfego.

3.9.3.14 PARAMICS

O PARAMICS é um simulador microscópico que começou por ser desenvolvido no centro computacional de Edimburgo na Scotland, UK ([http#34](#)), tendo posteriormente sido melhorado tornado num produto comercial desde 1996, pela Quadastone, lda. ([http#37](#)). Actualmente o PARAMICS é constituído por um conjunto de cinco módulos; o *Modeller* (que é o núcleo do simulador), o *Processor* (para configurar a simulação), o *Analysar* (para análise e visualização dos resultados da simulação), o *Programmer* (que é a plataforma de parametrização) e o *Monitor* (cuja finalidade é calcular os níveis de poluição na estrada).

Esta ferramenta permite efectuar a simulação de redes de tráfego congestionadas, sendo os veículos modelados individualmente com um elevado nível de detalhe de forma a permitir obter uma boa precisão sobre o fluxo de tráfego e os congestionamentos. Cada veículo é caracterizado por um conjunto de atributos, tais como comprimento, aceleração, velocidade máxima e o seu percurso. São considerados dois tipos de condutor: agressivo e passivo. O comportamento do condutor é modelado de acordo um modelo sofisticado que tem por base os algoritmos *car-following* e *lane changing*, onde são consideradas estradas com um número máximo de 32 faixas de largura. Este simulador permite avaliar uma grande variedade de cenários distintos onde podem ser considerados, estradas urbanas, auto-estradas, ramais de acesso, cruzamentos com semáforos, rotundas e painéis de mensagens variáveis, entre outros.

Dada a diversidade de cenários que permite avaliar através da simulação, as áreas potenciais de aplicação do PARAMICS incluem a avaliação de políticas e estratégias de planeamento, gestão e controlo de tráfego, a avaliação de estratégias de fornecimento de informação aos viajantes, a modelação de congestionamentos e acidentes e outras áreas onde seja necessária a utilização de uma ferramenta de planeamento rápida, reactiva e proactiva. O PARAMICS foi usado na simulação da gestão de tráfego e de sistemas de controlo em várias regiões dos USA.

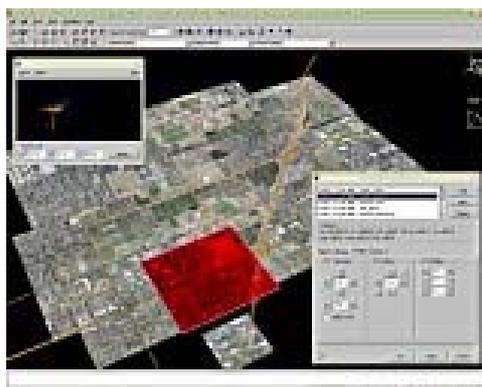


Figura 3.10 – Simulador PARAMICS

3.9.3.15 MITSIM

O MITSIM (*Microscopic Traffic SIMulator*), foi desenvolvido no MIT, USA, com o objectivo de avaliar sistemas dinâmicos de gestão de tráfego, nomeadamente o controlo dinâmico de tráfego, a gestão de incidentes e o controlo da sinalização, entre outros (Yang e Koutsopoulos, 1996). No MITSIM é possível simular os movimentos de cada veículo, o estado do controlo de tráfego e dos dispositivos de orientação, as reacções dos condutores à orientação dada por esses dispositivos e o sistema de monitorização de tráfego. Assim, os elementos deste simulador podem ser enquadrados em três grupos, componentes da rede de estradas, necessidade de viagens e selecção de percursos e ainda comportamento de condução. Nos componentes da rede de estradas inclui-se a geometria da rede, veículos e dispositivos de monitorização e controlo de tráfego. A necessidade de viagens é simulada através de matrizes origem-destino, os condutores seleccionam os seus percursos com base nos dados históricos (experiência anterior) ou em informação actual em tempo real sobre as condições da rede. Neste último caso é utilizado um modelo probabilístico de selecção de rotas. Para o comportamento de condução foram utilizados, um modelo de aceleração do tipo *free-flow* como se refere na secção 3.5.2 e um modelo de mudança de faixa *lane changing* como se pode ver na secção 3.5.3.

O MITSIM foi originalmente desenvolvido como um sistema de teste para avaliação de estratégias de gestão do tráfego, por isso dotado das seguintes características:

- fornece os dados dos sensores em tempo real, o que permite simular as capacidades de monitorização dos sistemas de gestão do tráfego;

- aceita informação dos sistemas de controlo de tráfego e dos percursos planeados para actualizar o estado da rede simulada;
- calcula um conjunto de medidas de eficiência que representa o desempenho dos sistemas sob avaliação.

3.9.3.16 SITRAS

Este simulador foi desenvolvido por Peter Hidas na Universidade Nova de Gales do Sul, na Austrália, no âmbito de um projecto de investigação. (Hidas, P. and K. Behbahanzadeh, 1999). O objectivo do SITRAS é simular os detalhes do fluxo de tráfego em redes de estradas urbanas considerando as situações de congestionamento, para permitir a análise e a avaliação de vários sistemas de gestão de tráfego, nomeadamente, sistemas de gestão de congestionamentos e acidentes e sistemas de orientação de percursos. O componente principal do modelo é a progressão do veículo, cuja modelação foi efectuada com base nos algoritmos *car-following* e *lane changing*. O SITRAS caracteriza-se pela capacidade de simular os movimentos dos veículos através de cruzamentos e entre percursos definidos por pontos específicos origem e destino. Os resultados traduzem-se em medidas de eficiência sobre a extensão da rede de estradas, o tipo de ligações entre estradas e os percursos realizados. Estas medidas de eficiência são utilizadas para a avaliação de alternativas de sistemas de gestão de tráfego.

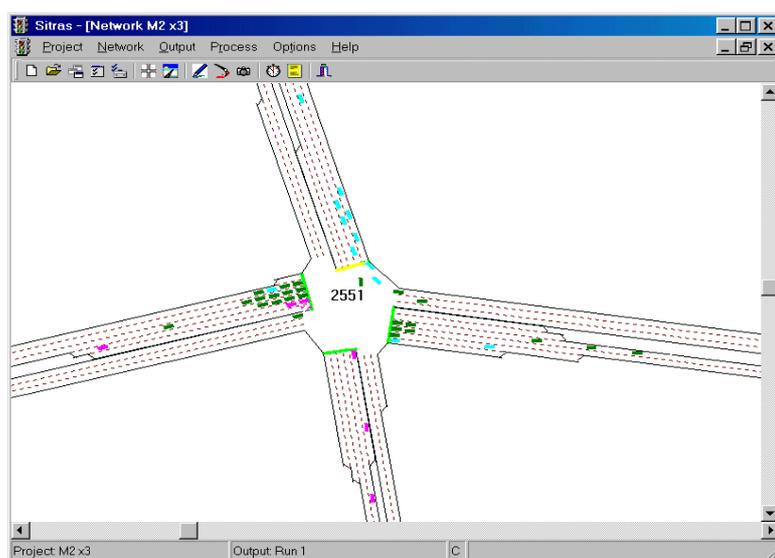


Figura 3.11 – Simulador SITRAS

3.9.3.17 StreetSIM

O StreetSIM é um modelo de simulação microscópico baseado em comportamentos e intervalos temporais. Foi desenvolvido com o objectivo de modelar todas as operações relacionadas com tráfego urbano. Este simulador permite analisar o fluxo de tráfego urbano sujeito a determinadas restrições, tais como configuração da rede de estradas, composição do fluxo de tráfego e sinalização de tráfego. Por isso é uma ferramenta muito útil para análise e avaliação de cenários alternativos com base em medidas de eficiência relacionadas com a engenharia e o planeamento de transportes ([http#28](#)).

Em termos de resultados, podem observar-se no monitor algumas características do fluxo de tráfego, nomeadamente, a configuração da rede de estradas, os movimentos dos veículos, as operações dos sinais de tráfego, a informação dos sensores presentes na rede de estradas, e ainda um resumo dos tempos de viagem para cada veículo. Além disso, é ainda gerado um conjunto de ficheiros com informação detalhada sobre, estatísticas de tempos de viagem, estatísticas de atrasos e de comprimentos de filas, temporização da sinalização de trânsito e indicadores ambientais, entre outros.

3.9.3.18 TRANSIMS

O TRANSIMS (*Transportation Analysis and SIMulation System*) foi desenvolvido no Laboratório Nacional “Los Alamos”, Novo México ([http#36](#)). É um sistema integrado de modelos de planeamento de percursos, desenvolvido com o objectivo de fornecer aos projectistas de redes de transporte uma informação completa e precisa sobre os impactos do volume de tráfego, congestionamentos e poluição, entre outros.

Os modelos do TRANSIMS criam uma região metropolitana virtual com uma representação completa dos indivíduos da região, as suas actividades e as infra-estruturas de transporte. As viagens são planeadas para satisfazer os padrões das actividades dos indivíduos. As interacções entre veículos produzem uma dinâmica de tráfego realista a partir da qual os analistas podem calcular as emissões de gases dos veículos e caracterizar o desempenho global do sistema de transporte. Os comportamentos dos condutores são modelados de acordo com os modelos *car-following* e *lane changing* e implementados utilizando a técnica computacional *cellular automata*.

O TRANSIMS tenta simular todas as interacções importantes entre os vários subsistemas de viagem, tais como a viagem planeada por um indivíduo e o congestionamento do sistema de transporte. O TRANSIMS também simula a actividade de cada um dos viajantes, ou seja, a sua localização, percurso, modos de viagem e a forma como é executado o seu plano de viagem. Assim, é possível avaliar as alternativas de transporte e a sua fiabilidade, com vista à determinação dos benefícios e prejuízos para cada um dos indivíduos provocados por alterações no sistema de transporte (por exemplo a nível de infra-estruturas ou de política de transportes).

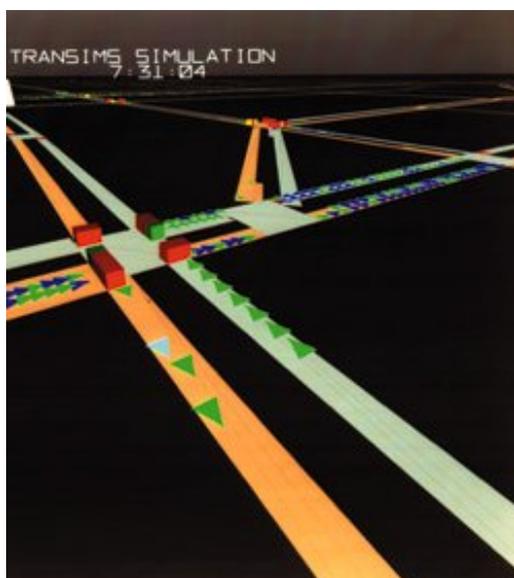


Figura 3.12 – Simulador TRANSIMS

3.10 Conclusão

Neste capítulo fez-se uma apresentação da modelação e simulação, como técnica para a criação de ferramentas que permitam a análise de modelos de estradas, veículos e seres humanos e a suas interacções num contexto de tráfego rodoviário.

Procedeu-se à classificação dos modelos de simulação de tráfego, com particular ênfase nos modelos microscópicos, dos quais se detalharam os modelos mais importantes, nomeadamente, o *car-following*, o *free-flow* e o *lane changing*. Foram apontadas algumas limitações genéricas relativas aos modelos de simulação microscópicos, e algumas limitações particulares

relativas aos modelos utilizados no processo de modelação do comportamento do condutor pela maior parte dos simuladores de tráfego microscópicos desenvolvidos até ao momento.

Apresentaram-se algumas das técnicas computacionais mais utilizadas no processo de modelação e simulação microscópica de tráfego. Por fim, fez-se uma revisão bibliográfica no que respeita aos modelos de simulação de tráfego mais representativos desenvolvidos até ao momento, com maior incidência nos simuladores microscópicos por se enquadrarem no âmbito deste trabalho.

Capítulo 4

Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte

Após uma revisão da bibliografia no que diz respeito às ferramentas de simulação microscópicas desenvolvidas, aos modelos utilizados e às técnicas computacionais disponíveis, procede-se ao desenvolvimento de um simulador de tráfego que utiliza uma nova técnica de modelação com o objectivo de ultrapassar algumas das limitações dos simuladores existentes. Neste capítulo descreve-se em pormenor o referido simulador, os modelos de condução, o sistema de controlo de tráfego e o *interface* gráfico desenvolvidos, assim como e os diferentes tipos de dados resultantes da simulação. Por último apresenta-se o estudo realizado para calibração e análise de sensibilidade do modelo.

4.1 Introdução

A simulação é o processo de projectar um modelo de um determinado sistema e com ele realizar experiências que conduzam à compreensão do comportamento do sistema ou à avaliação de estratégias para a sua operação. O processo de simulação pretende lidar com o sistema real, quando na realidade se está a trabalhar com uma imitação deste.

Através da simulação é possível analisar a capacidade e o comportamento de um sistema sem que as experiências levadas a cabo interfiram no funcionamento do sistema real. A simulação é um processo menos perigoso, mais barato e sem qualquer consequência directa para o sistema real. No entanto, existem algumas limitações neste processo. A primeira dificuldade é a criação de um modelo que represente com precisão e exactidão o sistema real. Um sistema real é geralmente complexo, havendo, por isso a necessidade de determinar quais são as características mais importantes para integrar no modelo, o que significa que algumas outras

características podem ser ignoradas ou agregadas a outras variáveis. Esta característica leva a que algumas imprecisões sejam introduzidas no modelo e, assim, os resultados não sejam eventualmente os mais correctos. Outra questão tem a ver com a falta de dados disponíveis para efectuar a simulação.

As duas limitações referidas levam a que muitas vezes os resultados da simulação sejam aproximados e o comportamento do sistema só possa ser representado de forma global. Por estes motivos, a simulação fornece resultados aproximados do sistema em geral, ao invés de resultados exactos sobre entidades ou situações específicas.

O processo de simulação pode ser contínuo ou discreto, dependendo da forma como as variáveis de estado se alteram ao longo do tempo. Na simulação por eventos discretos as variáveis de estado alteram-se no instantes de tempo definidos pela amostragem. Na simulação contínua as variáveis vão sofrendo alterações continuamente ao longo do tempo, de acordo com uma função que inclui o tempo como variável. Na realidade a maior parte dos processos de simulação utilizam variáveis de estado de ambos os tipos, discreto e contínuo, mas normalmente um dos tipos é predominante e por isso dá origem a uma das duas classificações referidas.

Os sistemas de tráfego podem ser classificados como sistemas de eventos discretos (*Discrete Event Systems* - DES), que se caracterizam por serem dinâmicos e complexos, evoluindo ao longo do tempo através da ocorrência de eventos em intervalos de tempo irregulares. No entanto, ao mesmo tempo têm uma componente contínua como, por exemplo, a geometria da rede de estradas, o fluxo de tráfego ou a velocidade cruzeiro a que os veículos se deslocam. De qualquer forma prevalece o facto de serem sistemas discretos e, por isso o processo de simulação de um sistema deste tipo pode ser classificado como discreto. Assim, um sistema de tráfego pode ser modelado em termos entidades no sistema e eventos discretos cuja ocorrência provoca a alteração do estado do sistema.

4.2 Fases de desenvolvimento do simulador SITS

O desenvolvimento de uma ferramenta de simulação envolve várias fases distintas, nomeadamente a implementação, a validação, a operação e a análise dos resultados da

simulação, entre outras (http#60), como se pode observar na figura 4.1. O desenvolvimento do SITS foi efectuada de acordo com esta lógica.

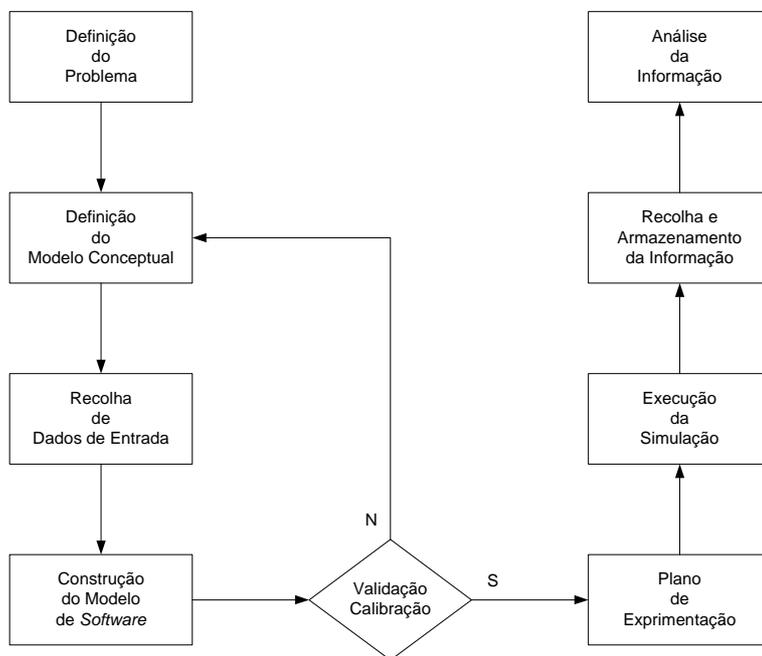


Figura 4.1 - Processo de modelação e simulação

A seguir descrevem-se sucintamente as várias fases de desenvolvimento do SITS

4.2.1 Definição do problema

O primeiro passo é a definição explícita do problema a tratar. Neste caso têm-se a análise dinâmica de um sistema de tráfego em auto-estrada considerando diferentes geometrias de estradas e diferentes tipos de condutores e de veículos. Para tal é necessário identificar e delimitar o sistema a tratar, assim como estimar os parâmetros caracterizadores do sistema e os parâmetros de saída que permitam realizar a análise em questão.

O sistema abordado consiste num sistema de tráfego, para o qual se identificou um conjunto de parâmetros que caracterizam os diferentes elementos que definem o sistema, nomeadamente o comprimento da estrada, o número de faixas de rodagem, a velocidade de um veículo num determinado instante num dado ponto de uma faixa, o fluxo de tráfego num determinado instante num dado ponto de uma faixa, a velocidade média e a máxima variação de velocidade.

4.2.2 Definição conceptual do modelo

Nesta fase procede-se à transcrição do sistema a analisar para a sua representação matemática e/ou lógica. Trata-se da fase de modelação, onde é necessário seleccionar as características principais do sistema de tráfego, criar as funções matemáticas ou algoritmos que as possam descrever, definir os dados de entrada necessários e os resultados pretendidos. Nesta fase deve-se identificar qualquer pressuposto que se assuma e os respectivos efeitos na precisão dos resultados a obter de simulação. Assim, todas as limitações do modelo criado devem ser convenientemente identificadas.

4.2.3 Recolha de dados de entrada

Os dados necessários para que a simulação a efectuar, com o modelo estabelecido na fase anterior produza os resultados desejados, têm que ser determinados e recolhidos. Aqui inclui-se toda a informação que diga respeito aos parâmetros de entrada e ao desenvolvimento de algoritmos que se utilizará na avaliação do desempenho das simulações a realizar. Neste último caso incluem-se os dados de comportamentos conhecidos do sistema e a informação sobre a distribuição estatística das variáveis aleatórias a utilizar.

A recolha de dados precisos é uma das fases mais difíceis no processo de simulação e aquela que está mais sujeita a erros.

4.2.4 Construção do modelo de *software*

O modelo conceptual representa a descrição do sistema real em termos matemáticos e lógicos. É com base neste modelo, e nos dados recolhidos, que se constrói o modelo de simulação. Nesta fase procede-se à codificação do modelo conceptual utilizando uma das técnicas computacionais referidas na secção 3.8. No caso do SITS foi desenvolvida uma nova técnica computacional designada por modelação orientada ao objecto (*State Oriented Modelling* - SOM), cuja descrição detalhada se encontra na secção 4.4.

4.2.5 Validação e calibração do modelo

O modelo de simulação é o resultado da codificação de conceitos, cuja completa e exaustiva definição é difícil de efectuar. Por isso, podem introduzir-se facilmente imprecisões no modelo, ou criar um modelo que resolva um problema diferente do que foi especificado. Assim, o processo de verificação e calibração é essencial para assegurar que o modelo implementado, os dados de entrada e os pressupostos assumidos são os mais adequados para a resolução do problema identificado na primeira fase.

O objectivo da validação e da calibração é verificar e ajustar o modelo para que este represente o mais fielmente possível o sistema real, através da preparação dos dados de entrada e dos parâmetros do modelo, de forma a que os resultados obtidos na simulação sejam coerentes com os dados obtidos do mundo real. Trata-se de garantir que o modelo conceptual reflecte os aspectos do problema que precisam de ser tratados e a forma mais adequada de os tratar para que se cumpram os requisitos do estudo em questão. Assim, é necessário calibrar o modelo para que os resultados da simulação sejam fidedignos e possam permitir tomar decisões adequadas para a gestão de tráfego. O processo de calibração do simulador SITS encontra-se descrito na secção 4.9.

4.2.6 Plano experimentações/experiências

Nesta fase identificam-se os métodos mais produtivos e precisos, para efectuar as simulações de forma a gerar as respostas desejadas. As técnicas estatísticas podem ser utilizadas para estabelecer o plano de experimentações que produz os resultados mais precisos no menor número possível de simulações. Este aspecto será alvo de uma descrição mais pormenorizada no capítulo 5.

4.2.7 Execução da simulação

É nesta fase que se procede à execução do modelo concebido, implementado e validado de acordo com o plano de experimentações estabelecido. As simulações efectuadas permitem obter um conjunto de resultados que constituem a resposta ao problema inicialmente proposto.

4.2.8 Recolha e armazenamento da informação

Durante o processo de simulação, enquanto se executa o modelo também se recolhe, organiza e armazena a informação resultante. Muitas vezes este processo é visto como uma parte integrante do modelo, mas deve ser considerado separadamente, uma vez que é possível alterar a informação sem alterar o modelo conceptual ou até a sua implementação.

4.2.9 Análise da informação

A informação recolhida e armazenada durante o processo de simulação é distribuída no tempo e pode atingir volumes significativos. É necessário executar algumas análises detalhadas para se conseguirem extrair conclusões e quantificar respostas às questões principais que motivaram o desenvolvimento do simulador. Esta análise pode produzir resultados sob formas diversas, nomeadamente, gráfica, tabular, em mapas, animada ou simplesmente em texto. Os *interfaces* utilizados pelo simulador têm um papel fundamental no que respeita à apresentação da referida informação e sua compreensão por parte do utilizador.

4.3 Arquitectura global do SITS

O Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte (*Simulator of Intelligent Transportation Systems* - SITS) é um simulador de tráfego do tipo microscópico que permite simular condições de tráfego reais em meios urbanos e em auto-estradas. Este simulador descreve com detalhe um sistema de tráfego considerando diferentes geometrias de estradas e tipos distintos de condutores e de veículos. Dispõe de três modelos de condução, seguidor de veículo (*Car-Following*), fluxo livre (*Free Flow*) e mudança de faixa de rodagem (*Lane-Change Logic*), que serão objecto de uma descrição mais detalhada no decorrer deste capítulo. O simulador SITS foi desenvolvido segundo uma estrutura de programação orientada ao objecto tendo sido implementado utilizando a linguagem de programação C++. O SITS tem uma estrutura flexível que permite a integração de modelos de simulação relativos a qualquer uma das áreas de SIT referidas no capítulo 2, nomeadamente nas áreas de SAGT e SAIV.

O SITS permite analisar o comportamento dos veículos considerando diferentes geometrias de estradas incluindo cruzamentos, bifurcações e ramais de acesso a auto-estradas. O controlo de tráfego poderá ser simulado utilizando semáforos, sistemas de controlo de ramais de acesso e painéis electrónicos com informação de trânsito (*e.g.*, velocidade máxima permitida).

O modelo de simulação adoptado no SITS é do tipo estocástico. Em alguns dos processos os valores atribuídos a determinadas variáveis são aleatórios como, por exemplo, a velocidade atribuída a cada veículo ou o fluxo de tráfego de uma determinada estrada. Estes valores são gerados aleatoriamente de acordo com um intervalo previamente estabelecido.

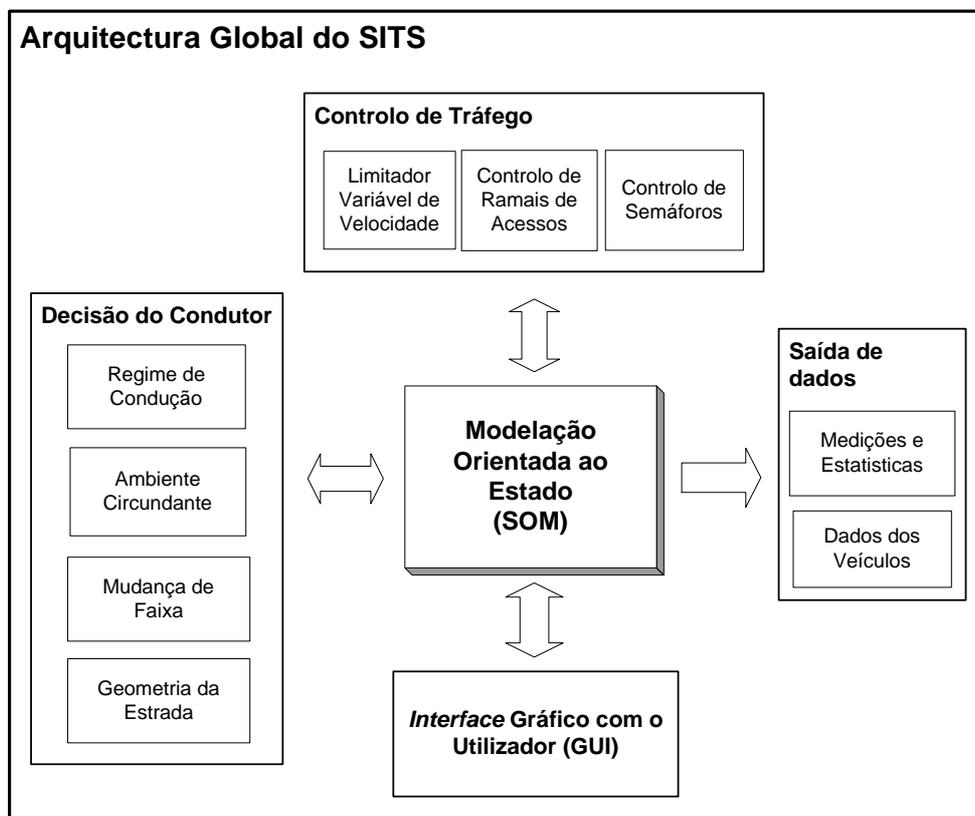


Figura 4.2 – Arquitectura global do SITS

Na figura 4.2 está representada a arquitectura do SITS com uma perspectiva global da interligação entre os seus principais módulos. O módulo nuclear modelação orientada ao estado (*State-Oriented Modelling* - SOM) interage com os módulos Controlo de Tráfego e Decisão do Condutor, existe também um módulo que permite fazer a interacção entre o utilizador e o SITS. O SITS é capaz de gerar uma diversidade de dados de simulação que são a fonte de informação para a análise dinâmica de tráfego descrita no capítulo 5.

A seguir faz-se uma descrição detalhada de cada um dos módulos do SITS.

4.4 Modelação orientada ao estado

O SITS utiliza uma nova técnica computacional de modelação designada por modelação orientada ao estado (*State-Oriented Modelling* - SOM)(Figueiredo *et al.*, 2003 b)). Nesta estrutura cada veículo é modelado como uma entidade autónoma de acordo com o diagrama de estados descrito no figura 4.3.

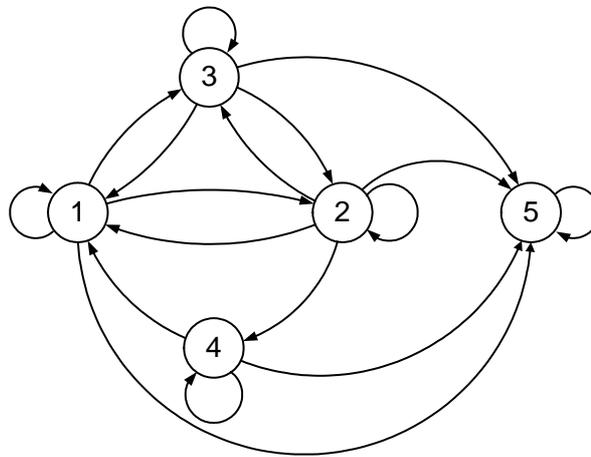


Figura 4.3 – Diagrama de estados do SOM

Para representar um veículo num sistema de tráfego foram definidos cinco estados estáveis:

- 1 – aceleração
- 2 – travagem
- 3 - velocidade de cruzeiro
- 4 – parado
- 5 - colisão

Para cada intervalo de simulação cada veículo só pode ter um estado atribuído. A transição entre estados depende do modelo de condução e do meio que rodeia o veículo, nomeadamente, a proximidade de outros veículos, ou a existência de semáforos ou de sinais

de trânsito. Conforme se pode observar no diagrama de estados da figura 4.3, existem algumas transições impossíveis de efectuar. Por exemplo, num sistema de tráfego não é possível transitar do estado #4 (parado) para o estado #2 (travagem), mas é possível transitar do estado #2 (travagem) para o estado #4 (parado).

Os elementos mais importantes do SITS são os componentes que compõem a rede de estradas, a definição dos percursos para cada veículo e as decisões tomadas pelo condutor. Nos componentes da rede de estradas estão incluídos a geometria das estradas, os veículos e o controlo de tráfego. A cada condutor é atribuído um conjunto de parâmetros que descrevem o seu comportamento, nomeadamente, a velocidade desejada e o seu perfil de condução (*e.g.*, desde passivo até agressivo). Da mesma forma os veículos também têm as suas próprias características nomeadamente, as dimensões, velocidade máxima e as capacidades de aceleração e travagem. A definição dos percursos para cada veículo é efectuada através de matrizes do tipo Origem-Destino (O/D), sendo estas definidas como valores de entrada para o modelo.

4.5 Decisão do condutor

O comportamento de um condutor num sistema de tráfego é um processo difícil e complexo de modelar, uma vez que requer não só a modelação de sistemas físicos mas também a modelação de sistemas de ordem “psicológica” do condutor.

Nas subsecções seguintes faz-se uma descrição dos vários fenómenos que são considerados pelo SITS e que influenciam o condutor no processo de tomada de decisão, nomeadamente, o regime de condução, o ambiente circundante, a mudança de faixa de rodagem e a geometria da estrada.

4.5.1 Regime de condução

O SITS simula sistemas de tráfego tendo como base três modelos de condução, *car-following*, *free flow* e *lane changing*. A cada veículo é atribuído um dos dois regimes de condução: *car-*

following ou *free flow*. O regime *free flow* prevalece relativamente ao regime *car-following* sempre que:

- i* não existem veículos à frente do veículo em análise, ou
- ii* o veículo da frente está a uma distância suficientemente grande que não influencia o comportamento do veículo em análise.

No caso do regime *free flow* o condutor viaja á velocidade máxima desejada. No regime *car-following* é necessário tomar decisões de aceleração e travagem sempre que o veículo da frente esteja a uma distância suficientemente próxima do veículo em análise, por forma a manter-se uma distância de segurança entre os veículos.

4.5.1.1 Modelo de percepção do condutor

O SITS simula as acelerações e as travagens utilizando um novo modelo de simulação designado por modelo de percepção do condutor (*Perception-Driver Model* - PDM). No modelo PDM o condutor decide se vai acelerar ou travar dependendo de dois factores:

- i* o estado actual em que se encontra o veículo;
- ii* a diferença entre, a distância entre veículos e a distância crítica.

Neste modelo o condutor reage ao estímulo (distância crítica) apenas quando esta excede a distância entre os veículos. O facto de o condutor ter a percepção de qual é o seu estado actual permite-lhe, respeitado o diagrama de estados definido na secção 4.4, saber quais os comportamentos (estados) para os quais pode transitar, podendo assim tomar a decisão mais conveniente. Desta forma, ultrapassam-se as limitações do ponto de vista comportamental que a generalidade dos modelos *car-following* apresentam, nomeadamente as várias evoluções dos modelos GM, conforme foi referido na secção 3.5.1.3.

A distância crítica representa a distância entre os veículos a partir da qual o veículo que segue atrás deve começar a reduzir a sua velocidade. Assim, quando este atingir a distância de segurança, em relação ao veículo da frente, e as velocidades de ambos sejam idênticas, os dois veículos passaram a circular com velocidades idênticas e mantêm a distância de segurança

entre eles. Esta situação verifica-se quando o veículo de trás circula a uma velocidade superior à do veículo da frente.

A distância crítica $d_{c,n}$ é definida pela fórmula:

$$d_{c,n} = d_{sb,n} + d_{f,n} + L_{n+1} \quad (4.1)$$

onde:

$d_{sb,n}$ é a distância de início de travagem do veículo n , dada pela equação (4.5)

$d_{f,n}$ é a distância de segurança que o veículo n deve manter em relação ao veículo da frente $n+1$, dada pela equação (4.10)

L_{n+1} é o comprimento do veículo da frente

Na figura 4.4 está representado um esquema onde se pode observar a relação entre as diferentes variáveis que são utilizadas no cálculo da distância crítica entre o veículo n e o veículo $n+1$ (considera-se que as condições de tráfego se mantêm constantes entre os intervalos de tempo t_0 e t_1)

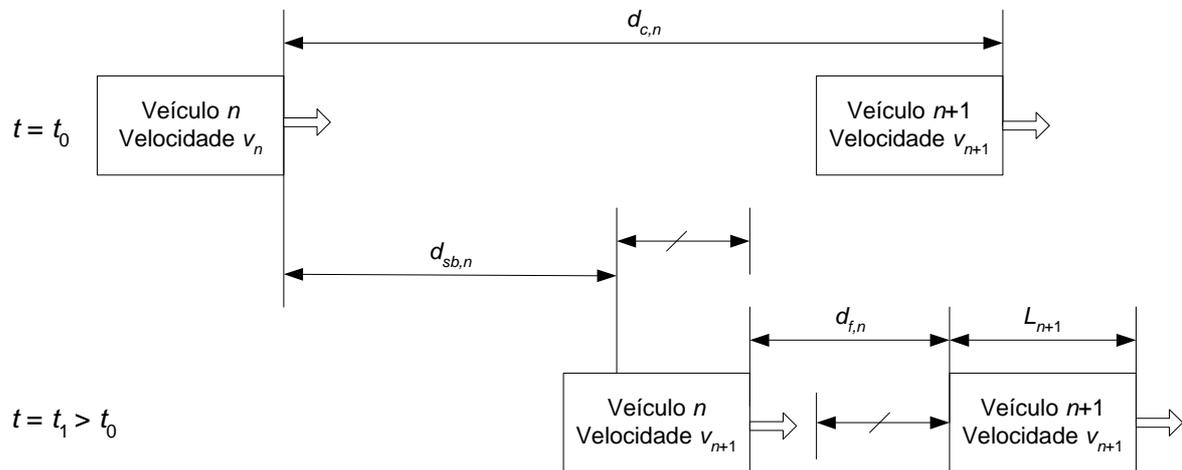


Figura 4.4 – Distância crítica entre dois veículos

A distância de início de travagem $d_{sb,n}$ representa a distância mínima entre veículos. Trata-se da distância a partir da qual o veículo que segue atrás deve começar a reduzir a sua velocidade, por forma a atingirem o mesmo ponto na estrada com a mesma velocidade, considerando que

a velocidade do veículo n , que segue atrás, é superior à velocidade do veículo $n + 1$ que segue na frente.

As equações do movimento para os veículos n e $n+1$ são definidas pelas expressões (4.2) e (4.3):

$$\begin{cases} x_n(t) = x_n + v_n t + \frac{1}{2} a_n t^2 \\ x_{n+1}(t) = x_{n+1} + v_{n+1} t + \frac{1}{2} a_{n+1} t^2 \end{cases} \quad (4.2)$$

e,

$$\begin{cases} v_n(t) = v_n + a_n t \\ v_{n+1}(t) = v_{n+1} + a_{n+1} t \end{cases} \quad (4.3)$$

onde:

- $x_n(t)$ e $x_{n+1}(t)$ São as posições no instante t do veículo n e do veículo da frente $n+1$
- $v_n(t)$ e $v_{n+1}(t)$ São as velocidades no instante t do veículo n e do veículo da frente $n+1$
- x_n e x_{n+1} São as posições actuais do veículo n e do veículo da frente $n+1$
- v_n e v_{n+1} São as velocidades actuais do veículo n e do veículo da frente $n+1$
- a_n e a_{n+1} São as acelerações do veículo n e do veículo da frente $n+1$

Considerando inicialmente que $v_n > v_{n+1}$, o instante t em que os veículos atingem o mesmo ponto na estrada com a mesma velocidade ocorre para:

$$\begin{cases} x_n(t) = x_{n+1}(t) \\ v_n(t) = v_{n+1}(t) \end{cases} \quad (4.4)$$

Substituindo nas expressões (4.2) e (4.3), obtêm-se a distância de início de travagem $d_{sb,n} = x_{n+1} - x_n$ definida pela expressão:

$$d_{sb,n} = -\frac{(v_{n+1} - v_n)^2}{2(a'_n - s_{n+1})} \quad (4.5)$$

onde:

a'_n é a desaceleração/travagem do veículo n dada pela equação (4.6)

s_{n+1} é a desaceleração/aceleração do veículo da frente $n+1$ dada pela equação (4.6) ou (4.7) dependendo do estado actual do veículo $n+1$

O condutor consegue reduzir a velocidade do veículo através de uma desaceleração/travagem a'_n . A relação entre as características do veículo e o perfil do condutor é dada pela expressão:

$$a'_n = a'_{\max,c} \gamma_d \quad (4.6)$$

onde:

$a'_{\max,c}$ é desaceleração/travagem máxima do veículo do tipo c .

γ_d é um parâmetro que caracteriza o condutor do tipo d ($0.1 < \gamma_d < 1.0$).

O parâmetro γ_d poderá ser alterado em qualquer momento da simulação por forma a evitar colisões entre os veículos. Este parâmetro define o perfil do condutor (*e.g.*, desde perfil passivo $\gamma_d = 0.1$ até um perfil agressivo $\gamma_d = 1.0$). Um condutor do tipo agressivo usa as capacidades máximas de aceleração e de travagem do veículo, enquanto que num condutor passivo esta atitude já não se verifica.

Neste modelo o condutor em análise tem a percepção de qual é o comportamento (estado) do veículo que circula à sua frente, podendo desta forma fazer uma estimativa do percurso que este irá efectuar caso não altere o seu comportamento. Esta previsão é determinada através do valor da parâmetro s_{n+1} (desaceleração/aceleração) que depende do estado em que se encontra o veículo que segue na frente. Se esse veículo estiver no estado #2 (desaceleração) então o valor de s_{n+1} é dada pela equação (4.6). No entanto, se o veículo estiver no estado #1

(aceleração), o valor de s_{n+1} é dado pela equação (4.7). No caso do veículo estar em qualquer um dos restantes estados o valor de s_{n+1} é zero. Assim:

$$s_{n+1} = a_{\max,c} \gamma_d \quad (4.7)$$

onde:

$a_{\max,c}$ é a aceleração máxima do veículo do tipo c .

A Brisa – Auto-estradas de Portugal (<http#61>), aconselha os condutores que circulam na sua rede de auto-estradas a manterem uma distância mínima de segurança ds_{\min} para o veículo da frente. O valor desta distância depende da velocidade do veículo e das condições atmosféricas. Considerando condições atmosféricas normais, a distância mínima de segurança ds_{\min} é calculada através da expressão:

$$ds_{\min} = 11.4 \sqrt{v_n} \quad (4.8)$$

Se as condições atmosféricas forem deficientes (*e.g.*, vento forte, chuva, nevoeiro, neve, etc.), a distância mínima de segurança ds_{\min} é obtida pela expressão:

$$ds_{\min} = (v_n - 10)^2 \quad (4.9)$$

No modelo de percepção do condutor, a distância de segurança a manter para o veículo da frente $d_{f,n}$ depende da distância mínima de segurança ds_{\min} e do perfil do condutor, sendo obtida através da expressão:

$$d_{f,n} = ds_{\min} \gamma_d \quad (4.10)$$

4.5.1.2 Modelo fluxo livre (*free flow*)

Como foi referido anteriormente no simulador SITS o regime *free flow* prevalece relativamente ao regime *car-following* sempre que não existam veículos à frente do veículo em análise, ou quando o veículo da frente esteja a uma distância suficientemente grande tal que não influencia o comportamento do veículo em análise (ou seja, quando a distância entre veículos é superior à distância crítica).

No regime *free flow* o condutor tem como objectivo atingir a velocidade previamente definida. Para isso é utilizado um modelo de aceleração em que o deslocamento do veículo é calculado em função da aceleração e da velocidade, com base na equação de movimento, através da expressão (4.11).

$$x(t) = x_n + v_n t + \frac{1}{2} a_n t^2 \quad (4.11)$$

O veículo começa com um movimento de aceleração (*i.e.*, estado de aceleração) até atingir a velocidade previamente definida. Após atingir essa velocidade o veículo passa a circular a uma velocidade constante (*i.e.*, muda para o estado de velocidade de cruzeiro). O valor da aceleração a_n depende das características mecânicas do veículo e do perfil do condutor, sendo determinado através da expressão (4.7). No modelo *free flow* do SITS não são considerados factores tais como, condições da via, condições meteorológicas e visibilidade.

4.5.1.3 Características mecânicas do veículo e perfil do condutor

No SITS as características mecânicas do veículo e o perfil do condutor fazem parte de um conjunto de dados (dados de entrada) que necessitam ser especificados antes de se iniciar uma simulação. O SITS permite simular duas classes de veículos, automóveis e camiões. Para cada um devem ser especificados os seguinte parâmetros; comprimento, velocidade máxima, tempo mínimo de aceleração e tempo mínimo de travagem.

O perfil do condutor no SITS é caracterizado através do parâmetro γ_d . Para um condutor com um perfil passivo o parâmetro $\gamma_d \approx 0.1$, caso seja um condutor com um perfil agressivo o parâmetro $\gamma_d \approx 1.0$. Os valores do parâmetro que caracteriza o perfil do condutor são gerados aleatoriamente (com distribuição uniforme) considerando o intervalo de variação $[0.1, 1.0]$.

4.5.1.4 Tempo de reacção

O tempo de reacção é o intervalo de tempo que vai desde a detecção do estímulo até que a resposta é aplicada. No caso do simulador SITS, o tempo de reacção não está explicitamente representado no modelo *car-following*, como acontece na maior parte dos modelos *car-following*

desenvolvidos. Como foi referido anteriormente, no modelo adoptado pelo SITS o condutor reage ao estímulo (distância crítica) apenas quando esta excede a distância entre os veículos e, como foi demonstrado, na determinação da distância crítica não é considerado o intervalo de reacção do condutor. A resposta ao estímulo só acontece após terminar o tempo definido como tempo de reacção para o tipo de condutor em análise. Por outras palavras, devido à técnica computacional adoptada (SOM), o processo de transição entre estados diferentes, de acordo com o diagrama de estados, só se verifica no fim do tempo de reacção. No caso do condutor permanecer no mesmo estado não é considerado qualquer tempo de reacção na resposta ao estímulo distância crítica. No entanto, é sempre considerado um tempo de reacção quando surge outro tipo de estímulo no sistema de tráfego (*e.g.*, sinal de trânsito, semáforo, mudança de faixa de rodagem). Durante a fase em que decorre a contagem do tempo de reacção o condutor não altera o seu comportamento de condução (*i.e.*, mantém o seu estado).

No SITS é possível utilizar um modelo para gerar o estímulo distância crítica (PDM) e outro modelo para o tempo de reacção do condutor, sendo a interacção entre estes dois modelos feita através da técnica computacional adoptada (SOM). Desta forma, consegue-se modelar com mais pormenor, e individualmente, cada um dos fenómenos referidos anteriormente, permitindo, assim, ultrapassar algumas das limitações que os modelos *car-following* apresentam, nomeadamente o facto de assumirem que um condutor segue sempre o seu líder mesmo quando o espaçamento entre eles é significativo.

A determinação do tempo de reacção do condutor a um estímulo é uma tarefa difícil e complexa, uma vez que depende de vários factores, a maior parte deles ligados ao comportamento psicológico do condutor. Dos vários factores que podem influenciar o tempo de reacção do condutor, podem referir-se os seguintes: idade do condutor, estado psicológico (*e.g.*, sereno, irritado, cumpridor das regras de trânsito, estado alcoolizado), visibilidade, condições atmosféricas, características dos veículos, velocidade do veículo e condições de tráfego.

Foram efectuados vários estudos, por diversos investigadores, com o objectivo de estimar o tempo de reacção do condutor quando sujeito a diferentes situações. A tabela 4.1 mostra um resumo dos resultados obtidos (Toledo, 2003).

Tabela 4.1 – Resultados estimados para o tempo de reacção

Estudo	Estímulo	Média	Mediana	Desvio Padrão
Fambro <i>et al.</i> (1998), revisão	Inesperado	1.28		0.20
	Esperado	0.73		0.16
Fambro <i>et al.</i> (1998)	Inesperado	1.10	1.11	0.21
Lerner <i>et al.</i> (1995)	Inesperado	1.31	1.18	0.61
	Esperado	0.54	0.53	0.1
Ahmed (1999)	Diferença de velocidade	1.34	1.31	0.31

Neste estudo foram considerados tempos de reacção diferentes para o caso de ser um estímulo esperado ou um estímulo inesperado. Por exemplo, Fambro *et al.* (1998) considera que o tempo de reacção médio a um estímulo esperado é de 0.73 segundos, enquanto que para o caso de um estímulo inesperado esse tempo aumenta para 1.28 segundos.

No caso do simulador SITS não foi feito qualquer estudo sobre o tempo de reacção do condutor quando ocorre um determinado estímulo. Por isso, optou-se por considerar o tempo médio de reacção em resposta ao um estímulo inesperado de 1.28 segundos, estimado por Fambro *et al.* (1998). O SITS calcula o tempo de reacção a um impulso t_{ri} relacionando o tempo reacção médio estimado com o perfil do condutor γ_d (*e.g.*, desde perfil passivo $\gamma_d = 0.1$ até um perfil agressivo $\gamma_d = 1.0$) através da expressão:

$$t_{ri} = 1.28(1 - \gamma_d) \quad (4.12)$$

Da expressão (4.12) resulta que os condutores mais agressivos ($\gamma_d \approx 1.0$) têm tempos de reacção menores, ou seja são mais rápidos a responder a um estímulo, enquanto que os

condutores com um perfil mais passivo ($\gamma_a \approx 0.1$) têm uma resposta mais lenta ao mesmo tipo de estímulo.

No entanto, conforme foi descrito anteriormente o simulador está preparado para incorporar um modelo que permita representar, o mais próximo possível da realidade, o tempo de reacção do condutor a diferentes tipos de estímulos.

4.5.2 Ambiente circundante

A estrutura computacional implementada no SITS, baseada no SOM, facilita uma representação mais explícita e compreensível sobre o comportamento e propriedades dos veículos. O recurso à programação orientada ao objecto permite um estilo de programação modular que é apropriada para situações onde se pretende simular a interacção entre diferentes modelos.

No caso do ambiente circundante, este pode ser modelado por um conjunto de modelos, cada um deles caracterizando diferentes fenómenos que podem ocorrer num sistema de tráfego. De entre os vários fenómenos que se podem modelar, e que influenciam o comportamento do condutor, podem-se referir os sinais de trânsito, os semáforos, os peões, as condições da via, as condições atmosféricas e a geometria da estrada (*e.g.*, reduzir a velocidade quando se aproxima de uma curva perigosa).

No SITS, o comportamento do condutor depende das condições de tráfego à sua volta e de alguns tipos sinais de transito (*e.g.*, limitadores de velocidade) colocados ao longo das vias que poderão dispor de informação estática ou dinâmica.

4.5.3 Modelo mudança de faixa de rodagem

O modelo implementado no SITS para executar uma mudança de faixa de rodagem (*lane changing model*), utiliza uma metodologia que tenta imitar os procedimentos de um condutor quando este pretende efectuar uma ultrapassagem ou uma mudança de faixa. Esta metodologia foi implementada seguindo três passos:

- i* decisão para efectuar uma mudança de faixa
- ii* selecção da faixa de rodagem pretendida
- iii* execução da manobra de mudança de faixa garantindo que as distâncias de segurança para os veículos existentes na faixa pretendida não são violadas

A modelação de um processo deste tipo é uma tarefa bastante complexa porque o processo de tomada de decisão, relativamente à mudança de faixa, tem um comportamento latente por natureza. Por outro lado é muito difícil determinar qual o instante temporal em que se vai tomar a decisão de mudar de faixa. Por último, a tomada de decisão de mudança de faixa é um processo contínuo no tempo.

Por forma a simplificar a modelação optou-se por considerar intervalos de tempo discretos e criar um conjunto de pressupostos que determinam a tomada de decisão de mudança de faixa. Assim, para cada instante de tempo é analisada a possibilidade de se efectuar uma manobra de mudança de faixa. Esta poderá ser arbitrária, se o condutor pretender aumentar a sua velocidade para ultrapassar um veículo que circula a uma velocidade inferior, ou obrigatória, quando a faixa actual deixa de ser uma opção (por exemplo, devido às regras de trânsito, à existência de acidentes, ou à necessidade de sair da via, isto é, mudar para um ramal de acesso).

Conforme se refere na secção seguinte, quando se define a estrutura da rede estradas, especifica-se, para cada segmento de recta de uma via, qual é a possibilidade de mudança de faixa. O SITS considerada quatro possibilidades de mudança de faixa possíveis:

- i* não é possível mudar de faixa
- ii* é possível mudar para a faixa à esquerda
- iii* é possível mudar para a faixa à direita
- iv* é possível mudar para ambas as faixas. Neste caso verifica-se, em primeiro lugar, se é possível mudar para a faixa da esquerda e, caso não seja possível, analisa-se a situação de mudar para a faixa da direita

Quando um veículo pretende efectuar uma manobra de mudança de faixa basta determinar o segmento de recta em que se encontra para seleccionar a faixa de rodagem para a qual poderá transitar.

Para determinar se é possível efectuar uma manobra de mudança de faixa foi desenvolvido um modelo de aceitação da distância disponível (*gap acceptance*). Neste modelo, após a selecção da faixa é feita uma verificação das distâncias entre o veículo em análise e os veículos que circulam, atrás g_a , e à frente g_b , na faixa seleccionada. Desta forma, determina-se a possibilidade de se poder executar a mudança para a faixa desejada, conforme se pode observar no exemplo da figura 4.5.

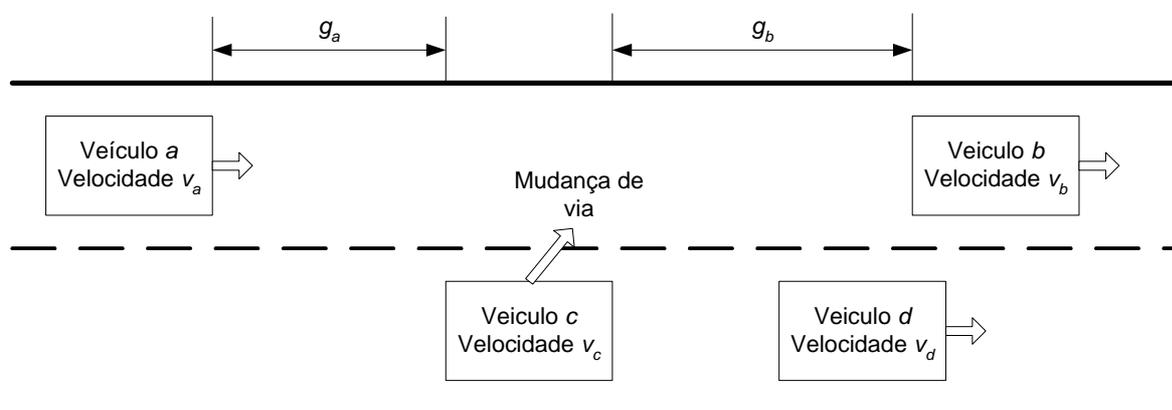


Figura 4.5 – Distâncias a considerar pelo veículo c quando pretender efectuar uma mudança de faixa.

Se a distância g_a for superior à distância crítica (calculada através do modelo PDM) entre os veículos a e c , e a distância g_b for superior à distância crítica entre os veículos c e b , então a mudança de faixa irá ser executada durante um intervalo de tempo de simulação Δt .

4.5.4 Geometria da estrada

A geometria da estrada faz parte do conjunto de dados de entrada que é necessário especificar antes de se iniciar uma simulação permitindo, desta forma, definir os percursos através dos quais os veículos poderão circular. O SITS não dispõe ainda de um editor gráfico para especificar a rede de estradas. Por isso toda a informação sobre a rede de estradas é transferida para o simulador através de um ficheiro formato ASCII com uma estrutura específica.

No SITS é utilizado o conceito de vias e nodos para especificar a rede de estradas. As vias são definidas como uma sucessão de segmentos de recta desde um ponto inicial até um ponto final. Cada via possui um sentido único de escoamento de tráfego, funcionando como a espécie de “trilho” através do qual os veículos são “guiados”. Para representar bifurcações de fluxo, será necessário iniciar uma nova via no ponto final da via que a precede. No caso de vias constituídas por uma ou mais curvas, estas são representadas por um conjunto de segmentos de recta de forma a aumentar o desempenho do cálculo computacional. Na figura 4.6 está representado um exemplo de uma rede de estradas onde é aplicado o conceito de vias e nodos.

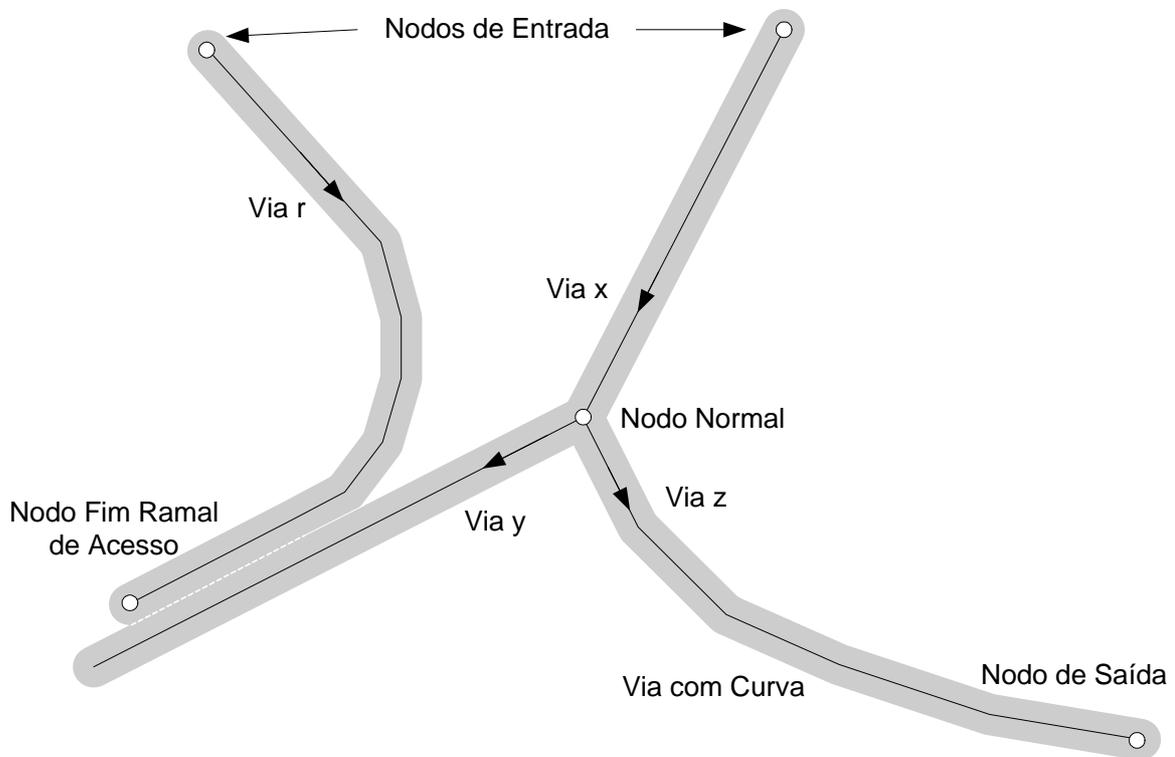


Figura 4.6 - Conceito de via e nodo

O nodo é uma espécie de entidade fictícia de interligação entre duas ou mais vias. Os nodos são somente localizados em pontos de início ou de fim de vias, sendo os únicos pontos através dos quais as vias se poderão interligar. Os nodos existem também no pontos de início e fim de uma estrada (*i.e.*, conjunto de vias) pelo que, neste caso, os nodos não interligam vias, mas apenas sinalizam o início e o fim de um estrada.

Os nodos são os pontos de decisão do modelo pelo que, fora deles, os veículos têm de se movimentar ao longo das vias de acordo com os modelos de condução descritos nas secções anteriores. No SITTS são considerados os seguintes quatro tipos de nodos:

- **Nodo normal**, resulta da interligação de duas ou mais vias, como no caso de mudança de via ou da bifurcação de vias.
- **Nodo de entrada**, é um nodo criado no início de cada via que possui livre o ponto de origem (no qual é automaticamente suposta a entrada de veículos). Neste tipo de nodos o operador poderá definir o fluxo de entrada de veículos.
- **Nodo de saída**, é um nodo criado no fim de cada via que possui livre o ponto final (no qual é automaticamente suposta a saída de veículos).
- **Nodo de fim de ramal de acesso**, é um nodo idêntico ao nodo de saída. Só que neste caso os veículos não podem sair no fim da via. Ou seja, pode acontecer que os veículos tenham que parar no fim da via até ser possível mudar de faixa de rodagem, conforme se pode observar no exemplo da figura 4.6.

No decorrer da simulação os veículos são introduzidos nas vias através dos nodos de entrada. Nesta altura são definidas as características do veículo (automóvel ou camião), perfil do condutor e a velocidade a que o veículo vai circular.

No ficheiro que descreve a rede de estradas especifica-se também, para cada via, quais são os segmentos onde se pode efectuar uma manobra de mudança de faixa, e se essa manobra pode ser feita para o lado esquerdo ou para o lado direito do sentido de circulação, ou, inclusive, se pode ser feita para qualquer um dos lados.

A figura 4.7 mostra a estrutura do ficheiro com informação sobre a rede de estradas para o caso da via identificada com o número 1, identificando-se também os diferentes campos.

No anexo A está representado a estrutura do ficheiro, com informação sobre a rede de estradas para o exemplo da figura 4.8, assim como uma descrição sobre a forma de interpretar cada um dos campos desse ficheiro.

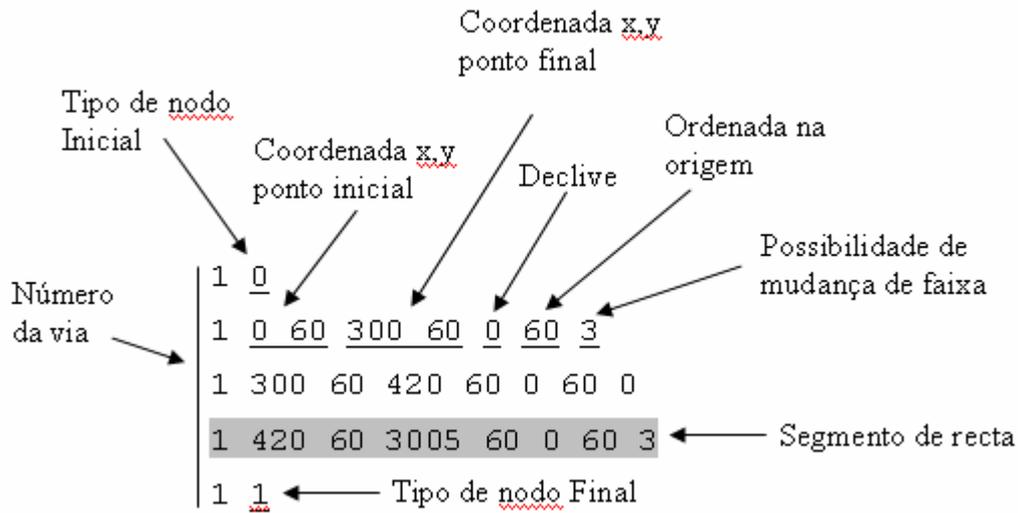


Figura 4.7 - Extracto de um ficheiro com informação sobre a rede de estradas

4.6 Interface com o utilizador (GUI)

No desenvolvimento do simulador SITS optou-se por conceber um *interface* de aspecto simples que permitisse uma rápida e fácil interacção com o utilizador, Entendeu-se deixar para trabalho futuro o estudo e o desenvolvimento de *interfaces* gráficos com maiores potencialidades, nomeadamente com recurso a gráficos 3D, que permitam observar em diferentes perspectivas, e com um maior realismo o que se passa numa determinada rede de estradas. Ficou também estabelecido que, tendo em vista tornar o simulador acessível a um maior número de potenciais utilizadores, só iria ser desenvolvida uma versão em língua Inglesa.

No SITS, para se dar início a uma simulação é necessário fornecer um conjunto de dados onde se inclui a informação relativa á rede de estradas, as especificações dos veículos e dos condutores e as condições de tráfego. Como resultado da simulação o SITS fornece uma representação gráfica, animada, do sistema de tráfego, além de uma colecção de dados sobre a simulação resultante da informação captada por diferentes tipos de “sensores”.

O SITS permite captar os movimentos individuais de cada veículo com uma resolução máxima de 10^{-1} segundo. Por forma a representar o estado em que se encontra cada um dos veículos foram atribuídas diferentes cores de acordo com os cinco estados possíveis:

- i “Vermelho” para representar o estado parado
- ii “Verde” para a aceleração
- iii “Amarelo” para a travagem
- iv “Azul” para a velocidade de cruzeiro
- v “Preto” para um acidente ou uma colisão

Na figura 4.8 está representado o *interface* gráfico adoptado no simulador SITS.

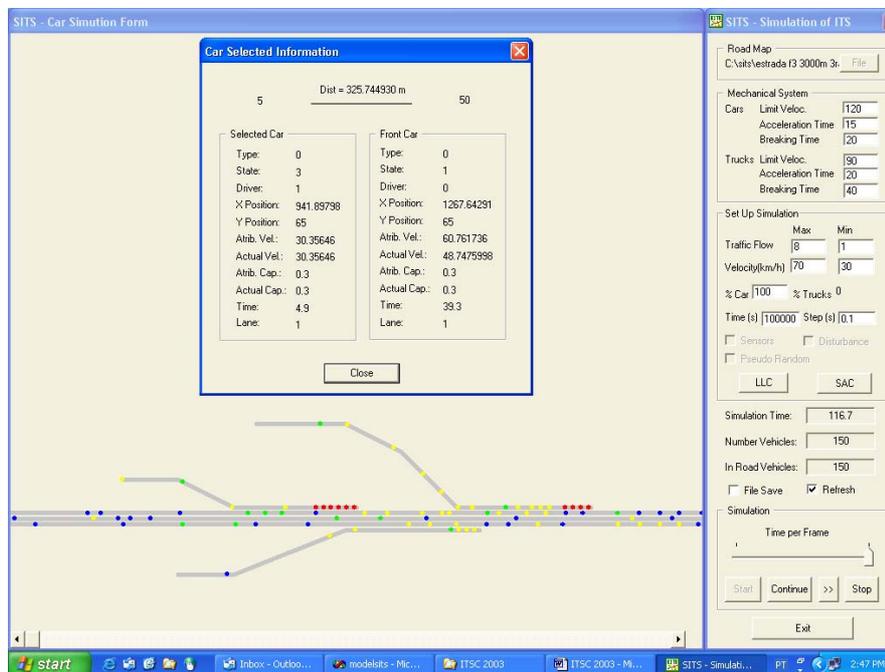


Figura 4.8 – Interface gráfico do simulador SITS

Este *interface* é composto por três áreas distintas:

1. **Área que permite fazer a configuração e o controlo de uma simulação.** Na configuração está incluído, o ficheiro com a rede de estradas, algumas das especificação dos veículos (tempo de aceleração e tempo de travagem), especificação da gama de variação do fluxo de tráfego e da velocidade dos veículos. A duração da simulação pode ser definida através do número de carros ou de um tempo máximo de simulação. Existem outras configurações que são especificadas através de ficheiros como, por exemplo, as características dos condutores e as matrizes origem-destino.

Estes ficheiros são carregados automaticamente na altura em que se inicia a aplicação. O controlo da simulação é feito através de um conjunto de botões tais como, iniciar/continuar, interromper, simulação passo a passo e terminar a simulação. Existe também uma função que permite determinar o intervalo de tempo de amostragem. A figura 4.9 ilustra o aspecto da janela que permite fazer a configuração e o controlo do simulador SITS.

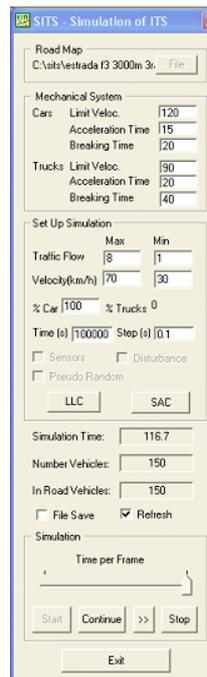


Figura 4.9 – Janela de configuração e controlo do simulador SITS

2. **Área de visualização do sistema de tráfego.** Nesta janela (figura 4.10) é possível visualizar de uma forma animada, a 2D, o comportamento dos vários veículos. Como foi referido anteriormente as diferentes cores dos veículos identificam os diferentes estados em que estes se encontram.

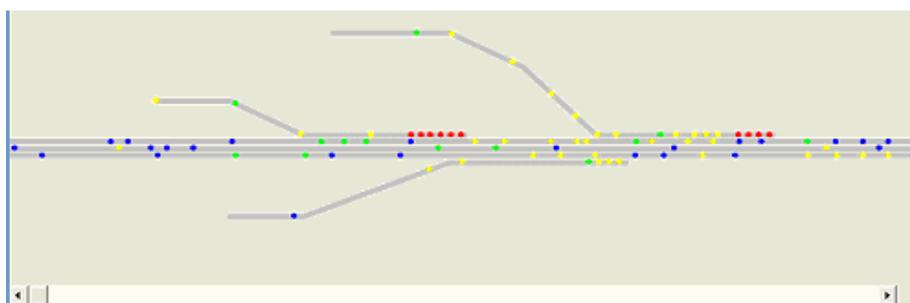


Figura 4.10 – Janela de visualização do sistema de tráfego

3. **Área com informação sobre os parâmetros de simulação de um determinado veículo.** Seleccionando qualquer um dos veículos existentes na janela de visualização (figura 4.10), surge uma nova janela com informação sobre os parâmetros de simulação relativos ao veículo seleccionado e ao veículo que segue á sua frente. Nesses parâmetros incluem-se, o tipo de condutor e de veículo, a velocidade actual e a velocidade desejada, a posição actual e um número identificador do veículo, bem como, a distância entre o veículo seleccionado e o veículo que segue na sua frente (figura 4.11).

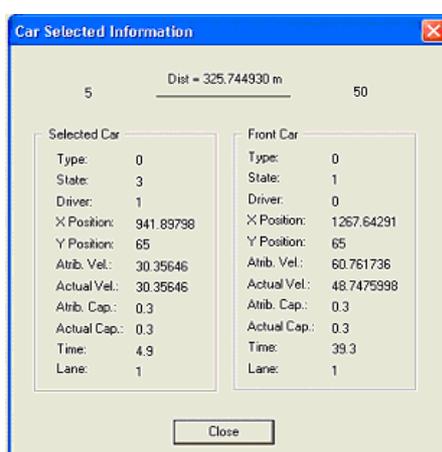


Figura 4.11 – Parâmetros de simulação do veículo seleccionado e do veículo que segue à sua frente

4.7 Controlo de tráfego

No SITS o controlo de tráfego é efectuado através de sinais limitadores de velocidade variável (SLVV). Neste momento não estão ainda implementados o sistema de controlo de tráfego através de semáforos e o sistema de controlo de fluxo nos ramais de acesso.

O controlo de fluxo de tráfego numa faixa de rodagem é uma forma eficiente de controlar o tráfego em auto-estrada. Para tal são colocados sensores ao longo das faixas de rodagem, que recolhem informação sobre as condições de tráfego, e sinais limitadores de velocidade variável, que informam o condutor sobre qual a velocidade mais adequada. O valor desta velocidade terá de ser determinado por um sistema de controlo adequado e eficaz, nomeadamente com o recurso a sistemas de apoio à decisão e a sistemas de optimização multi-objectivo.

Um sistema de controlo deste tipo tem como objectivo a homogeneização do fluxo de tráfego (*i.e.*, homogeneizar a velocidade dos veículos da mesma faixa de rodagem e a velocidade média entre diferentes faixas de rodagem). Desta forma, reduz-se o risco de ocorrerem congestionamentos quando se verificam altas densidades de tráfego aumentando-se a capacidade da estrada.

Na secção 5.6.1 do capítulo 5 faz-se uma descrição mais detalhada sobre o sistema de controlo de fluxo de tráfego através de sinais limitadores de velocidade variável, implementado no simulador SITS.

4.8 Dados de simulação gerados pelo SITS

O SITS gera um conjunto de dados de simulação que são obtidos através da colocação de diferentes tipos de sensores em pontos específicos da estrada. Estes sensores permitem captar informação sobre fluxos, velocidades, tempos de viagem e consumos de combustível. Uma vez armazenados, os dados podem ser visualizados graficamente ou podem ser tratados numericamente produzindo diversos tipos de estatísticas. Encontra-se em desenvolvimento um novo módulo para gerar informação sobre níveis de poluição produzidos pelos veículos.

Para ilustrar alguns dos diversos tipos de dados gerados pelo SITS foi efectuada uma simulação considerando uma estrada com uma faixa de rodagem com comprimento $l = 1000$ m. Ao longo da estrada foram colocados 21 sensores com um espaçamento de 50 m entre eles, ficando s_1 no início e s_{21} no fim da estrada. Foram ainda definidas as seguintes condições de tráfego no início da estrada: fluxo de veículos $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e velocidade dos veículos¹ $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} . A simulação termina depois de se ter registado o comportamento individual de 2000 veículos.

O SITS gera um vasto conjunto de dados tais como, informação sobre o comportamento individual dos veículos e informação captada pelos sensores colocados ao longo da estrada. A

¹Não se está a usar as unidades do Sistema Internacional para a velocidade dos veículos ($m s^{-1}$), uma vez que num sistema de tráfego o mais natural é a velocidade ser expressa em $km h^{-1}$.

figura 4.12 representa o histograma das velocidades no início $x = 0$ m no meio $x = 500$ m e no fim da estrada $x = 1000$ m.

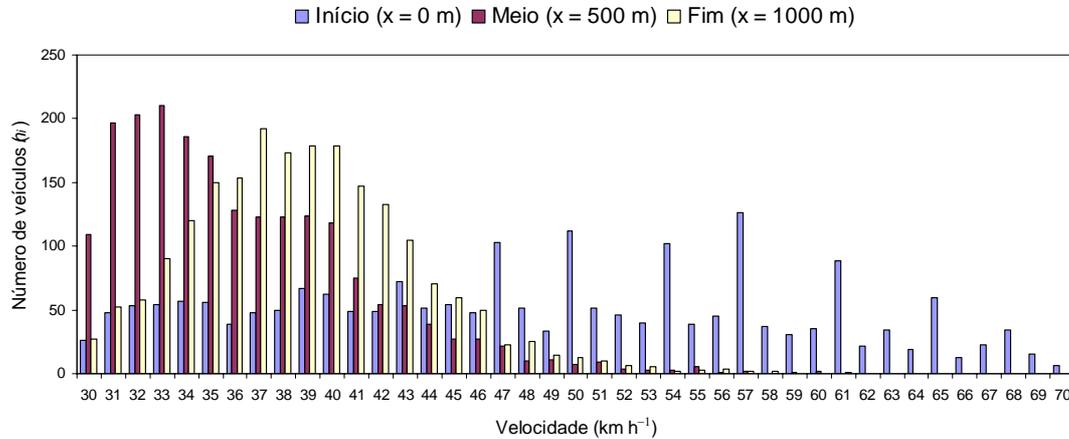


Figura 4.12 - Histograma velocidades no início, meio e fim de uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

Analisando o gráfico da figura 4.12 verifica-se que as velocidades no início da estrada $x = 0$ m têm uma distribuição aproximadamente uniforme no intervalo $[30, 70]$ km h^{-1} o que corresponde a uma velocidade média de 50 km h^{-1} . No meio da estrada $x = 500$ m a velocidade média dos veículos baixa para o valor de 36 km h^{-1} , isto porque os veículos mais lentos vão obrigar os veículos mais rápidos a reduzir a sua velocidade. No fim da estrada $x = 1000$ m a velocidade média dos veículos aumenta para o valor de 39 km h^{-1} , este fenómeno é justificado pelo facto de o veículo da frente, ao abandonar a estrada, deixar de influenciar o comportamento do veículo que circula atrás permitindo que este aumente a sua velocidade até abandonar a estrada.

O gráfico de curvas de nível representado na figura 4.13 permite dar uma ideia da distribuição das velocidades dos veículos ao longo da estrada. Conforme se pode observar, os veículos, uma vez colocados na mesma faixa de rodagem, interferem uns com os outros devido ao facto de terem velocidades diferentes. Devido a esse facto resulta uma diminuição da velocidade dos veículos no final da estrada, pois os veículos mais rápidos têm que diminuir a sua velocidade sempre que existam veículos mais lentos à sua frente. O gráfico da figura 4.13 permite detectar este fenómeno, uma vez que se verifica um aumento do número de veículos a circular com velocidade entre os 30 e 36 km h^{-1} no final da estrada. Conforme seria de esperar as

velocidades no início da estrada têm uma distribuição aproximadamente uniforme no intervalo $[30, 70]$ km h^{-1} , de acordo com a especificação do programa SITS.

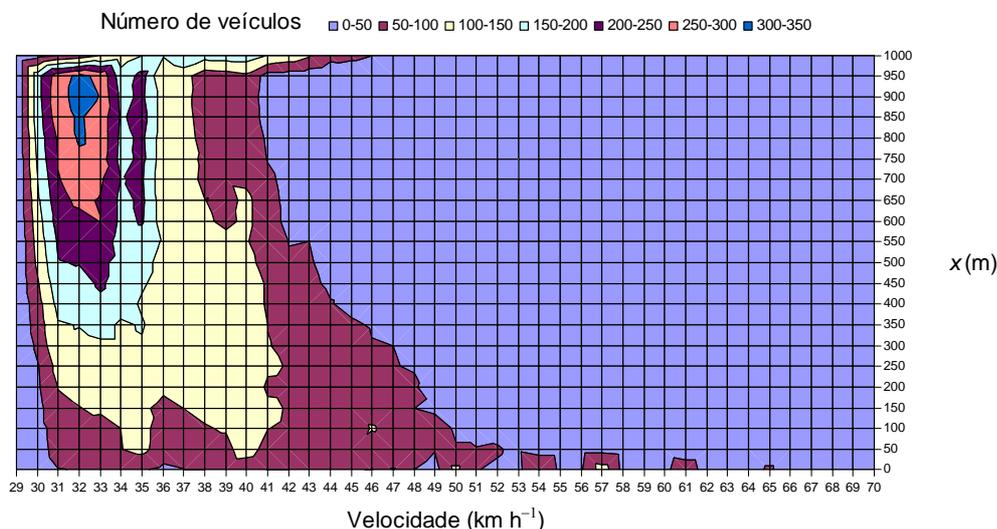


Figura 4.13 – Curvas de nível que representam o número de veículos *versus* a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m,

$$\phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1}, \text{ e } v_1(t;0) \in [30, 70] \text{ km h}^{-1}$$

Outro tipo de informação que se pode extrair dos dados de simulação gerados pelo SITS encontra-se representada na figura 4.14. Neste caso é possível avaliar a evolução temporal do fluxo de veículos ao longo da estrada.

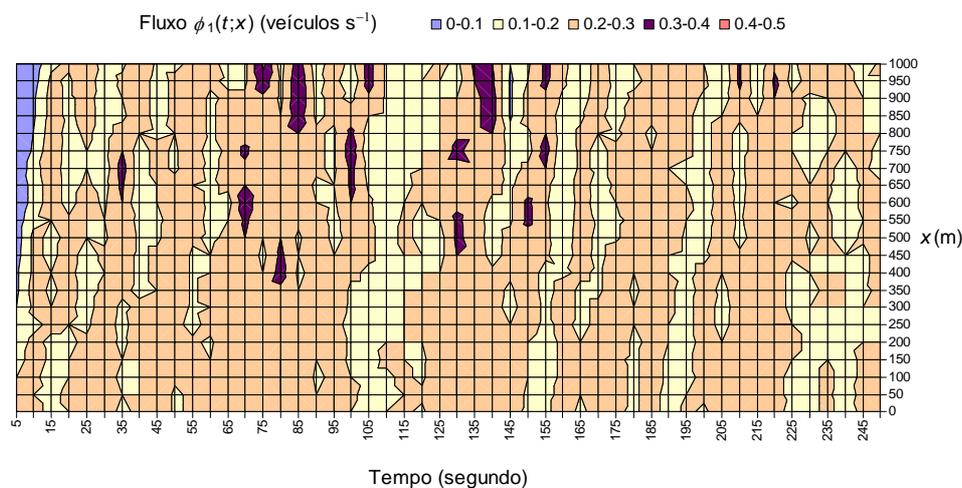


Figura 4.14 - Fluxo de tráfego *versus* tempo simulação (s) e coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

Para esta simulação verifica-se que o fluxo médio de tráfego no início da estrada $x = 0$ m é de 0.22 veículos s^{-1} . Para os primeiros 250 segundos de simulação o fluxo de tráfego ao longo da estrada varia entre 0.1 e 0.4 veículos s^{-1} .

Existe ainda um conjunto mais alargado de dados de simulação gerados pelo SITS cuja análise irá ser objecto de um estudo mais detalhado no capítulo 5.

4.9 Calibração e análise de sensibilidade do simulador SITS

Um dos procedimentos mais importantes, aquando da especificação do modelo matemático, é a conversão de objectos e comportamentos reais de um determinado sistema em parâmetros que possam ser representados numericamente. Esta é a fase na qual muitas inexactidões e erros podem ser introduzidas no modelo que se pretende desenvolver. Como consequência a precisão dos dados e dos resultados obtidos vai ter um peso e uma importância crucial nas conclusões obtidas com a realização de uma determinada simulação. Por isso, torna-se necessário verificar e afinar o modelo de forma que este represente com a maior exactidão possível o sistema que se pretende simular (Figueiredo *et al.*, 2004 d)).

A calibração distingue-se como sendo o processo que verifica e prepara os dados de entrada e os parâmetros de um modelo de maneira a que os resultados obtidos através de simulação sejam coerentes e o mais aproximados possível ao comportamento real do sistema em análise. Assim, relativamente aos simuladores de tráfego, torna-se necessário calibrar o modelo para garantir que os resultados da simulação sejam fidedignos para permitirem tomar decisões adequadas relativas à gestão de um sistema de tráfego.

O modelo seguidor de veículo (*car-following*) implementado no SITS foi testado e calibrado recorrendo a um teste de referência desenvolvido em 1998 por um grupo de investigação da Robert Bosch GmbH. Este teste permite determinar a qualidade de um simulador microscópico analisando a sua capacidade para reproduzir um comportamento macroscópico. Na altura este teste serviu para fazer uma análise sobre a qualidade de vários simuladores podendo os resultados serem consultados em Manstetten *et al.* (1998). Mais recentemente, este teste foi também utilizado para analisar o desempenho do simulador de tráfego microscópico AIMSUN (Barceló e Casas, 2002).

O comportamento macroscópico de um modelo microscópico pode ser facilmente testado através da análise da evolução do tráfego numa estrada circular com apenas uma faixa de rodagem. Com este cenário de simulação consegue-se eliminar as mudanças de faixa de rodagem (ultrapassagem) e os efeitos provocados pela mudança de estrada (nodos), permitindo analisar apenas o comportamento do modelo seguidor de veículo do simulador.

As condições de simulação são caracterizadas por uma estrada circular com o comprimento de $l = 1000$ m e por um número fixo de veículos N , todos com um comprimento de 4,5 m. Os veículos são colocados aleatoriamente na estrada com uma velocidade inicial de 0 km h^{-1} . Todos os condutores têm como objectivo atingir os 54 km h^{-1} . A simulação começa com estas condições iniciais, sendo que nos primeiros 10 minutos não é efectuado qualquer tipo de medição das condições de tráfego. Desta forma, consegue-se filtrar os efeitos transitórios no fluxo de tráfego resultantes da acção dos veículos (aceleração e travagem) para atingirem a velocidade estabelecida para o regime permanente. Findo este intervalo de tempo é feito o registo do comportamento do tráfego, num determinado ponto da estrada e durante um período de 2 horas. Este registo inclui o tempo exacto de passagem e a velocidade de cada um dos veículos.

Os procedimentos associados a este teste consistem em fazer variar o número de veículos N , obtendo-se desta forma diferentes valores de densidade de tráfego Q , e o correspondente valor de fluxo de tráfego resultante $\phi(Q)$.

Na figura 4.15 está representada a variação do fluxo de tráfego ϕ versus densidade Q (como a estrada tem o comprimento de $l = 1000$ m, o valor de densidade Q é igual ao número de veículos N) para o caso do simulador macroscópico, para o simulador microscópico AIMSUN (Barceló e Casas, 2002) e para o simulador microscópico desenvolvido neste trabalho (SITS).

Os valores obtidos pelo simulador microscópico SITS estão claramente de acordo com os resultados esperados, sendo esses valores muito aproximados dos valores obtidos pelo simulador microscópico AIMSUN e pelo macroscópico. É também relevante referir que o valor máximo do fluxo de tráfego entre 1800-2000 veículos h^{-1} , é considerado como um valor bastante realista quando se consideram períodos longos de observação.

Os melhores resultados do SITS foram obtidos considerando um tempo de reacção do condutor de 0.85 segundos.

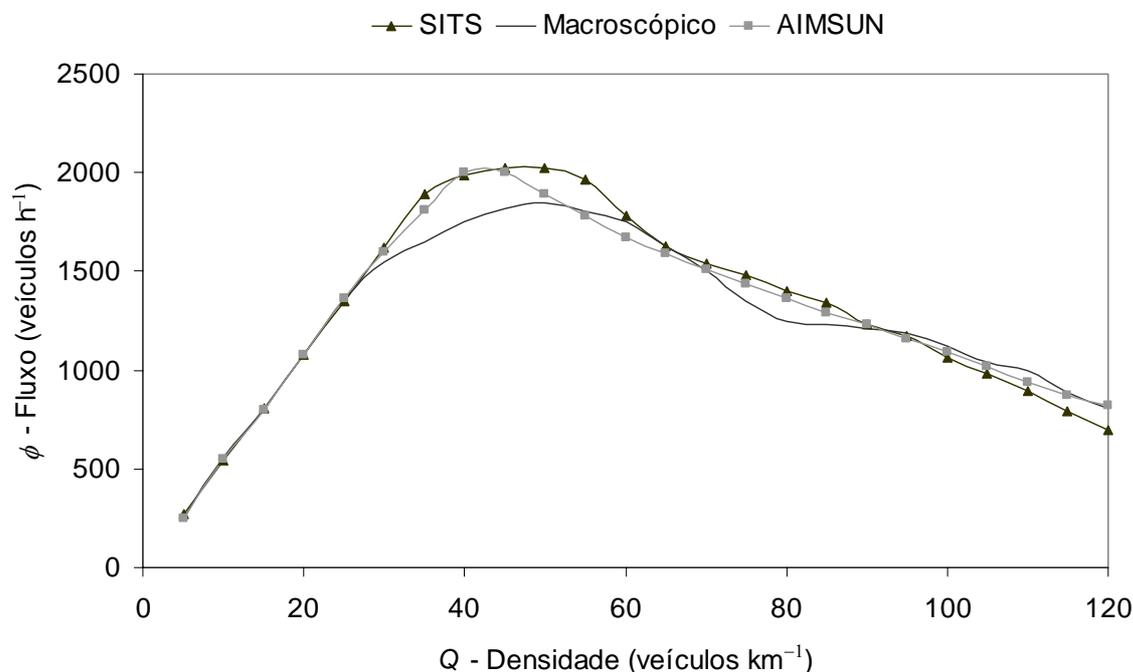


Figura 4.15 – Curvas de fluxo *versus* densidade

Como foi referido na secção 3.6.2, do capítulo 3, a análise de sensibilidade surge devido à necessidade de se obter uma melhor compreensão sobre quais os factores que têm maior peso no desempenho do modelo e uma maior influência na qualidade do modelo. A atribuição de valores aos diferentes parâmetros de um modelo faz parte do processo de calibração. Se os parâmetros de calibração forem fáceis de entender e de medir, então os processos de análise de sensibilidade e calibração, em conjunto com o conhecimento do comportamento do fluxo de tráfego no sistema a estudar, permitem uma fácil compreensão do sistema.

Este é um processo demorado e lento, uma vez que há uma grande variedade de parâmetros a analisar e o processo de análise é realizado individualmente. No caso do simulador SITS foram realizadas diversas experiências onde apenas se variou individualmente cada parâmetro por simulação, com o objectivo de analisar a sensibilidade do modelo de tráfego. Do conjunto de parâmetros alterados podem-se referir os seguintes: parâmetros do veículo, perfil do condutor, velocidade de entrada de veículos na estrada, tempo de simulação, número de carros

simulados e geometria da estrada (e.g., vários comprimentos de estrada, de faixas de rodagem e ramais de acesso).

Para dar uma ideia da sensibilidade do modelo utilizado no simulador SITS referem-se de seguida alguns dos resultados obtidos quando se alteram os parâmetros relativos à velocidade de entrada de veículos na estrada e ao comprimento da estrada.

A primeira simulação considera uma estrada com uma faixa de rodagem com comprimento $l = 1000$ m. Ao longo da estrada foram colocados 21 sensores com um espaçamento de 50 m entre eles, ficando s1 no início e s21 no fim da estrada. Foram ainda definidas as seguintes condições de tráfego no início da estrada: fluxo de veículos $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e velocidade dos veículos $v_1(t;0) \in [20, 100]$ $km\ h^{-1}$. A simulação termina depois de se ter registado o comportamento individual de 2000 veículos.

A figura 4.16 mostra o gráfico de curvas de nível que permite dar uma ideia da distribuição das velocidades dos veículos ao longo da estrada.

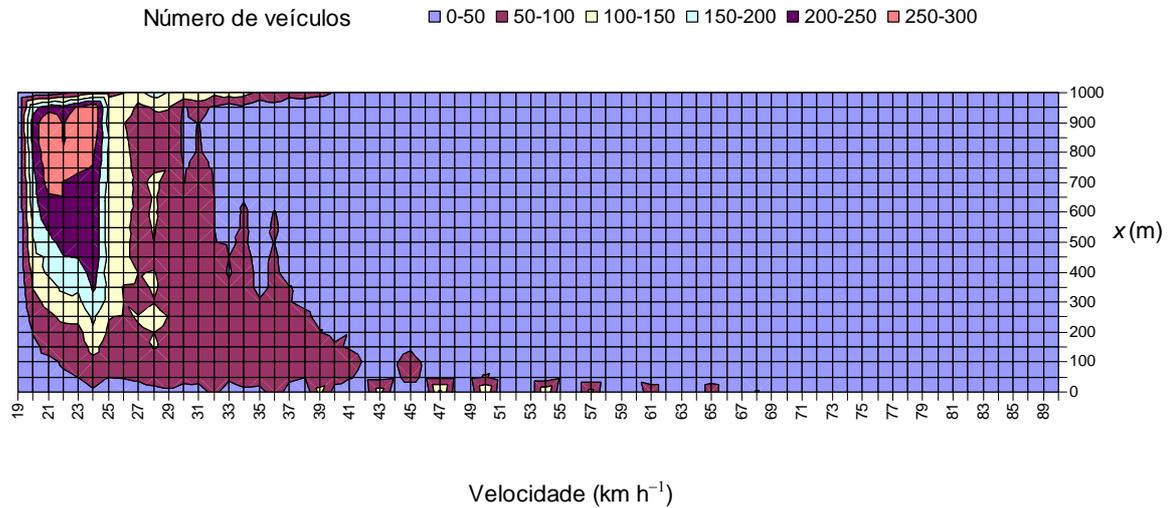


Figura 4.16 - Curvas de nível que representam o número de veículos *versus* a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m,

$$\phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos } s^{-1}, \text{ e } v_1(t;0) \in [20, 100] \text{ km } h^{-1}$$

Os parâmetros de simulação utilizados na experiência anterior são idênticos aos adotados na experiência da figura 4.13, com a exceção do intervalo de velocidades admissíveis aos veículos no início da estrada. No caso da experiência da figura 4.16 o intervalo é $v_1(t_0) \in [20, 100]$ km h⁻¹ e para o caso da figura 4.12 o intervalo é de $v_1(t_0) \in [30, 70]$ km h⁻¹.

O gráfico da figura 4.17 representa as curvas de nível para o caso de uma simulação em que se altera o intervalo das velocidades dos veículos no início da estrada para $v_1(t_0) \in [48, 52]$ km h⁻¹, mantendo os restantes parâmetros de simulação.

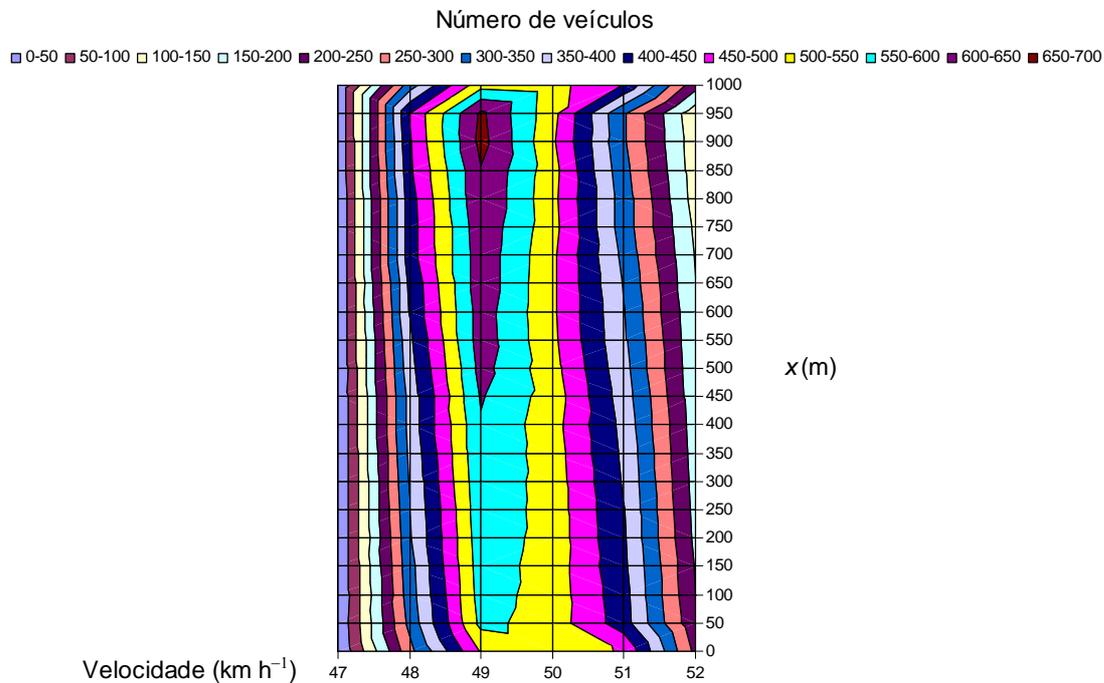


Figura 4.17 - Curvas de nível que representam o número de veículos *versus* a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m,

$$\phi_1(t_0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1}, \text{ e } v_1(t_0) \in [48, 52] \text{ km h}^{-1}$$

Ao Analisar o comportamento do modelo para as três situações (figuras 4.13, 4.16 e 4.17) conclui-se que quanto maior for o intervalo das velocidades admissíveis no início da estrada tanto maior é a interferência entre os veículos.

Na experiência seguinte analisa-se o comportamento do modelo quando se altera o comprimento da estrada de $l = 1000$ m para $l = 5000$ m. Os restantes parâmetros mantêm-se

idênticos aos que foram utilizados na primeira experiência, manteve-se também o número de sensores colocados ao longo da estrada só que, neste caso, eles não se encontram igualmente espaçados.

A figura 4.18 mostra o gráfico de curvas de nível obtido para esta simulação. Como seria de esperar verifica-se que, à medida que se aumenta o comprimento da estrada as velocidades dos veículos convergem para a velocidade do veículo que circula a menor velocidade.

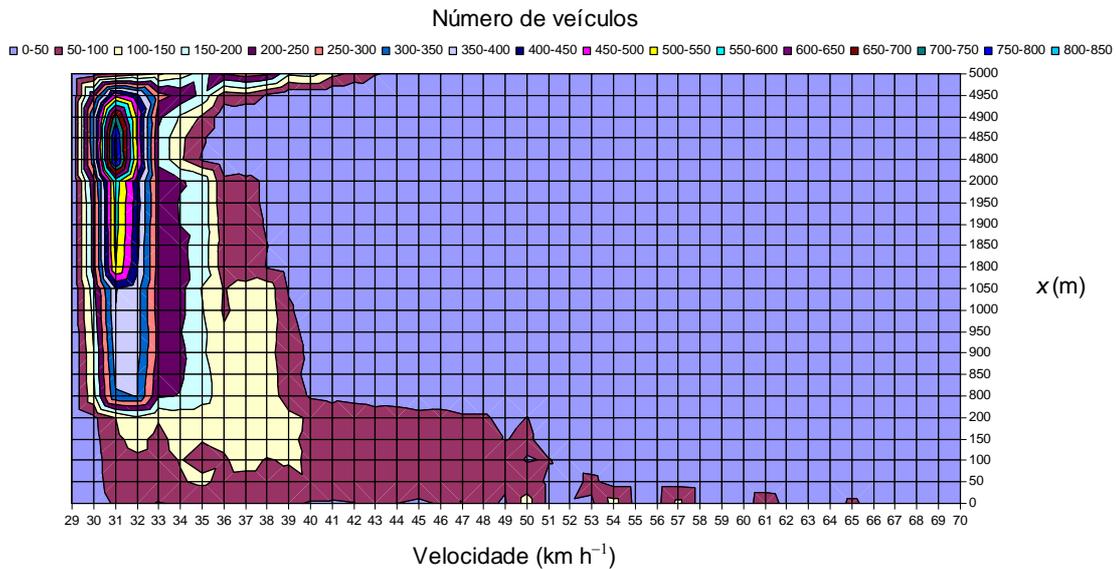


Figura 4.18 - Curvas de nível que representam o número de veículos *versus* a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 5000$ m,

$$\phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1}, \text{ e } v_1(t;0) \in [30, 70] \text{ km h}^{-1}$$

Comparando as figuras 4.13 e 4.18 verifica-se, como seria de esperar, que à medida que o comprimento da estrada aumenta o número de veículos a circular em à mesma velocidade no final da estrada também aumenta, aumentando também o comprimento das filas de veículos a circular em à mesma velocidade.

A calibração e a análise de sensibilidade do modelo SITS, levada a cabo recorrendo à realização de múltiplas experiências, algumas das quais não foram referidas neste capítulo uma vez que constituem pequenas variações das experiências analisadas, permite concluir que o simulador SITS apresenta um comportamento global muito próximo de um sistema de tráfego real.

4.10 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado e descrito um novo simulador de tráfego do tipo microscópico que permite simular condições de tráfego em meios urbanos e em auto-estradas. Este simulador descreve com detalhe um sistema de tráfego considerando diferentes geometrias de estrada e tipos distintos de condutores e de veículos. A nova técnica computacional adoptada (SOM) possibilita uma representação mais explícita e mais compreensível sobre o comportamento e propriedades dos veículos. O recurso à programação orientado ao objecto permite um estilo de programação modular que é apropriada para situações onde se pretende simular a interacção entre diferentes modelos.

Capítulo 5

Análise Dinâmica e Controlo de um Sistema de Tráfego

Neste capítulo procede-se à análise dinâmica de um sistema de tráfego segundo a perspectiva da teoria de sistemas utilizando o novo conceito de Função de Transferência Estatística (*Statistical Transfer Function* - STF). Nesta ordem de ideias é adoptado um modelo de um sistema de ordem fraccionária com atraso para descrever o comportamento dinâmico do fluxo de tráfego numa estrada. Através do SITS são realizadas diversas experiências por forma a determinar a variação dos vários parâmetros da STF considerando diferentes condições de tráfego. De forma complementar, descreve-se o processo de interferência entre veículos que circulam nas faixas de rodagem através da análise da entropia para diferentes geometrias de estrada e condições de tráfego. Por último, procede-se à descrição e à avaliação de desempenho de um novo algoritmo de controlo, que utiliza sinais limitadores de velocidade variável (SLVV) para controlar o fluxo de tráfego.

5.1 Introdução

O objectivo fundamental da análise dinâmica de um sistema de tráfego passa por estimar a influência da velocidade dos veículos, do comprimento da estrada e do número de faixas de rodagem sobre o fluxo de tráfego. Assim, efectuou-se um conjunto de experiências utilizando o simulador de tráfego microscópico SITS. Os resultados gerados pelo SITS foram posteriormente tratados e interpretados recorrendo a ferramentas de análise normalmente utilizadas em teorias de sistemas.

O fluxo de tráfego é um sistema variante no tempo e não-linear. No entanto, conforme se demonstrará mais à frente, neste capítulo, as Transformadas de Laplace/Fourier² podem ser utilizadas para analisar o comportamento dinâmico do sistema (Figueiredo *et al.*, 2004 d)).

5.1.1 Notações adoptadas

A análise dinâmica de um sistema de tráfego, constituído por várias faixas de rodagem, implica a utilização de um conjunto parâmetros que identificam e caracterizam os diferentes elementos do sistema. Assim, e para que sejam facilmente identificados e compreendidos, adoptou-se o seguinte sistema de notações.

l	comprimento da estrada
n_l	número de faixas de rodagem ($l = 1, 2, \dots$)
$v_k(t; x)$	velocidade de um veículo no instante t , na coordenada de estrada x e na faixa k ($k = 1, \dots, n_l$)
$\phi_k(t; x)$	fluxo de tráfego no instante t , na coordenada de estrada x na faixa k
v_{av}	velocidade média
Δv	máxima variação de velocidade ($0 \leq \Delta v \leq v_{av}$)

Considerando um estrada com n_l faixas de rodagem, a Função de Transferência (FT) entre o fluxo de tráfego medido por dois sensores colocados em determinados pontos da estrada, é obtida através da expressão seguinte:

$$G_{r,k}(s; x_j, x_i) = \frac{\Phi_r(s; x_j)}{\Phi_k(s; x_i)} \quad (5.1)$$

onde:

² Irá fazer-se $s = j\omega$ para converter resultado entre variáveis de Laplace (s) e Fourier ($j\omega$)

$k, r = 1, 2, \dots, n_l$ definem o número da faixa de rodagem

$s / j\omega$ é a variável complexa que resulta da aplicação da Transformada de Laplace/Fourier

x_i e x_j representam coordenadas da estrada, sendo que $0 \leq x_i \leq x_j \leq l$.

A Transformada de Fourier calculada para cada um dos fluxos de tráfego é obtida por:

$$\Phi_r(j\omega; x_j) = \mathcal{F}\{\phi_r(t; x_j)\} \quad (5.2a)$$

$$\Phi_k(j\omega; x_i) = \mathcal{F}\{\phi_k(t; x_i)\} \quad (5.2b)$$

A figura 5.1 mostra um esquema global da notação adoptada para os diferentes parâmetros utilizados na análise dinâmica de um sistema de tráfego constituído por várias faixas de rodagem.

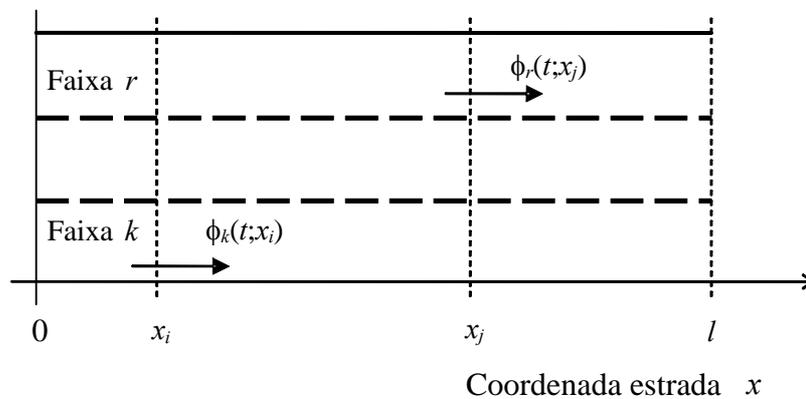


Figura 5.1 – Esquema global sobre notação adoptada

Quando se pretende identificar individualmente cada veículo utiliza-se a seguinte notação:

veículo i veículo número i

$v_k^i(t; x)$ velocidade do veículo i no instante t , na coordenada de estrada x e na faixa k

5.2 Análise dinâmica do comportamento de dois veículos numa estrada com 1 faixa de rodagem

Para avaliar o comportamento dinâmico de dois veículos numa faixa de rodagem, foram realizadas duas experiências utilizando o simulador de tráfego SITS.

Na primeira experiência considerou-se uma estrada com uma faixa de rodagem e comprimento $l = 500$ m. Para capturar o instante em que os veículos passam em determinados pontos da estrada, foram colocados dois sensores. O primeiro sensor foi colocado no início da estrada (*i.e.*, em $x_i = 0$ m) e o segundo no fim (*i.e.*, em $x_j = 500$ m). Foi atribuída a mesma velocidade no início da estrada aos dois veículos, ou seja, $v_1^1(0;0) = v_1^2(0;0) = 40$ km h⁻¹. O veículo2 foi introduzido na estrada 4 segundos depois do veículo1.

A figura 5.2 mostra os diagramas temporais captados pelo sensor colocado no início da estrada (*i.e.*, $x = 500$ m) (figura 5.2 a) e pelo sensor colocado na coordenada de estrada $x = 500$ m (figura 5.2 b)).

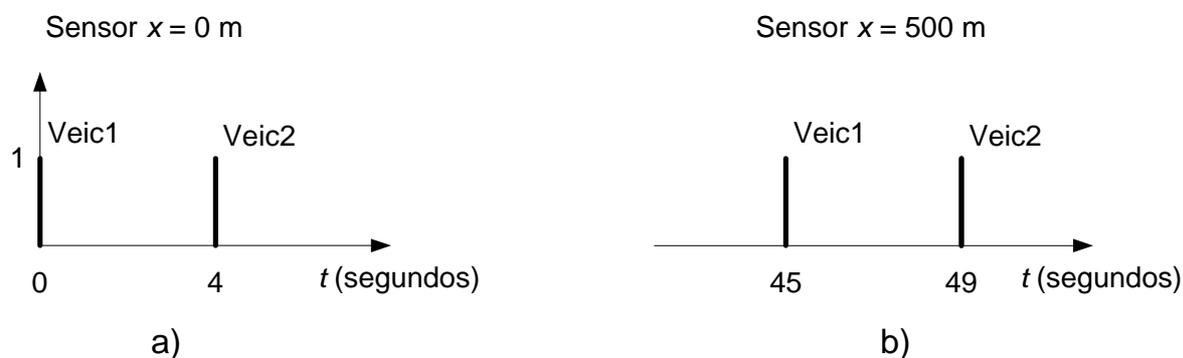


Figura 5.2 - diagramas temporais captados pelos sensores colocados a) no início da estrada (*i.e.*, $x = 0$ m) e b) na coordenada de estrada $x = 500$ m, considerando $v_1^1(0;0) = v_1^2(0;0) = 40$ km h⁻¹, $n_l = 1$ e $l = 500$ m

Como seria de esperar, o veículo1 demora 45 segundos a percorrer 500m a uma velocidade constante de 40 km h⁻¹. O veículo2 circula à mesma velocidade que o veículo1 e como este não interfere no comportamento do veículo2, o veículo2 passa pela coordenada de estrada $x = 500$ m exactamente 4 segundos depois do veículo1.

A figura 5.3 representa o diagrama polar da Função Transferência $G_{1,1}(s;500,0)$.

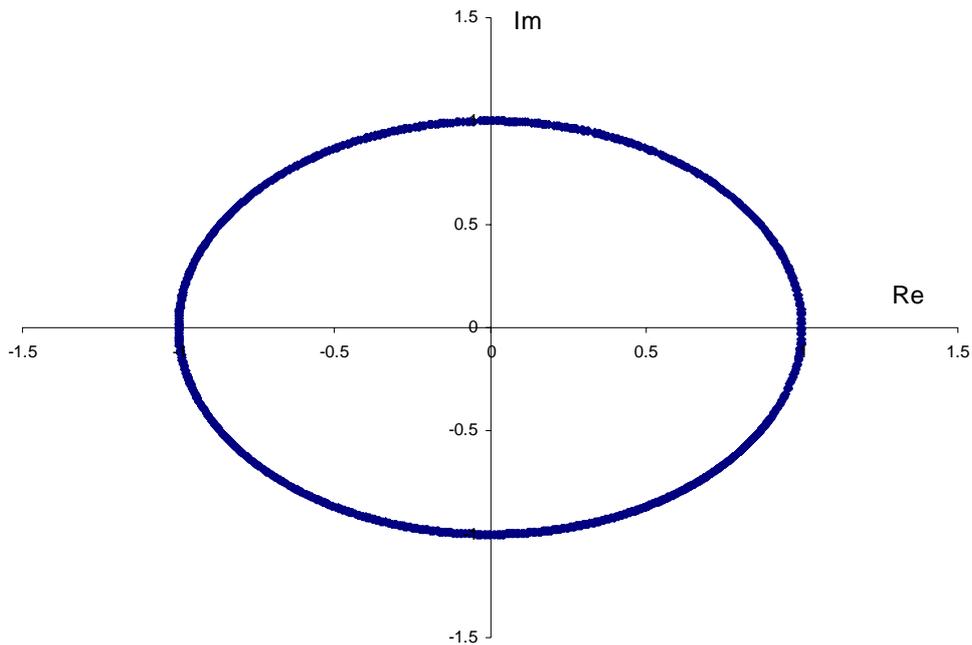


Figura 5.3 - Diagrama polar da $FT G_{1,1}(s; 500, 0)$ considerando $v_1^1(0; 0) = v_1^2(0; 0) = 40 \text{ km h}^{-1}$, $n_l = 1$ e $l = 1000 \text{ m}$

Este comportamento da Função de Transferência tem características similares às dos sistemas com atraso puro, podendo ser caracterizada pela expressão seguinte:

$$G_{1,1}(s; 500, 0) = e^{-s\tau} \quad (5.3)$$

onde τ representa o atraso dos sistema.

Na segunda experiência consideram-se os mesmos parâmetros de simulação da experiência anterior, apenas sendo diferente a velocidade do veículo2 que é introduzido no início da estrada com uma velocidade $v_1^2(0; 0) = 50 \text{ km h}^{-1}$. Neste caso, pelo facto de a velocidade do veículo2 ser superior à velocidade do veículo1, a proximidade do veículo1 vai influenciar o comportamento do veículo2, resultando a obrigatoriedade de o veículo2 diminuir a sua velocidade até alcançar a velocidade do veículo1. Uma vez agrupados os dois veículos passam a circular à mesma velocidade, e com uma distância de segurança entre eles, conforme se pode observar nos digramas temporais da figura 5.4.

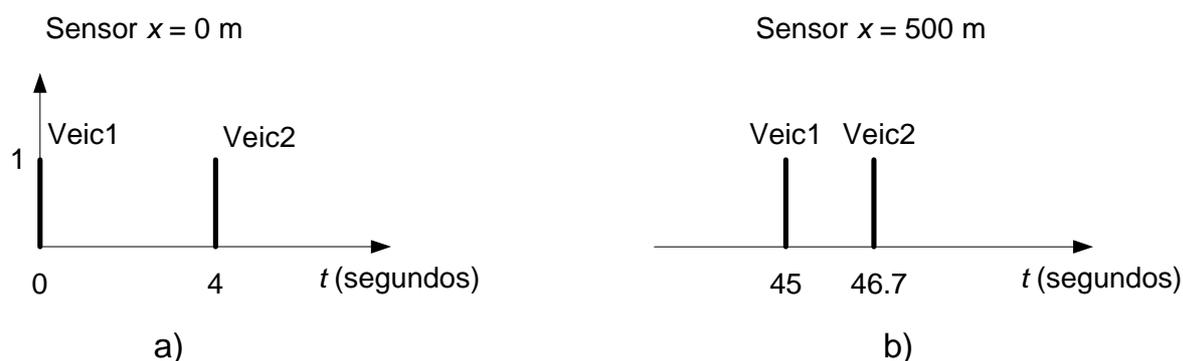


Figura 5.4 - diagramas temporais captados pelos sensores colocados a) no início da estrada (*i.e.*, $x = 0$ m) e b) na coordenada de estrada $x = 500$ m, considerando $v_1^1(0;0) = 40$ km h⁻¹, $v_1^2(0;0) = 50$ km h⁻¹, $n_l = 1$ e $l = 500$ m

Nesta experiência o comportamento do veículo1 mantêm-se igual à da experiência anterior, ou seja, demora 45 segundos a percorrer $l = 500$ m a uma velocidade constante de $v_1^1(0;0) = 40$ km h⁻¹. O veículo2 começa por se deslocar a uma velocidade constante de $v_1^2(0;0) = 50$ km h⁻¹ mas, devido à proximidade do veículo1, em vez de passar pela coordenada de estrada $x = 500$ m ao fim de 36 segundos só passa ao fim de 46.7 segundos. Através desta simples experiência constata-se que não se tem um clássico sistema linear invariante no tempo.

A figura 5.5 representa o diagrama polar da Função Transferência $G_{1,1}(s;500,0)$ para o caso abordado, de dois veículos com velocidades diferentes.

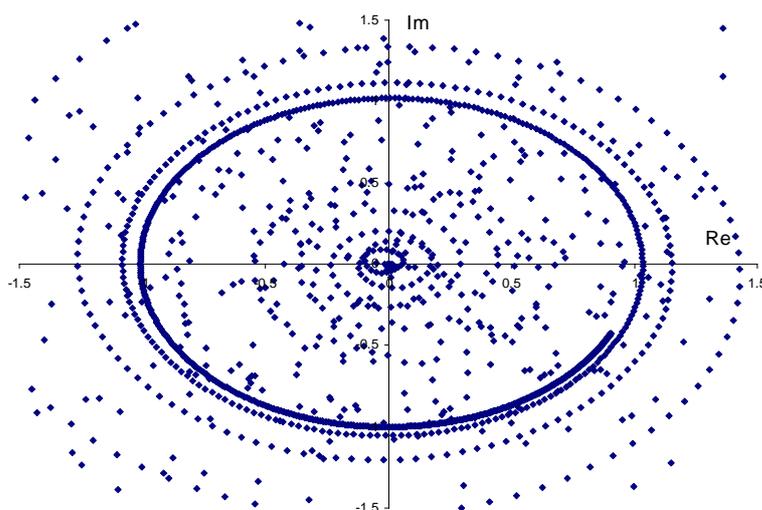


Figura 5.5 - Diagrama polar da FT $G_{1,1}(s;500,0)$ considerando, considerando $v_1^1(0;0) = 40$ km h⁻¹, $v_1^2(0;0) = 50$ km h⁻¹, $n_l = 1$ e $l = 500$ m

Observando o digrama polar verifica-se a existência de uma grande “variabilidade” para além de ser bastante diferente do resultado obtido na primeira experiência, este tipo de resultado não se enquadra em nenhum tipo de resultados normalmente analisados em teoria de sistemas clássica.

Para esta experiência a Função de Transferência pode ser calculada através da expressão:

$$G_{1,1}(s; 500, 0) = \frac{e^{-sT_{1,500}} + e^{-sT_{2,500}}}{1 + e^{-sT_{2,0}}} \quad (5.4)$$

onde:

$T_{2,0}$ instante de tempo em que veículo2 passa pela coordenada de estrada $x = 0$ m

$T_{1,500}$ instante de tempo em que veículo1 passa pela coordenada de estrada $x = 500$ m

$T_{2,500}$ instante de tempo em que veículo2 passa pela coordenada de estrada $x = 500$ m

Note-se que se trata de uma fracção envolvendo funções transcendententes.

A realização destas duas experiências permite concluir que o fluxo de tráfego não é um sistema linear e invariante no tempo. No entanto, conforme se demonstrará mais à frente neste capítulo, o comportamento dinâmico do sistema poderá ser analisado recorrendo a ferramentas de análise normalmente utilizadas em teorias de sistemas, nomeadamente às Transformadas de Laplace/Fourier.

5.3 Análise dinâmica de uma estrada com 1 faixa de rodagem

Nesta secção faz-se a análise do comportamento dinâmico dos veículos considerando uma estrada com $n_l = 1$ faixa de rodagem (*i.e.*, $k = r = 1$) com um comprimento $l = 1000$ m. Para capturar o instante em que os veículos passam em determinados pontos da estrada, são colocados n_s sensores igualmente espaçados ao longo da estrada. O primeiro sensor é colocado

no início da estrada (*i.e.*, em $x_i = 0$) e o último no fim (*i.e.*, em $x_j = 1000$ m), conforme se indica na figura 5.6.

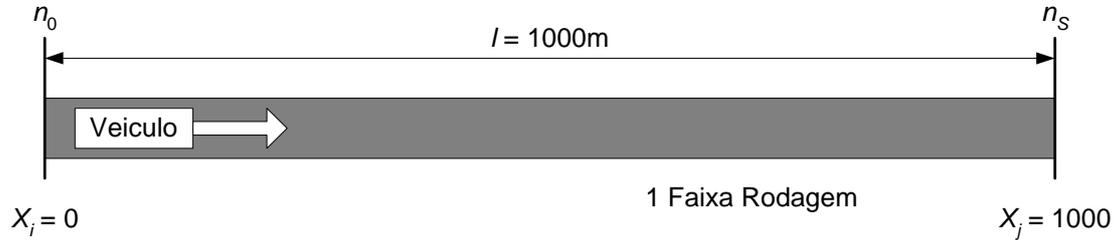


Figura 5.6 – Estrada com $n_j = 1$ faixa de rodagem

Nesta experiência foram adoptadas as seguintes condições de tráfego:

- fluxo no início da estrada $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}
- velocidade dos veículos no mesmo ponto da estrada $v_1(t;0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$

Por outras palavras, adopta-se uma velocidade tal que $v_1(t;0) \in [v_{av} - \Delta v, v_{av} + \Delta v]$ sendo a velocidade média $v_{av} = 50$ $km\ h^{-1}$ e a máxima variação de velocidade $\Delta v = 20$ $km\ h^{-1}$. Os valores da velocidade de cada veículo são gerados de acordo com uma função uniforme de distribuição de probabilidade. Para cada simulação é registado o comportamento individual de $n_p = 2000$ veículos com um tempo de amostragem de $\Delta t = 0.1s$.

A função de transferência (*FT*) entre o fluxo de tráfego no início e no fim da estrada é obtida através da expressão seguinte:

$$G_{1,1}(s;1000,0) = \frac{\Phi_1(s;1000)}{\Phi_1(s;0)} \quad (5.5)$$

Os resultados obtidos revelam uma grande “variabilidade”, típica de sistemas estocásticos, conforme se pode verificar no diagrama polar da figura 5.7 (simulação a).

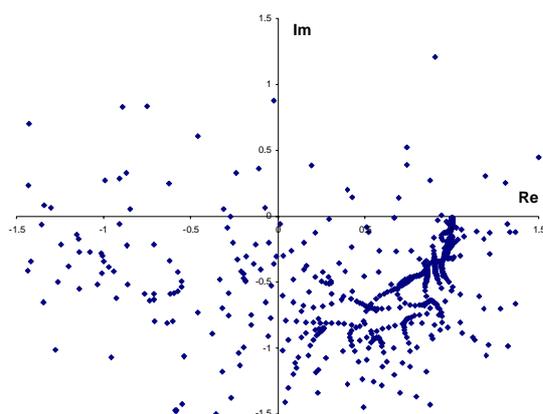


Figura 5.7 – Diagrama polar da FT considerando $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_l = 1$, $l = 1000$ m, $n_v = 2000$ veículos e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$ (simulação a)

Fazendo uma nova simulação (simulação b), considerando os mesmos parâmetros de entrada, verifica-se que o diagrama polar da FT varia significativamente face à experiência anterior, conforme mostra a figura 5.8.

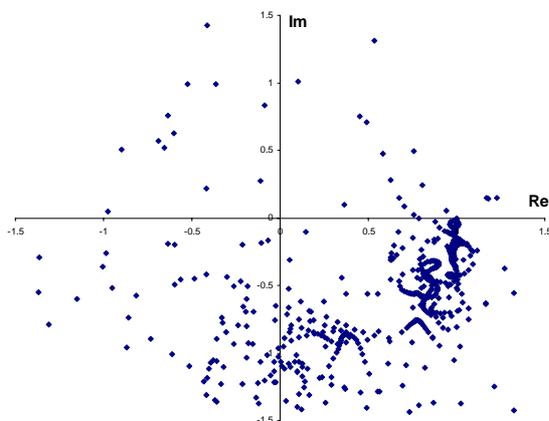


Figura 5.8 - Diagrama polar da FT considerando $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_l = 1$, $l = 1000$ m, $n_v = 2000$ veículos e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$ (simulação b)

A realização de várias experiências mostra que se obtêm FT s consideravelmente diferentes mesmo que se consideram idênticos parâmetros de entrada (*i.e.*, $\phi_1(t;0)$ e $v_1(t;0)$). Esta característica é justificado pela natureza estocástica do sistema e torna a sua análise complexa, tanto mais que não existem ferramentas matemáticas simples e eficientes. Sabe-se que os modelos clássicos são utilizados em sistemas lineares e invariantes no tempo, não sendo a sua

aplicação indicada para sistemas que incluem fenómenos aleatórios como é o caso de sistemas constituídos por ambientes não estruturados.

Para ultrapassar este problema será necessário recorrer a conceitos alternativos, nomeadamente o recurso a ferramentas matemáticas complementares.

Nas secções seguintes é efectuada uma análise do fluxo de tráfego numa estrada com uma faixa de rodagem considerando os parâmetros de simulação do exemplo anterior e recorrendo ao auxílio da estatística.

5.3.1 Função de Transferência Estatística

Como foi referido anteriormente a análise dinâmica do fluxo de tráfego numa estrada, segundo a perspectiva de teoria de sistemas, é um processo complexo. Para ultrapassar este problema foi utilizada a estatística. A estatística é uma ferramenta matemática vocacionada para tratar grande volume de dados mas não é apropriada para ser utilizada em relações que dependam do tempo. Por isso, no sentido de ultrapassar as limitações da estatística foi desenvolvido um novo método que conjuga a estatística com a Transformada de Fourier. Este novo método designado por Função de Transferência Estatística, ou simplesmente *STF* (*Statistical Transfer Function*), é composto por duas fases (Figueiredo *et al.*, 2004 b)).

Na primeira fase é definido um conjunto de variáveis de entrada (*ivs*) que podem variar independentemente, e um conjunto de variáveis de saída (*ovs*) que dependem das primeiras. Num sistema de tráfego os *ivs* e os *ovs* são definidos como $\phi_k(t; x_i)$ e $\phi_r(t; x_j)$, ou seja, os fluxos de tráfego no instante t , respectivamente nas coordenadas de estrada x_i e x_j e na faixa de rodagem k, r^b (onde $k, r = 1, \dots, n$).

Na segunda fase é feita a junção da análise estatística com a Transformada de Fourier³ através do seguinte algoritmo:

³ Como se disse faz-se $s = j\omega$ para passar entre os domínios de Laplace e Fourier.

- i* Gera-se uma amostra estatística obtida através da realização de n experiências. Todos os ivs e ovs são calculados e amostrados no domínio dos tempos.
- ii* Calcula-se a Transformada de Fourier para todos os ivs e ovs .
- iii* Calculam-se índices estatísticos (*e.g.*, média, mediana) para o diagrama espectral obtido em *ii*.
- iv* Os valores dos índices estatísticos obtidos em *iii* (para todas as variáveis e para cada frequência) são coligidos dando origem á Função de Transferência Estatística (*STF*).

Para ilustrar o resultado prático da aplicação deste novo método foi criada uma amostra de $n = 2000$ simulações. Na realização destas simulações considerou-se a geometria da estrada e as condições de tráfego (*i.e.*, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$) descritas na secção 5.3, sendo neste exemplo utilizado como índice estatístico a mediana. Conforme se pode observar no digrama polar da figura 5.9 existe uma convergência da *STF*.

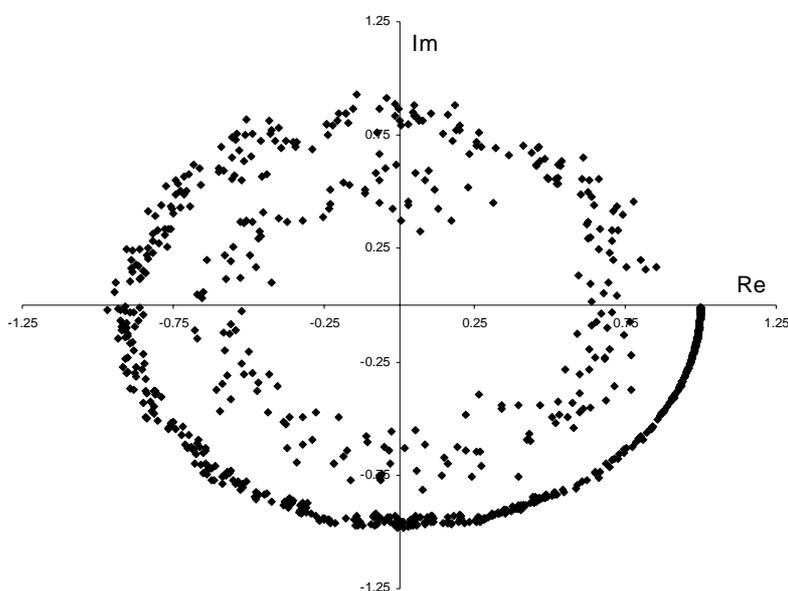


Figura 5.9 - Diagrama polar da *STF* para $\omega \in [0, 0.1]$ $rad\ s^{-1}$ considerando $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_l = 1$, $l = 1000$ m, $n_v = 2000$ veículos e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$

Este comportamento da *STF* tem características similares com os sistemas do tipo filtro passa baixo com atraso, o que é comum ocorrer em sistemas que envolvam transporte.

5.3.1.1 Matriz pseudoinversa

Outra forma de se obter a função de transferência \mathbf{T} , a partir de uma amostra de n experiências, é através da utilização do conceito da matriz pseudoinversa $\Phi^\#$:

$$\mathbf{T} \Phi(s;0) = \Phi(s;1000) \Rightarrow \mathbf{T} = \Phi(s;1000) \Phi^\#(s;0) \quad (5.6)$$

onde:

$$\Phi(s;0) = [\Phi^1(s;0) \mid \dots \mid \Phi^n(s;0)] \quad (5.7)$$

e,

$$\Phi(s;1000) = [\Phi^1(s;1000) \mid \dots \mid \Phi^n(s;1000)] \quad (5.8)$$

$\Phi(s;0)$ e $\Phi(s;1000)$ são matrizes (de dimensão $n \times n$) construídas a partir dos resultados obtidos através da realização de n experiências diferentes e $\Phi^i(s;0)$ e $\Phi^i(s;1000)$ ($i = 1, \dots, n$), são os vectores (de dimensão $n \times 1$) resultantes de cada uma das experiências.

Por seu lado, $\Phi^\#(s;0)$ (de dimensão $n \times n$) representa a matriz pseudoinversa da matriz $\Phi(s;0)$, e pode ser calculada através da expressão (Ogata, 1982) e (Duarte, 2002):

$$\Phi^\#(s;0) = \Phi(s;0)^T (\Phi(s;0) \Phi(s;0)^T)^{-1} \quad (5.9)$$

O recurso à matriz pseudoinversa para determinação da função de transferência foi comparado com o método de cálculo da *STF*. Verificou-se que a adopção da pseudoinversa se revela pouco apropriada, existindo uma certa dificuldade na estimação devido à existência do atraso e^{-sT} . Apesar de não ser matéria desta tese, verificou-se que no caso de não existir o atraso e^{-sT} os resultados obtidos utilizando este método eram satisfatórios.

Para analisar o problema é considerada uma amostra estatística de quatro sinais de entrada, $\Phi_1(s;0) = \mathcal{L}\{\phi_1(t;0)\}$, retirados de um conjunto de experiências realizadas no SITS, todas elas com os mesmos parâmetros de simulação e condições de tráfego. Neste caso os correspondentes sinais de saída $\Phi(s;1000)$ não são obtidos pelo SITS. Alternativamente calcula-se analiticamente sinais “fictícios” $\Phi(s;1000)$ a partir dos sinais de entrada $\Phi(s;0)$ e das

expressões da função de transferência com atraso (5.13) e sem atraso (5.12). Obviamente neste caso, sabe-se a priori os valores dos parâmetros k_B , p , α e τ da função de transferência.

$$T_{1,1}(s;1000,0) = \frac{k_B}{\left(\frac{s}{p} + 1\right)^\alpha} \quad (5.10)$$

Os valores dos parâmetros das expressões (5.10) e (5.11) para cada uma das quatro simulações encontram-se especificados na tabela 5.1, assim com as respectivas médias.

Tabela 5.1 – Parâmetros da função de transferência (5.10) e (5.11)

Número Simulação	k_B	p	α	τ (segundos)
1	1	0.07	1.5	71
2	1	0.08	1.4	75
3	1	0.09	1.6	80
4	1	0.085	1.45	75
Média	1	0.0812	1.49	75.2

Desta forma, é determinada a Transformada de Laplace do sinal de saída $\Phi(s;1000)$ para cada uma das simulações e para cada um dos sistemas (*i.e.*, com e sem atraso).

No passo seguinte pretende-se determinar o valor da função de transferência, para os casos de um sistema com atraso e sem atraso, calculada através da expressão (5.6) (*i.e.*, utilizando a matriz pseudoinversa) e considerando uma amostra de $n = 4$ simulações,

Os resultados obtidos encontram-se representados no gráfico da figura 5.10.

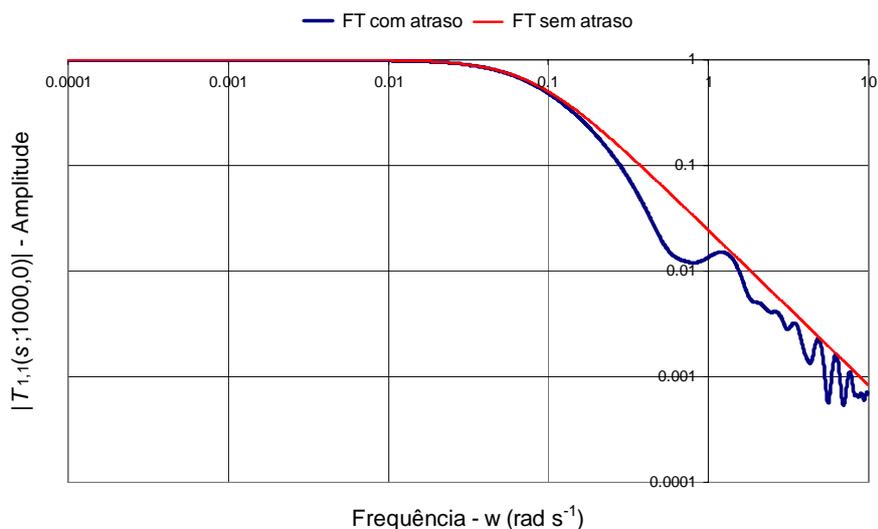


Figura 5.10 - Função de Transferência FT com e sem atraso, calculado pelo método da matriz pseudoinversa.

A função de transferência estimada pode considerar-se dentro dos valores esperados quando os valores dos parâmetros p , α e τ se aproximarem dos valores médios das quatro simulações: $k_{B,av} = 1$, $p_{av} = 0.0812$, $\alpha_{av} = 1.49$ e $\tau_{av} = 75.2$ segundos.

Analisando o gráfico da figura 5.10 conclui-se que, para o caso de um sistema sem atraso, a função de transferência estimada encontra-se próximo dos valores esperados, pois obtém-se $p = 0.08$ e $\alpha = 1.47$. No entanto, para o caso de um sistema com atraso, a função de transferência estimada afasta-se dos valores esperados, pois obtém-se $p = 0.10$, $\alpha = 2.20$ e $\tau = 72$ segundos. Por esta razão optou-se por não utilizar o método da matriz pseudoinversa para o cálculo da função de transferência a partir de uma amostra de n experiências, uma vez que um sistema de tráfego é um caso típico de um sistema com atraso.

5.3.2 Identificação da STF

Como foi referido na secção 5.3.1, o diagrama polar da STF apresenta características similares aos de um sistema do tipo filtro passa baixo com atraso. No entanto, para o caso em estudo torna-se necessário incluir a capacidade de ajustar a descrição à variação contínua das condições operacionais do sistema. Este requisito torna inadequado a utilização de um vulgar filtro passa baixo de ordem inteira sendo, de facto, mais apropriado a adopção de uma função de transferência de ordem fraccionária. Por esta razão para descrever o comportamento

dinâmico do fluxo de tráfego numa estrada com uma faixa de rodagem foi adoptado um sistema de ordem fraccionária com atraso, representado pela expressão seguinte (Machado, 2003) e (Figueiredo *et al.*, 2003 c)):

$$T_{1,1}(s;1000,0) = \frac{k_B e^{-\tau s}}{\left(\frac{s}{p} + 1\right)^\alpha} \quad (5.11)$$

Com este tipo de descrição obtém-se um melhor ajuste dos valores numéricos à *FT*, o que seria mais difícil conseguir para o caso de uma *FT* de ordem inteira devido à variação discreta da variável α , pelo que, para se obter um bom ajuste com uma *FT* de ordem inteira, seriam necessárias *FTs* com mais pólos e zeros. Por outras palavras, o cálculo fraccionário constitui uma ferramenta matemática que se adapta melhor às características dinâmicas do sistema que se pretende analisar (Figueiredo *et al.*, 2004 c)).

Para ajustar a *SFT* (5.11) aos valores numéricos utiliza-se um método baseado na minimização do erro quadrático, sendo este constituído por duas fases.

Na primeira fase são determinados os valores de k_B , p e α , através de um algoritmo que minimiza o erro quadrático logarítmico, do diagrama de Bode de amplitudes, ϵ_{Bode} , de acordo com a expressão:

$$\epsilon_{\text{Bode}} = \sum_{i=1}^{nf} \left[\log_{10} \frac{|T_{1,1}^a(j\omega_i;1000,0)|}{|T_{1,1}^n(j\omega_i;1000,0)|} \right]^2 \quad (5.12)$$

onde:

nf número total de frequências amostradas

ω_i frequência de ordem i ($i = 1, \dots, nf$)

$T_{1,1}^a(j\omega_i;1000,0)$ função de transferência analítica para a frequência ω_i , calculada pela expressão (5.11)

$T_{1,1}^n(j\omega_i; 1000, 0)$ função de transferência numérica para a frequência ω_i .

Uma vez estabelecidos os valores de k_B , p e α , numa segunda fase é determinado o valor de τ através da minimização do erro quadrático linear no diagrama polar, ϵ_{Polar} , dado pela expressão:

$$\epsilon_{\text{Polar}} = \sum_{i=1}^{nf} \left[\left(\text{Re} \left[T_{1,1}^a(j\omega_i; 1000, 0) \right] - \text{Re} \left[T_{1,1}^n(j\omega_i; 1000, 0) \right] \right)^2 \right] + \sum_{i=1}^{nf} \left[\left(\text{Im} \left[T_{1,1}^a(j\omega_i; 1000, 0) \right] - \text{Im} \left[T_{1,1}^n(j\omega_i; 1000, 0) \right] \right)^2 \right] \quad (5.13)$$

Através do método atrás descrito, os valores numéricos dos parâmetros da *SFT* que melhor ajusta o diagrama polar da figura 5.9 são $k_B = 1.0$, $p = 96.0$ segundos e $\alpha = 1.5$.

5.3.3 Número de simulações versus tempo de processamento

Um factor importante na obtenção da *STF* prende-se com o facto de encontrar o número de simulações n (*i.e.*, a amostra) mais conveniente para se obter o melhor compromisso entre o erro quadrático ϵ_{Bode} e o tempo de processamento. Por um lado, sabe-se que, quanto maior for o número de simulações menor vai ser o erro ϵ_{Bode} , e por outro lado sabe-se que o aumento do número de simulações tem como consequência directa um maior do tempo de processamento. Para se ter uma ideia mais concreta da variação destas duas componentes com diferentes tipos de amostras (*i.e.*, número de simulações), foram realizadas várias experiências onde foram consideradas as condições de tráfego descritas na secção 5.3. Os resultados obtidos encontram-se coligidos no gráfico da figura 5.11.

A partir do gráfico constata-se que a variação do erro quadrático ϵ_{Bode} tem um comportamento do tipo:

$$\epsilon_{\text{Bode}} = 2611.1 n^{-0.606} \quad (5.14)$$

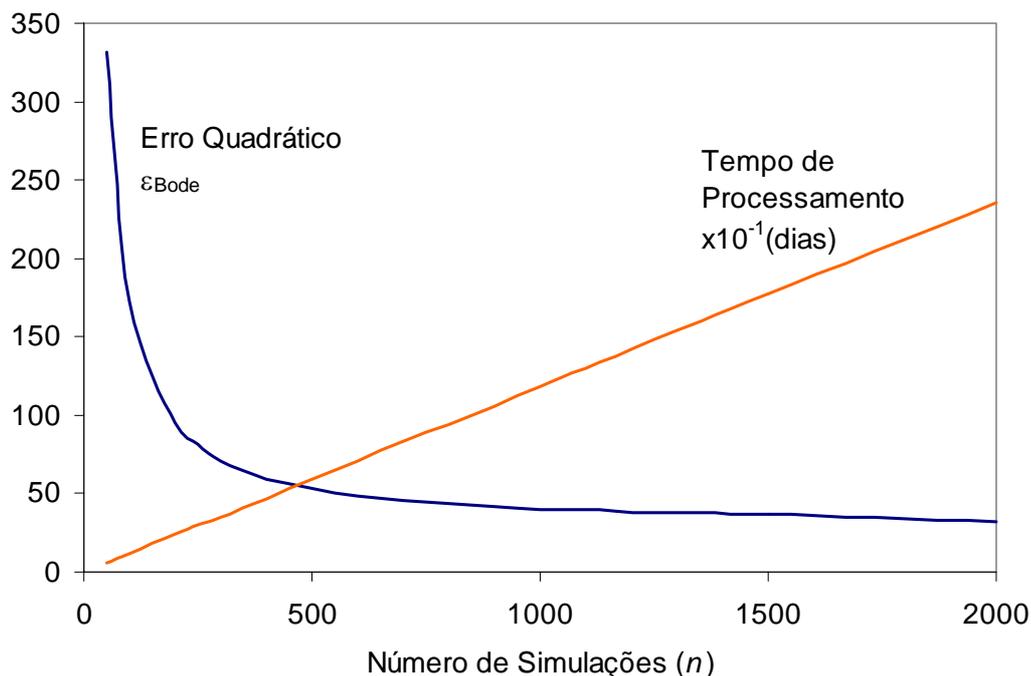


Figura 5.11 – Tempo de processamento e erro quadrático $\varepsilon_{\text{Bode}}$ versus número de simulações n

A equação (5.14) indica que, quando $n \rightarrow \infty$ vem $\varepsilon_{\text{Bode}} \rightarrow \infty$ e que quando $n \rightarrow 1$ vem $\varepsilon_{\text{Bode}} \rightarrow 2611.1$. Verifica-se que para $n = 500$ resulta $\varepsilon_{\text{Bode}} = 53,9$ pelo que se pode concluir que para um maior número de simulações a diminuição do valor do erro não é significativa. Apesar de não ser aqui representado, o $\varepsilon_{\text{polar}}$ tem um comportamento similar que conduzem a resultados e conclusões do mesmo tipo.

O tempo de processamento de cada simulação é de aproximadamente 17 minutos, com um processador Pentium 4 a 2,3 MHz. Como o tempo de processamento é directamente proporcional ao número de simulações, facilmente se conclui que o tempo de processamento para $n = 50$ simulações é de aproximadamente 0.6 dias e que para $n = 2000$ simulações é de aproximadamente 24 dias.

Nesta ordem de ideias, para $n = 500$ simulações fica demonstrado que é um bom compromisso entre o valor do erro e o tempo de processamento pelo que, no cálculo da STF considerou-se sempre uma amostra desse tamanho.

5.3.4 Cálculo da STF através da Média aritmética ou da Mediana

Na secção 5.3.1, onde se fez a descrição do algoritmo utilizado para o cálculo da STF, foi referido que podiam ser utilizados diversos índices estatísticos. Nesta secção faz-se uma comparação entre as vantagens da utilização da média aritmética e da mediana no cálculo da STF.

Nas experiências realizadas consideram-se os parâmetros de simulação e as condições de tráfego descritas na secção 5.3, isto é, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} , numa estrada com 1 faixa de rodagem com $l = 1000$ m.

No primeiro grupo de experiências utilizou-se a média para o cálculo da STF. Foram calculadas diferentes STF considerando diferentes amostras (*i.e.*, número de simulações tal que $50 \leq n \leq 2000$). Na figura 5.12, estão representadas as STF's considerando uma amostra de $n = 500$ simulações (figura 5.12 a)) e outra de $n = 1000$ simulações (figura 5.12 b)).

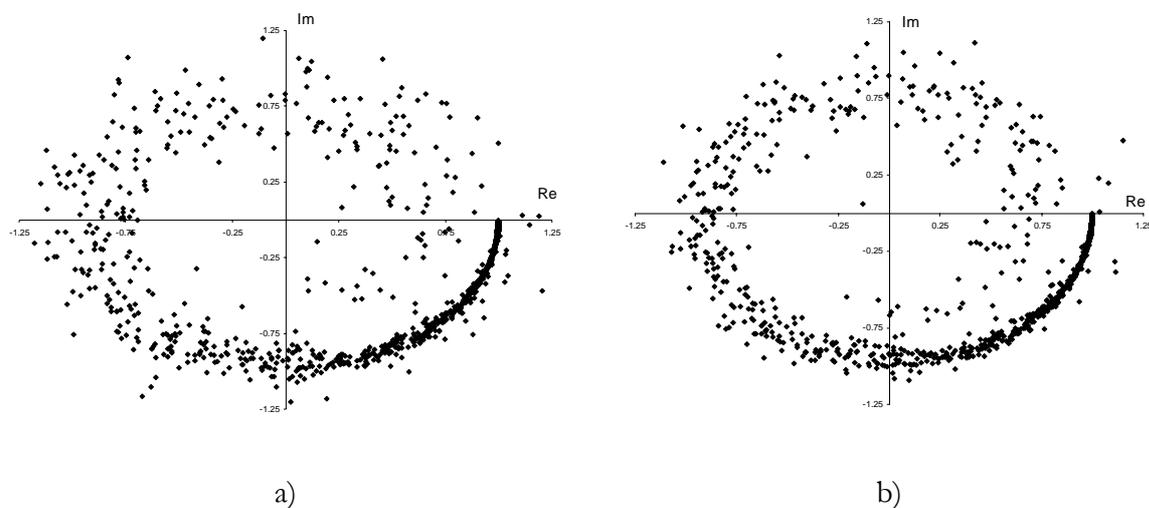


Figura 5.12 - Diagramas polares da STF para $\omega \in [0, 0.07]$ rad s^{-1} considerando a média para a) $n = 500$ e b) $n = 1000$ simulações, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_l = 1$, $l = 1000$ m e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

Conforme seria de esperar a convergência da STF é tanto melhor quanto maior for o número n de simulações (*i.e.*, da amostra). Por outro lado, verifica-se que no cálculo da STF, usando como índice estatístico a média, a variação do erro quadrático ϵ_{Bode} só deixa de ser significativa para $n \geq 1000$ simulações.

No segundo grupo de experiências utilizou-se a mediana para o cálculo da STF . Os procedimentos utilizados para o cálculo da STF através da mediana foram os mesmos que foram adoptadas para o cálculo da STF através da média. Na figura 5.13 a) está representada a STF para uma amostra de $n = 500$ simulações e na figura 5.13 b) a STF para uma amostra de $n = 1000$ simulações.

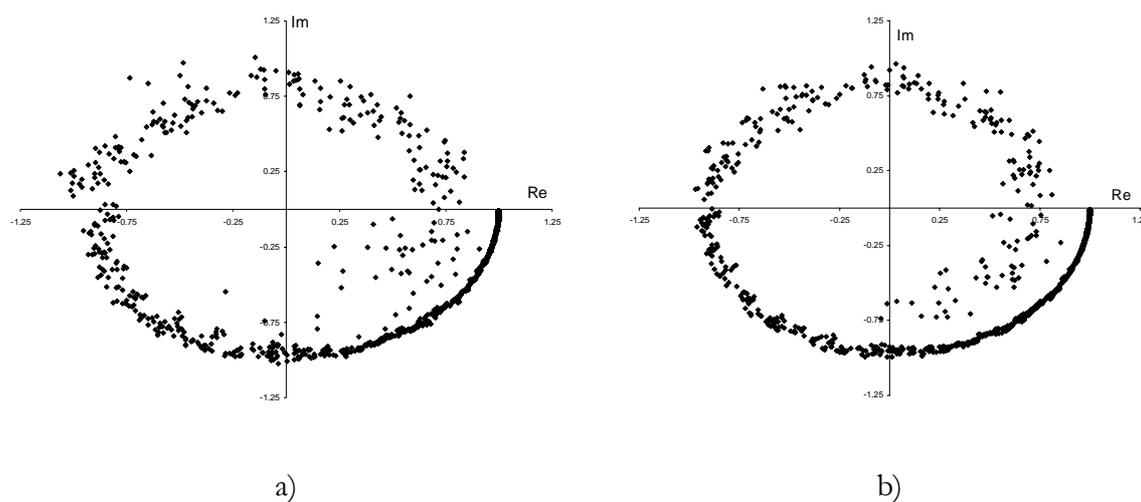


Figura 5.13 - Diagramas polares da STF para $\omega \in [0, 0.07]$ rad s^{-1} considerando a mediana para a) $n = 500$ e b) $n = 1000$ simulações, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $n_l = 1$, $l = 1000$ m e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

Tal como anteriormente, a convergência da STF calculada através da mediana é tanto melhor quanto maior for o número de simulações da amostra. No entanto, para o caso da STF calculada através da mediana a variação do erro quadrático ϵ_{Bode} só deixa de ser significativo para amostras com $n \geq 500$ simulações, conforme ficou demonstrado na secção 5.3.3.

Os resultados obtidos no cálculo da STF através da média aritmética e da mediana demonstraram que a utilização da mediana se revela mais vantajosa, uma vez que se consegue obter mais rapidamente uma convergência e, assim, requer amostras com um menor número de simulações.

5.3.5 Variação dos parâmetros da STF

A realização de diversas experiências numa estrada com uma faixa de rodagem (*i.e.*, $n_l = 1$), considerando diferentes condições de tráfego e comprimentos da estrada, permite concluir

que o parâmetro k_B se mantém constante e igual a 1, e que os parâmetros (τ, p, α) variavam com:

- a máxima variação de velocidade Δv ;
- a velocidade média v_{av} ;
- o comprimento da estrada l ;
- o fluxo de veículos no início da estrada $\phi_1(t;0)$.

Num primeiro grupo de experiências é analisada a evolução dos parâmetros (τ, p, α) quando se faz variar Δv no intervalo $5 < \Delta v < 40 \text{ km h}^{-1}$. Os restantes parâmetros de simulação considerados são: fluxo de veículos no início da estrada $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1}$, velocidade média $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$ e comprimento da estrada de $l = 1000 \text{ m}$. Os gráficos das figuras 5.14, 5.15 e 5.16 mostram a variação τ, p e α *versus* Δv , respectivamente.

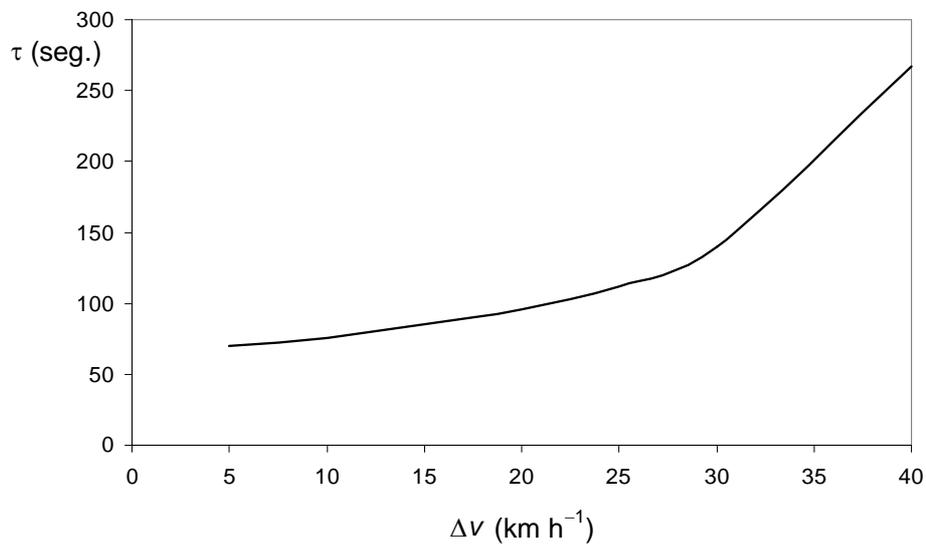


Figura 5.14 – Tempo de atraso τ *versus* Δv para $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_l = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1}$

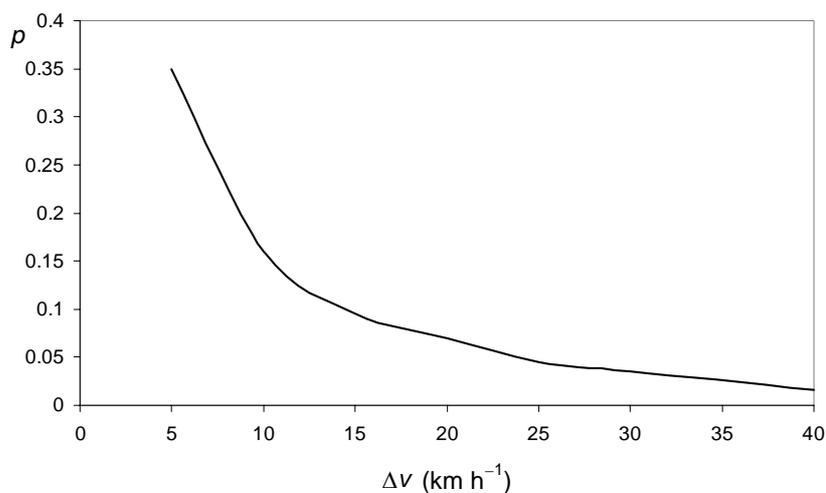


Figura 5.15 - Pólo p versus Δv para $v_{av} = 50$ km h⁻¹, $n_l = 1$, $l = 1000$ m e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s⁻¹

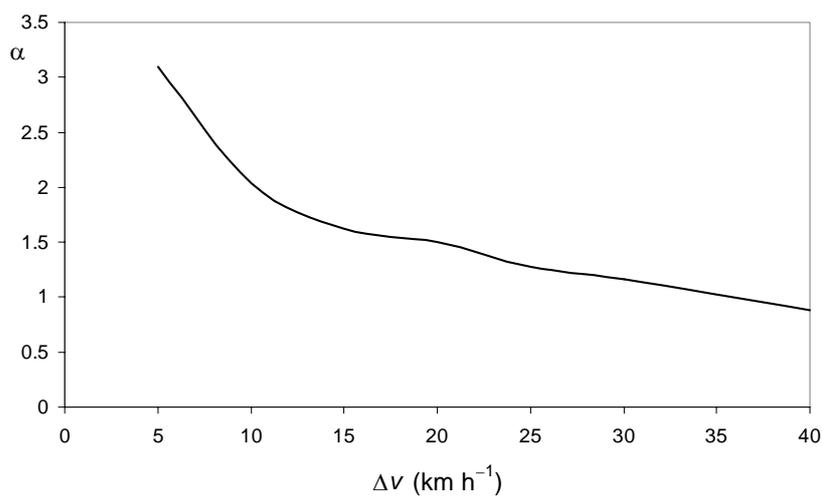


Figura 5.16 - Ordem fraccionária α versus Δv para $v_{av} = 50$ km h⁻¹, $n_l = 1$, $l = 1000$ m e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s⁻¹

É interessante verificar que a evolução de τ e p revela:

$$(\tau, p) \rightarrow \begin{cases} (\infty, 0) & \text{quando } \Delta v \rightarrow v_{av} \\ \left(\frac{l}{v_{av}}, \infty \right) & \text{quando } \Delta v \rightarrow 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

Os resultados obtidos são consistentes e estão de acordo com a realidade de um sistema de tráfego, pois:

- Quando $\Delta v \rightarrow 0$, significa que todos os veículos circulam à mesma velocidade. Como $p \rightarrow \infty$ de (5.11) resulta $T(s) \approx e^{-\tau s}$ o que sugere a existência de um sistema com um atraso puro de transporte, podendo o valor do atraso ser calculado através da expressão $\tau = l/v_{av}$.
- Quando $\Delta v \rightarrow v_{av}$, significa que podem existir alguns veículos com velocidade nula ou muito próxima de zero. Neste caso $p \rightarrow 0$ e $\tau \rightarrow \infty$, pelo que de (5.11) resulta $T(s) \approx 0$, significando que existem veículos a bloquear a passagem e, assim, impedindo a circulação dos restantes veículos.

Num segundo grupo de experiências é analisada a evolução dos parâmetros (τ, p, α) quando se faz variar v_{av} no intervalo $30 < v_{av} < 100 \text{ km h}^{-1}$. Os restantes parâmetros de simulação considerados são: fluxo de veículos no início da estrada $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , máxima variação de velocidade $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$ e comprimento da estrada de $l = 1000 \text{ m}$. Os gráficos das figuras 5.17, 5.18 e 5.19 mostram respectivamente a variação τ, p e α versus v_{av} .

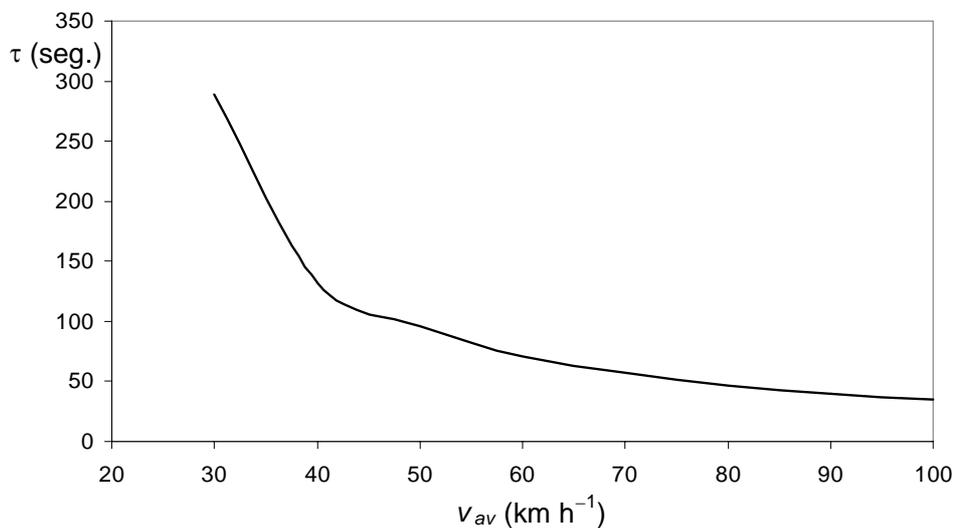


Figura 5.17 – Tempo de atraso τ versus v_{av} para $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $n_j = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}

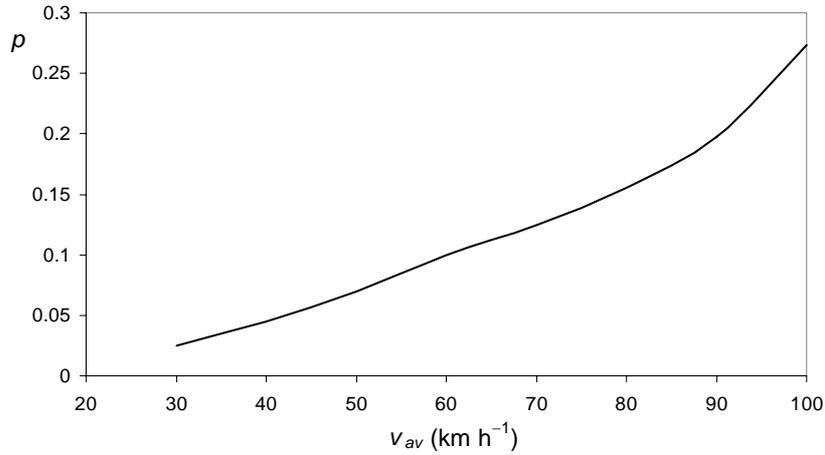


Figura 5.18 - Pólo p versus v_{av} para $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $n_l = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_l(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}

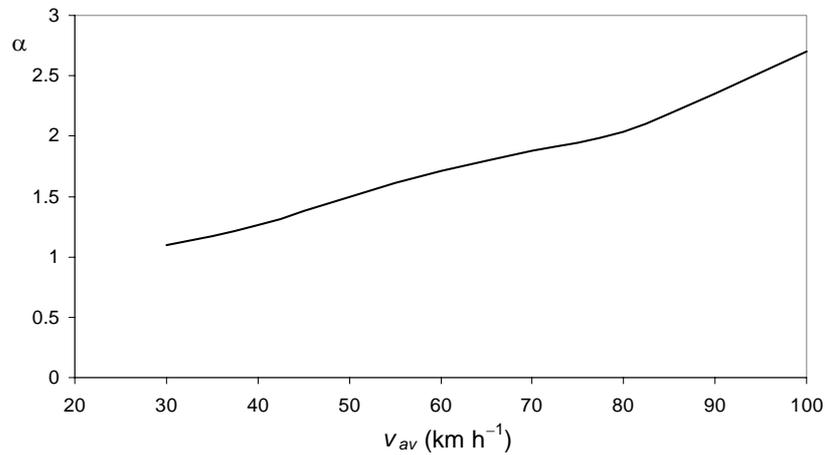


Figura 5.19 - Ordem fraccionária α versus v_{av} para $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $n_l = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_l(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}

De igual forma, analisando a evolução de τ e p conclui-se que:

$$(\tau, p) \rightarrow \begin{cases} (\infty, 0) & \text{quando } v_{av} \rightarrow \Delta v \\ (0, \infty) & \text{quando } v_{av} \rightarrow \infty \end{cases} \quad (5.16)$$

Os resultados obtidos podem, também, ter uma interpretação intuitiva similar à anterior:

- Quando $v_{av} \rightarrow \Delta v$ significa que podem existir alguns veículos com velocidade nula. Como $p \rightarrow 0$ e $\tau \rightarrow \infty$, de (5.11) resulta $T(x) \approx 0$, o que significa que existem veículos a bloquear a passagem impedindo, assim, a circulação dos restantes veículos.

- Quando $v_{av} \rightarrow \infty$, encontra-se uma situação que só faz sentido analisar em termos teóricos, uma vez que significa que poderiam existir veículos com uma velocidade infinita. Como $p \rightarrow \infty$ e $\tau \rightarrow 0$, de (5.11) resulta $T(s) \approx 1$, significando que no caso extremo dos veículos poderem circular a uma velocidade infinita não existiria qualquer atraso no transporte.

Analisando os resultados obtidos para o parâmetro correspondente à ordem fraccionária α pode encontrar-se uma expressão que relaciona α com a velocidade média v_{av} , e com a máxima variação de velocidade Δv . Assim, para $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$ a variação de α com a velocidade média v_{av} , pode ser aproximado por:

$$\alpha(v_{av}) \Big|_{\Delta v=20} \approx 0.792 e^{0.0122 v_{av}} \quad (5.17)$$

Por outro lado, para $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$ a variação de α com a máxima variação de velocidade Δv , pode ser aproximada por:

$$\alpha(\Delta v) \Big|_{v_{av}=50} \approx 7.63 \Delta v^{-0.563} \quad (5.18)$$

Obtendo-se, desta forma, as expressões relacionam a variação de α com a velocidade média v_{av} e com a máxima variação de velocidade Δv , para uma estrada com uma faixa de rodagem $n_l = 1$ e comprimento $l = 1000 \text{ m}$.

5.4 Análise dinâmica de uma estrada com várias faixas de rodagem

Nesta secção faz-se uma análise ao comportamento dinâmico de um sistema de tráfego considerando, num primeiro caso, uma estrada com duas faixas de rodagem ($n_l = 2$) e num segundo caso uma estrada com três faixas de rodagem ($n_l = 3$).

5.4.1 Análise dinâmica de uma estrada com duas faixas de rodagem

Para facilitar a comparação com os resultados obtidos nas experiências realizadas anteriormente, neste grupo de experiências consideram-se condições de tráfego idênticas, alterando-se apenas o número de faixas de rodagem da estrada, conforme se indica na figura 5.20. Assim, o fluxo de entrada em ambas as faixas de rodagem é de $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $k = 1,2$, o comprimento da estrada é de $l = 1000$ m e a máxima variação de velocidade $\Delta v = 20$ km h^{-1} .

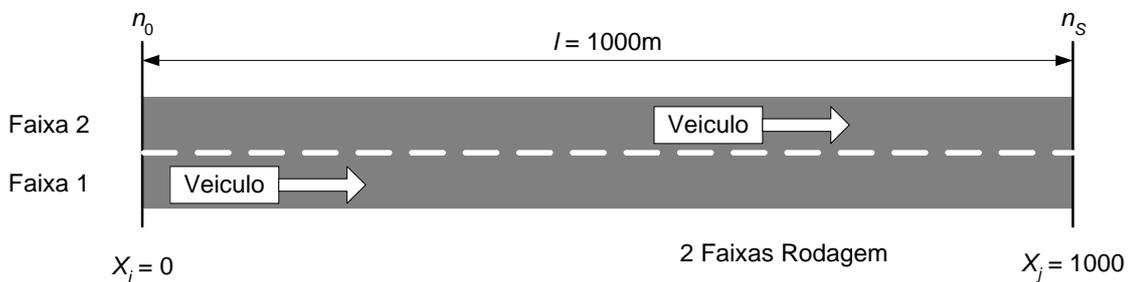


Figura 5.20 - Estrada com 2 faixas de rodagem ($n_l = 2$)

Neste caso existe dois fluxos de entrada ($\Phi_1(s;0)$ e $\Phi_2(s;0)$) e dois fluxos de saída ($\Phi_1(s;1000)$ e $\Phi_2(s;1000)$), resultando quatro possíveis FTs, ou seja, uma matriz de transferência de dimensão 2×2 .

Os valores das quatro funções de transferência são determinados através do cálculo matricial dado pela expressão:

$$\begin{bmatrix} G_{1,1}(s;1000,0) & G_{1,2}(s;1000,0) \\ G_{2,1}(s;1000,0) & G_{2,2}(s;1000,0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_1^1(s;1000) & \Phi_2^1(s;1000) \\ \Phi_1^2(s;1000) & \Phi_2^2(s;1000) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_1^1(s;0) & \Phi_2^1(s;0) \\ \Phi_1^2(s;0) & \Phi_2^2(s;0) \end{bmatrix}^{-1} \quad (5.19)$$

onde,

$G_{r,k}(s;1000,0)$ Função de Transferência com o fim ($x = 1000$ m) da faixa r e o início ($x = 0$ m) da faixa k

$\Phi_k^n(s;0)$ Transformada de Laplace do fluxo de tráfego no início ($x = 0$ m) da faixa k para a simulação n

$\Phi_k^n(s;1000)$ Transformada de Laplace do fluxo de tráfego no fim ($x = 1000$ m) da faixa k para a simulação n

Para o caso de uma estrada com 2 faixas de rodagem, é necessário realizar o dobro das simulações resultando, nas presentes condições, a necessidade de executar 2×500 simulações.

Na figura 5.21, está representado o gráfico das amplitudes do diagrama de Bode de $T_{1,1}(s;1000,0)$ e $T_{1,2}(s;1000,0)$ considerando uma velocidade média $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$ em ambas as faixas de rodagem (*i.e.*, $v_k(t;0) \in [30, 70] \text{ km h}^{-1}$, $k = 1,2$).

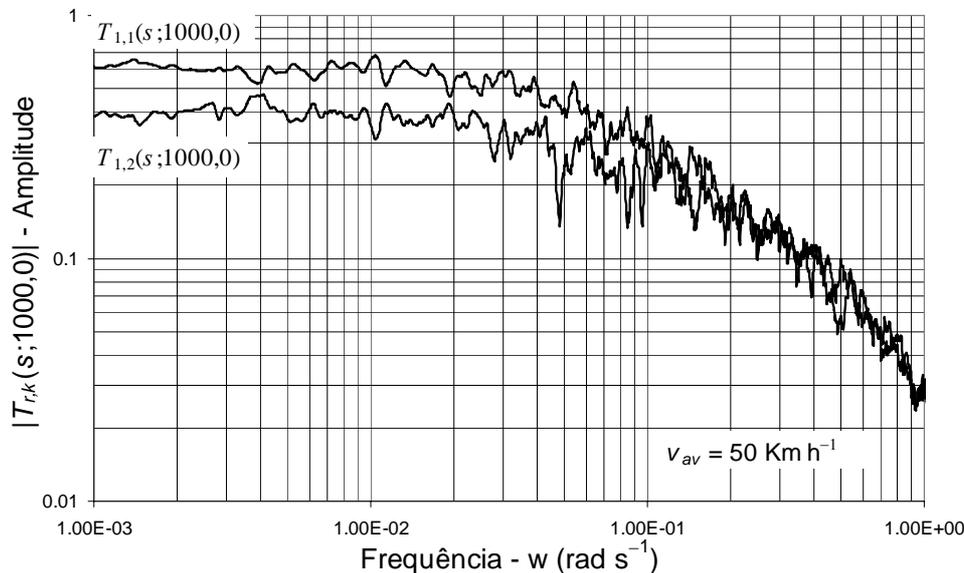


Figura 5.21 - Diagrama de Bode das amplitudes de $T_{1,k}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_l = 2$, $l = 1000$ m, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1}$, $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $k = 1,2$

Constata-se que $T_{1,1}(s;1000,0) \approx T_{2,2}(s;1000,0)$ o que se justifica pelo facto da simulação considerar condições operacionais idênticas para as duas faixas de rodagem. Verifica-se também que $T_{1,2}(s;1000,0) \approx T_{2,1}(s;1000,0)$, ou seja que o fluxo de veículos que passa da faixa de rodagem 1 para a 2 é aproximadamente igual ao fluxo de veículos que passa da faixa de rodagem 2 para a 1. Este comportamento deve-se ao facto de no modelo de mudança de faixa (*lane changing*) adoptado pelo SITS, cada veículo depois de efectuar uma manobra de mudança de faixa tenta, sempre que é possível, voltar para a faixa inicial. Por outras palavras, na simulação não foram consideradas condições do foro do código da estrada que privilegia a faixa da direita.

A figura 5.22 a) e b) representa, respectivamente a STF de $T_{1,1}(s;1000,0)$ e de $T_{2,2}(s;1000,0)$.

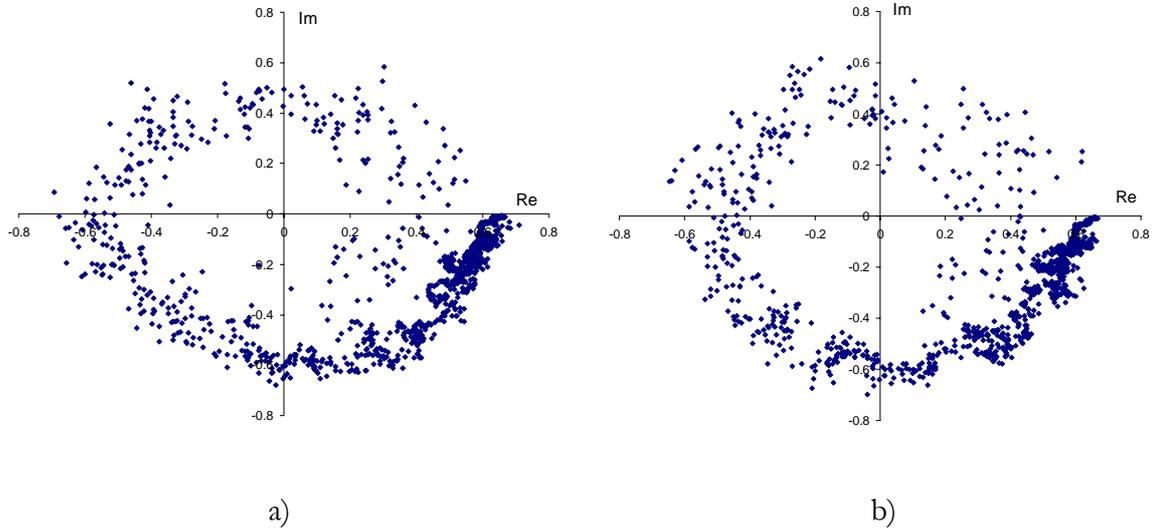


Figura 5.22 - Diagrama Polar da STF para $\omega \in [0, 0.07]$ rad s^{-1} de a) $T_{1,1}(s;1000,0)$ e b) $T_{2,2}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50$ km h^{-1} , $n_l = 2$, $l = 1000$ m, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20$ km h^{-1}

Na figura 5.23 está representado a amplitude do diagrama de Bode das $STFs$ de $T_{1,1}(s;1000,0)$ e de $T_{1,2}(s;1000,0)$, considerando as mesmas condições de tráfego da simulação anterior alterando apenas a velocidade média $v_{av} = 90$ km h^{-1} , ou seja, tal que $v_k(t;0) \in [70, 110]$ km h^{-1} $k = 1,2$.

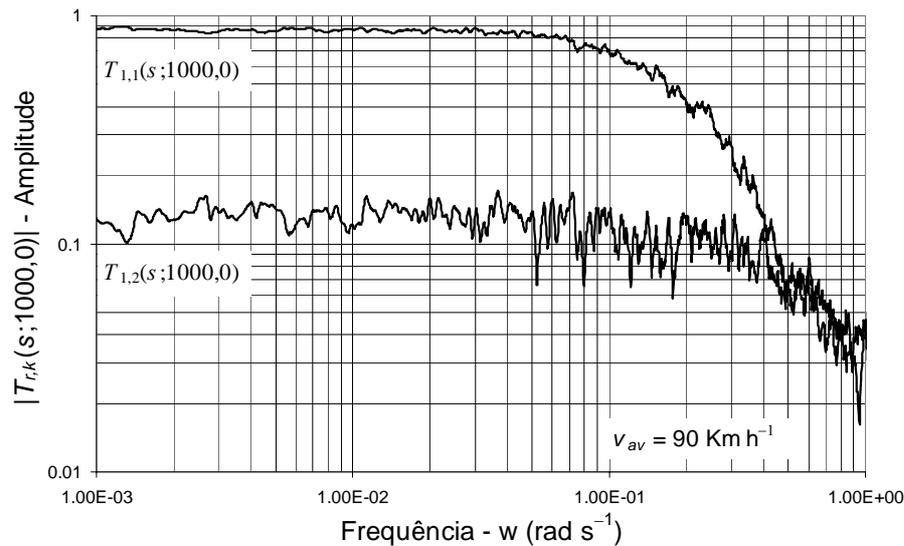


Figura 5.23 - Diagrama Bode de $T_{l,k}(s;1000,0)$ $v_{av} = 90$ km h^{-1} , $n_l = 2$, $l = 1000$ m, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20$ km h^{-1} , $k = 1,2$

Comparando as figuras 5.21 e 5.23 conclui-se que os elementos da matriz de transferência variam significativamente com a velocidade média v_{av} . Assim, verifica-se que $T_{1,2}(s;1000,0) \approx T_{2,1}(s;1000,0) \rightarrow 0$, ou seja, que quanto maior for v_{av} tanto menor é o fluxo de veículos que muda de faixa de rodagem e que, assim, não consegue retornar à faixa inicial.

A variação dos parâmetros da STF para o caso de uma estrada com duas faixas de rodagem ($n_l = 2$) tem um comportamento idêntico ao do caso de uma estrada com uma faixa de rodagem ($n_l = 1$). Por outras palavras, os parâmetros (k_B, τ, p, α) têm uma evolução do mesmo tipo com a máxima variação de velocidade Δv , a velocidade média v_{av} , o comprimento da estrada l e o fluxo de veículos no início da estrada $\phi_1(t;0)$. As figuras 5.24, 5.25 e 5.26, mostram a evolução dos parâmetros de k_B, p e α de $T_{1,1}(s;1000,0)$, para diferentes valores de v_{av} e considerando um comprimento de estrada de $l = 1000$ m e uma máxima variação de velocidade $\Delta v = 20$ km h⁻¹.

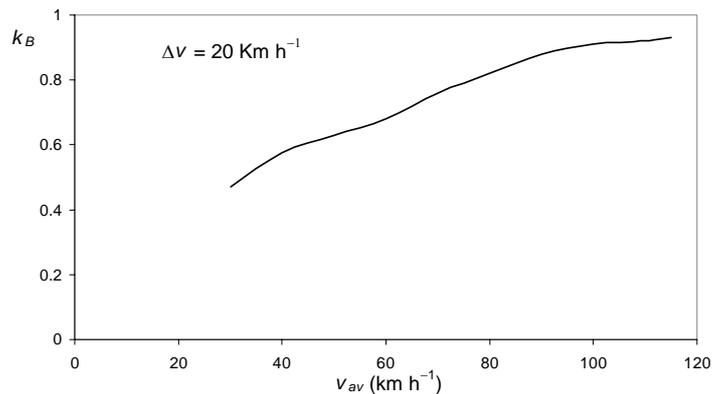


Figura 5.24 - Parâmetro k_B de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus v_{av} para $n_l = 2$, $l = 1000$ m e $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s⁻¹

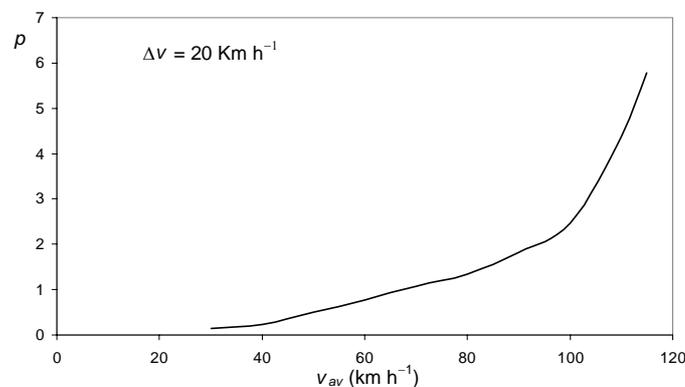


Figura 5.25 - Parâmetro p de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus v_{av} para $n_l = 2$, $l = 1000$ m e $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s⁻¹

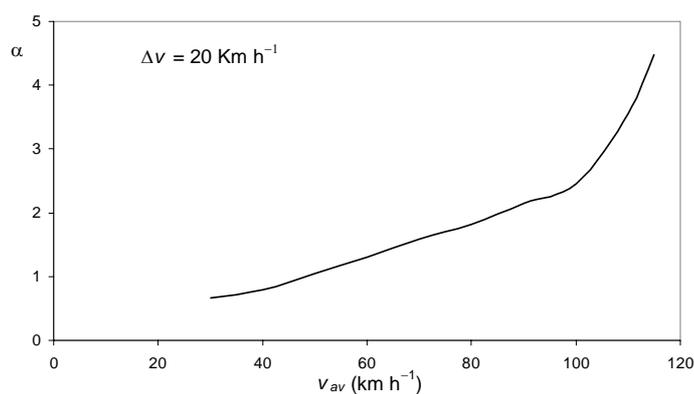


Figura 5.26 - Parâmetro α de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus v_{av} para $n_l = 2$, $l = 1000$ m e $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} .

As figuras 5.27, 5.28 e 5.29, mostram a evolução dos parâmetros de k_B , p e α de $T_{1,1}(s;1000,0)$, para diferentes valores de Δv , considerando um comprimento de estrada de $l = 1000$ m e uma máxima variação de velocidade $v_{av} = 50$ $km\ h^{-1}$

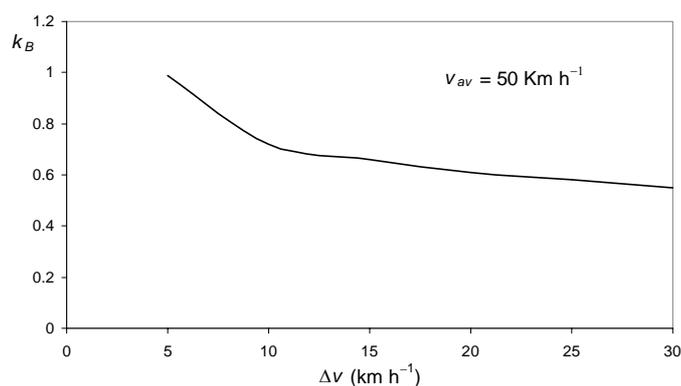


Figura 5.27 - Parâmetro k_B de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus Δv para $n_l = 2$, $l = 1000$ m e $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}

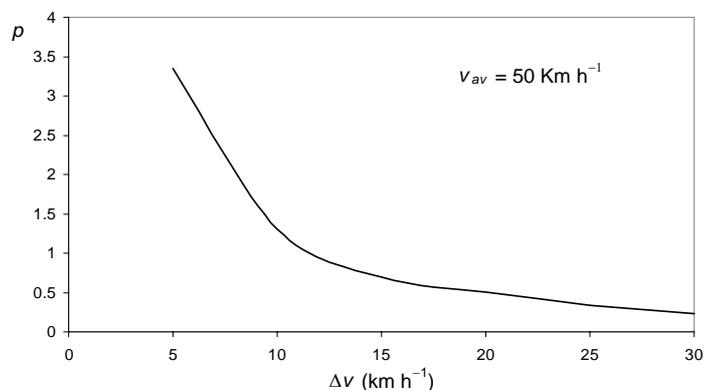


Figura 5.28 - Parâmetro p de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus Δv para $n_l = 2$, $l = 1000$ m e $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}

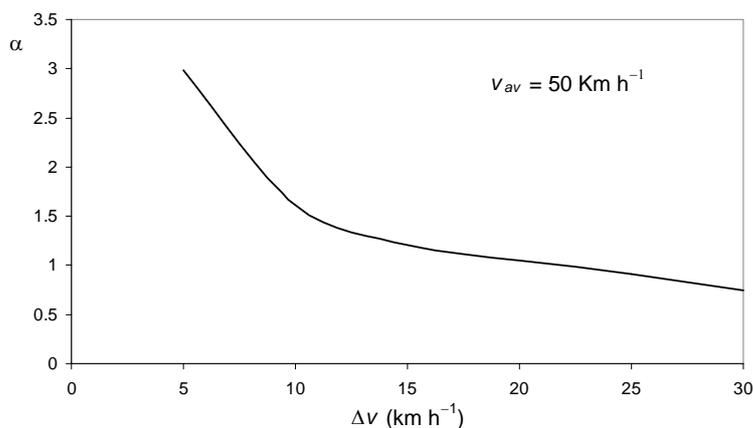


Figura 5.29 - Parâmetro α de $T_{1,1}(s;1000,0)$ versus Δv para $n_l = 2$, $l = 1000$ m e $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s⁻¹

Repetindo o procedimento feito anteriormente, neste caso pode-se obter também uma expressão que relaciona o parâmetro α de $T_{1,1}(s;1000,0)$ com a velocidade média v_{av} , a máxima variação de velocidade Δv , o número de faixas de rodagem n_l e o comprimento l . Assim, a variação de α em função da velocidade média v_{av} , para $\Delta v = 20$ km h⁻¹, pode ser aproximado por:

$$\alpha(v_{av}) \Big|_{\Delta v=20} \approx 0.292 e^{0.023 v_{av}} \quad (5.20)$$

Para o caso da variação do parâmetro α em função da máxima variação de velocidade Δv , para $v_{av} = 50$ km h⁻¹, obtêm-se a expressão:

$$\alpha(\Delta v) \Big|_{v_{av}=50} \approx 31.97 \Delta v^{-1.4} \quad (5.21)$$

As expressões (5.20) e (5.21) relacionam a variação do parâmetro α de $T_{1,1}(s;1000,0)$, respectivamente, com a velocidade média v_{av} e com a máxima variação de velocidade Δv , para uma estrada com duas faixas de rodagem $n_l = 2$ e comprimento $l = 1000$ m.

5.4.2 Análise dinâmica de uma estrada com 3 faixas de rodagem

Neste grupo de experiências, tal como anteriormente, para facilitar a comparação com os resultados obtidos nas experiências realizadas nas secções anteriores, consideram-se condições de tráfego idênticas, alterando-se apenas o número de faixas de rodagem da estrada, conforme

se indica na figura 5.30. Assim, consideram-se três faixas de rodagem ($n_l = 3$), o fluxo de entrada em ambas as faixas de rodagem é de $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $k = 1,2,3$, o comprimento da estrada é de $l = 1000$ m e a máxima variação de velocidade $\Delta v = 20$ km h^{-1} .

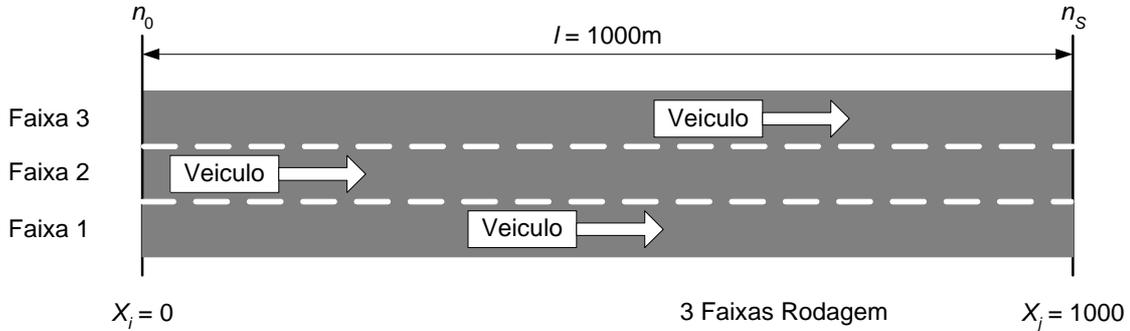


Figura 5.30 - Estrada com 3 faixas de rodagem ($n_l = 3$)

A matriz de transferência de dimensão 3×3 envolve nove funções de transferência, cujos valores são determinadas através de um cálculo matricial similar ao efectuado para o caso da estrada com 2 faixas de rodagem de acordo com a expressão (5.19). Assim, é necessário realizar três grupos de simulações para se obterem as funções de transferência e, para que a convergência da *STF* tenha um comportamento idêntico ao caso inicial, é necessário realizar 3×500 simulações.

Na figura 5.31, está representado o gráfico das amplitudes do diagrama de Bode de $T_{1,1}(s;1000,0)$, $T_{1,2}(s;1000,0)$ e $T_{1,3}(s;1000,0)$ considerando uma velocidade média $v_{av} = 50$ km h^{-1} nas três faixas de rodagem, ou seja, que $v_k(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} , $k = 1,2,3$.

Verifica-se que $T_{1,1}(s;1000,0) \approx T_{3,3}(s;1000,0)$, $T_{1,2}(s;1000,0) \approx T_{3,2}(s;1000,0)$ e $T_{1,3}(s;1000,0) \approx T_{3,1}(s;1000,0)$ sendo que, também neste caso, esta propriedade justifica-se pelo facto de na simulação se considerarem idênticas condições operacionais para as três faixas de rodagem.

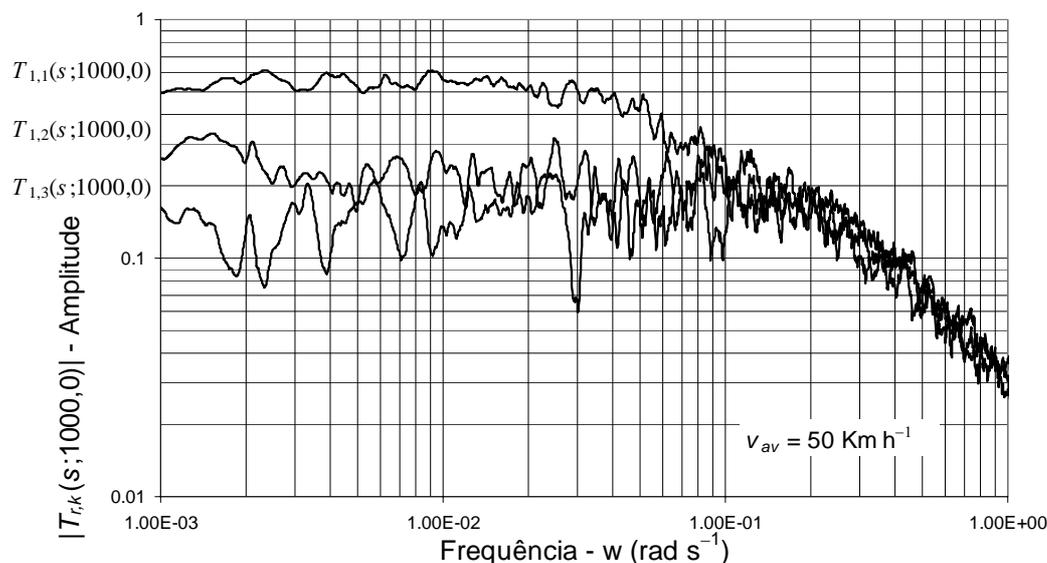


Figura 5.31 - Diagrama Bode de $T_{1,k}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_l = 3$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1}$, $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $k = 1,2,3$

Nesta secção não foi efectuada uma análise detalhada sobre a evolução dos parâmetros k_B , p e α para diferentes valores de máxima variação de velocidade Δv e de velocidade média v_{av} devido ao tempo necessário para tal não ser comportável pelo tempo disponível para a realização deste trabalho. No entanto, realizaram-se algumas experiências que sugerem uma variação dos parâmetros k_B , p e α com um comportamento similar ao dos casos analisados nas secções anteriores.

5.4.3 Análise do resultados obtidos

As experiências anteriores, considerando estradas com várias faixas de rodagem e diferentes condições de tráfego, permitem tirar as seguintes conclusões relativamente ao comportamento da STF e à variação dos seus parâmetros k_B , τ , p e α :

- i. considerando que o mesmo fluxo de entrada $\phi_k(t;0)$ em todas as faixas de rodagem, verifica-se que o atraso τ na STF é independente do número de faixas n_l
- ii. para um conjunto fixo de parâmetros temos para cada STF :

$$\text{Ganho} \times \text{Largura de banda} = \text{constante}$$

- iii. para cada linha da matriz de transferência, a soma dos ganhos da STF é igual a 1
- iv. a matriz de transferência é simétrica
- v. Os ganhos e os pólos dos elementos da diagonal principal da matriz STF são similares.
- vi. α aumenta com v_{av} . No entanto, aumentando o número de faixas diminui o efeito do filtro passa baixo, ou seja diminui o valor de α .

Com base nestas conclusões pode afirmar-se que o modelo para análise dinâmica proposto, com base nos resultados gerados pelo simulador de tráfego microscópico SITS, conduz à obtenção de resultados compatíveis com o conhecimento e a experiência existente na teoria dos sistemas clássica. Além disso, é de realçar também que, a adopção do cálculo fraccionário para a representação das características dinâmicas da variação contínua do sistema de tráfego, constituiu uma opção adequada pois traduziu-se em resultados coerentes e em expressões analíticas simultaneamente simples e adaptáveis às diferentes experiências.

5.5 Análise do tráfego de veículos através da Entropia

Nesta secção pretende-se efectuar uma análise complementar, nomeadamente no que concerne à interferência entre veículos que circulam na mesma faixa de rodagem. Para tal, foi efectuada uma simulação no SITS considerando uma estrada com uma faixa de rodagem e comprimento $l = 1000$ m. Ao longo da estrada foram colocados 21 sensores com espaçamento entre eles de 50 m, ficando s_1 no início ($x = 0$) e s_{21} no fim da estrada ($x = 1000$). Foram ainda definidas as seguintes condições de tráfego no início da estrada: fluxo de veículos $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e velocidade dos veículos $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} . A simulação termina depois de se ter registado o comportamento individual de $n_p = 2000$ veículos.

A figura 5.32 mostra a relação entre o número observado de veículos n_i (ou seja, a frequência absoluta), a coordenada do sensor na estrada x e a velocidade dos veículos v .

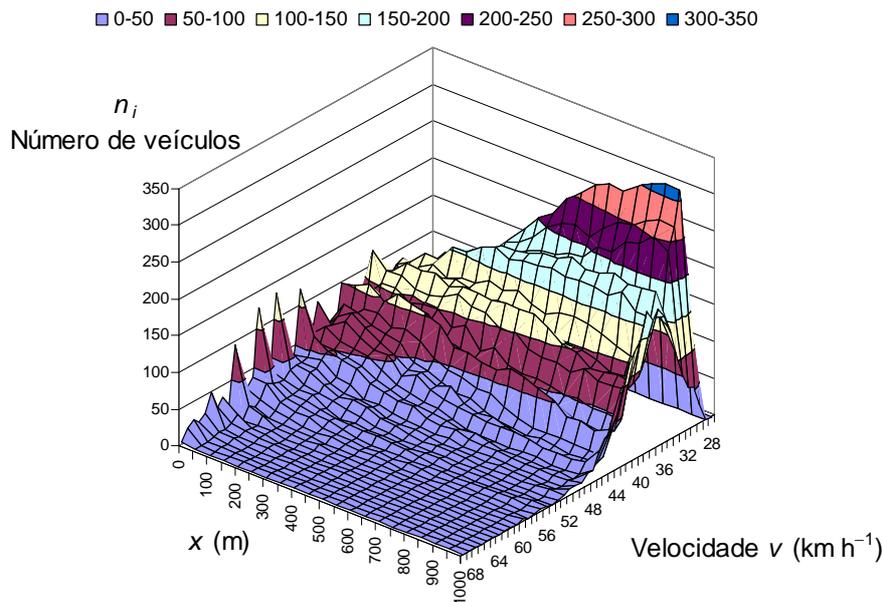


Figura 5.32 – Número observado de veículos n_i versus velocidade v e posição do sensor x , considerando uma estrada com uma faixa de rodagem, $\phi_i(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_i(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

Conforme se pode observar, uma vez colocados na mesma faixa de rodagem, os veículos interferem uns com os outros, devido ao facto de terem velocidades diferentes. Por isso resulta uma progressiva diminuição da velocidade média no final da estrada, devido aos veículos mais rápidos terem que diminuir de velocidade sempre que existam veículos mais lentos à sua frente. Para o caso em análise verifica-se uma velocidade média no início da estrada de aproximadamente 49 km h^{-1} baixando este valor para aproximadamente 36 km h^{-1} na parte final da estrada.

Uma forma complementar de analisar a evolução do tráfego de veículos ao longo de uma estrada poderá ser feito através da entropia H (Figueiredo *et al.*, 2004 a)). A entropia permite quantificar a dispersão de velocidades verificada num determinado ponto da estrada, sendo esta calculada através da seguinte fórmula:

$$H(x) = \frac{1}{N} \sum_i f_i \ln(f_i) \quad (5.22)$$

e,

$$f_i = n_i/N \quad (5.23)$$

onde:

n_i é a frequência absoluta, ou seja o número total de veículos que circulam à mesma velocidade.

N é número total de veículos da simulação

Como foi referido anteriormente, o número total de veículos simulados foi de $N = 2000$.

A figura 5.33, mostra a evolução da entropia ao longo da estrada considerando as condições de simulação e de tráfego utilizadas na experiência anterior.

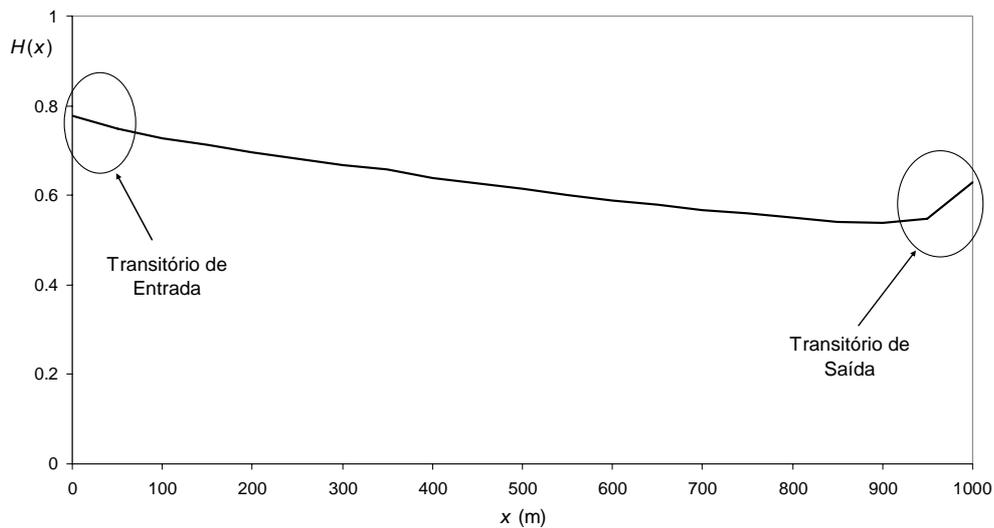


Figura 5.33 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

Observando o gráfico da figura 5.33, verifica-se que a entropia decresce ao longo da estrada. Como já foi dito, os veículos mais rápidos têm que diminuir a sua velocidade fazendo-a coincidir com a velocidade dos veículos mais lentos, pelo que a dispersão de velocidades (e, conseqüentemente, a entropia) tende a diminuir ao longo da estrada. Da análise do gráfico verifica-se também a ocorrência de dois transitórios, um de entrada e outro de saída. O transitório de entrada deve-se à influência que o último veículo inserido na estrada exerce sobre o comportamento do veículo que pretende entrar na estrada. Este facto, pode fazer com

que o SITS tenha que reduzir a velocidade previamente atribuída⁴. O transitório de saída é consequência da saída dos veículos da estrada pois, desta forma, o veículo que abandona a estrada liberta espaço deixando de exercer influência sobre o veículo que circula atrás dele. Assim, o veículo seguinte pode aumentar a sua velocidade por forma a coincidir com a velocidade que lhe foi previamente atribuída.

Nas subsecções seguintes é feita uma análise à variação da entropia considerando diferentes parâmetros de simulação, tais como: diferentes comprimentos de estrada, diferentes intervalos de máxima variação de velocidade, várias faixas de rodagem e uma faixa de rodagem com rampa de acesso.

5.5.1 Entropia versus comprimento da estrada

Para analisar a evolução da entropia com diferentes comprimentos de estrada, são realizadas duas experiências: uma com uma estrada com comprimento $l = 5000$ m e outra com $l = 10000$ m. As restantes condições de simulação e de tráfego mantêm-se inalteradas, ou seja, considera-se uma estrada com uma faixa de rodagem e um fluxo e velocidade dos veículos no início da estrada de $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$.

A figura 5.34 mostram a variação da entropia para o caso de estradas com comprimentos de $l = 5000$ m e $l = 10000$ m.

Os resultados obtidos permitem concluir que a entropia no fim da estrada é tanto menor quanto maior for o seu comprimento. Pode deduzir-se que, adoptando as condições de tráfego estabelecidas para esta experiência numa estrada de comprimento infinito o valor da entropia no fim da estrada teria o valor zero. Este fenómeno corresponderia, em termos de condições de tráfego, a ter todos veículos a circular à mesma velocidade, ou seja a dispersão de velocidade seria nula. Importa também referir que o transitório de saída é tanto maior quanto maior for o comprimento da estrada.

⁴ Gerada de forma aleatória de acordo com uma distribuição de probabilidade uniforme especificada pelos parâmetros v_{av} e Δv .

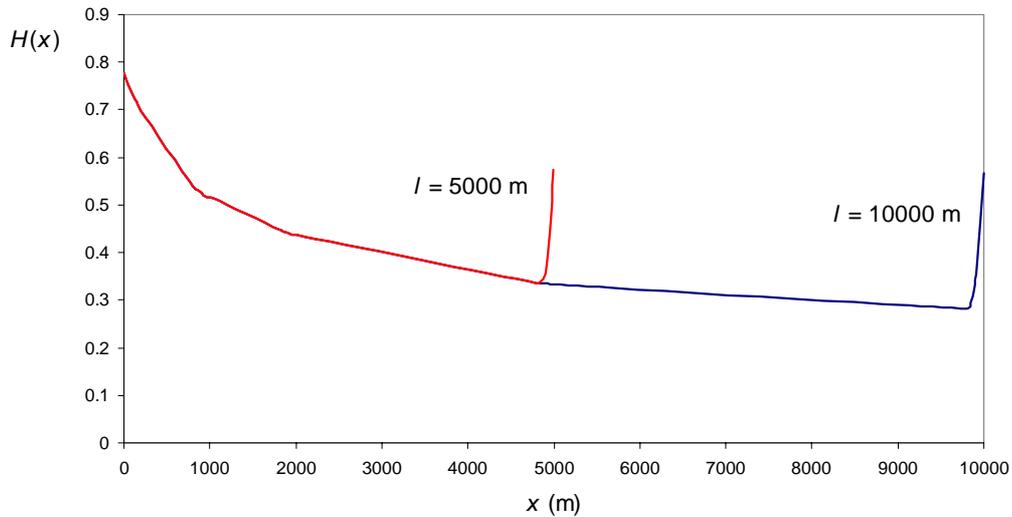


Figura 5.34 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 5000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$

5.5.2 Entropia versus máxima variação de velocidade

Nesta subsecção pretende-se analisar a variação da entropia considerando diferentes intervalos de máxima variação de velocidade. Para tal, realizou-se um conjunto de experiências onde se estabelece uma velocidade média $v_{av} = 50$ $km\ h^{-1}$ com intervalos de variação de velocidade no início da estrada de: $v_1(t;0) \in [20,80]$, $v_1(t;0) \in [30, 70]$, $v_1(t;0) \in [40, 60]$, $v_1(t;0) \in [45, 55]$ e $v_1(t;0) \in [48, 52]$ $km\ h^{-1}$, tomando uma estrada com uma faixa de rodagem e comprimento $l = 1000$ m.

Os resultados obtidos estão representados na figura 5.35. Verifica-se que, para pequenas variações de velocidade, a entropia mantém-se aproximadamente constante em todos os pontos da estrada, sendo os transitórios de entrada e saída quase imperceptíveis. Isto é justificável pelo facto de, neste caso, os veículos terem velocidades muito próximas uns dos outros, o que leva a que as interferências entre eles sejam pouco significativas.

Por outro lado, para variações de velocidade mais elevadas, a variação da entropia ao longo da estrada é mais acentuada, devido ao facto de no início da estrada a dispersão de velocidades ser maior.

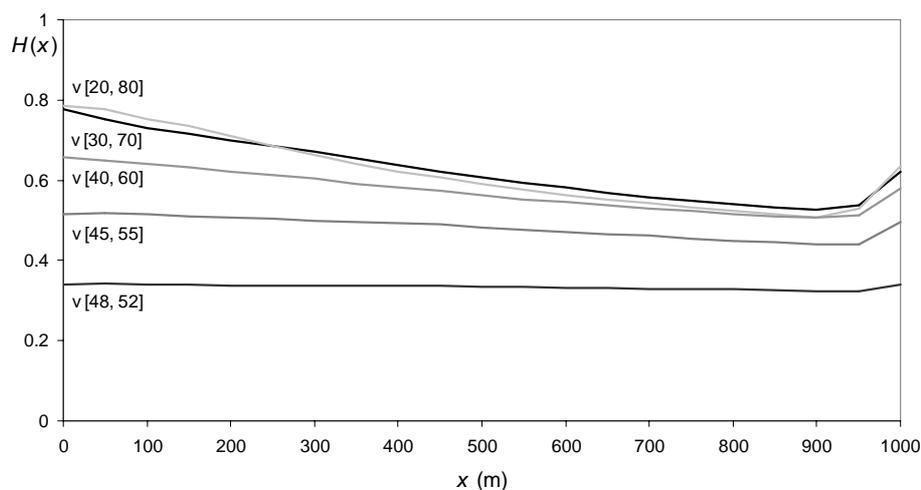


Figura 5.35 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_{av} = 50$ km h^{-1}

5.5.3 Entropia versus estrada com uma e três faixas de rodagem

Nesta secção são realizadas duas experiências com o objectivo de analisar a variação da entropia ao longo da estrada. Uma primeira experiência considerando uma estrada com uma faixa de rodagem e uma segunda com uma estrada com três faixas de rodagem. Considerou-se ainda o fluxo e a velocidade dos veículos no início da estrada de $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} , para estradas de comprimento $l = 1000$ m.

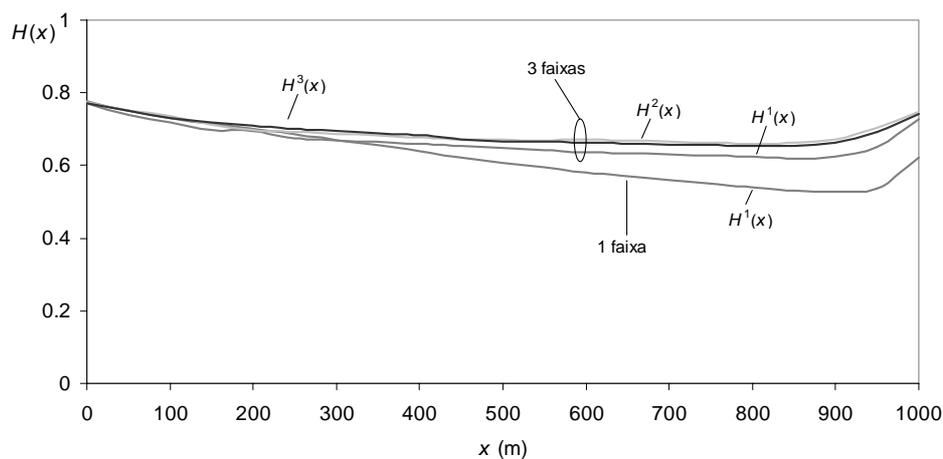


Figura 5.36 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para estradas com uma e três faixas de rodagem, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_k(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} , $k = 1, 2, 3$

O gráfico da figura 5.36 mostra os resultados onde $H^k(x)$ representa a entropia na faixa $k = 1, 2, 3$. Verifica-se que, no início da estrada, a entropia tem aproximadamente o mesmo valor para ambas as situações; no entanto, para $x > 500$ m, a entropia, no caso de uma estrada com uma faixa de rodagem, decresce mais rapidamente, do que no caso de uma estrada com três faixas de rodagem. Este fenómeno ocorre porque o SITS, para estradas com mais do que uma faixa de rodagem, utiliza um modelo de mudança de faixa (*lane changing*), que permite aos veículos que pretendem circular a uma velocidade mais elevada possam mudar de faixa de rodagem. Para o caso de uma estrada com três faixas de rodagem verifica-se também que a entropia para as duas faixas mais à esquerda ($k = 2, 3$) decresce mais lentamente do que na faixa de rodagem da direita, isto acontece porque o modelo *lane changing* do SITS tenta sempre que possível, que as ultrapassagens se façam pela esquerda.

5.5.4 Entropia versus estrada com uma faixa e uma rampa de acesso

Na última experiência desta secção pretende-se analisar a variação da entropia para o caso de uma estrada com uma faixa de rodagem e um ramal de acesso, cuja configuração e dimensões se encontram representadas na figura 5.38:

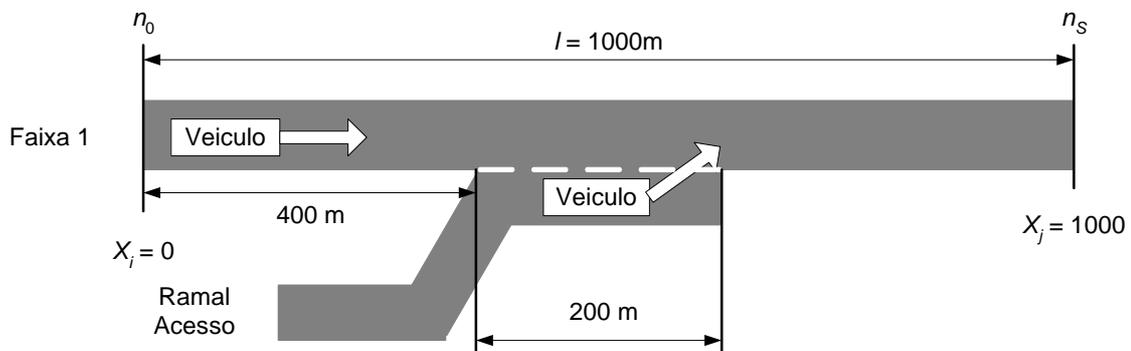


Figura 5.37 - Estrada com uma faixa de rodagem $n_j = 1$ e uma rampa de acesso

Nesta simulação foram definidas as mesmas condições de tráfego para ambas as vias, faixa de rodagem e ramal de acesso sendo, respectivamente o fluxo e a velocidade dos veículos no início de cada via de $\phi_k(t,0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , e $v_k(t,0) \in [30, 70]$ $km\ h^{-1}$.

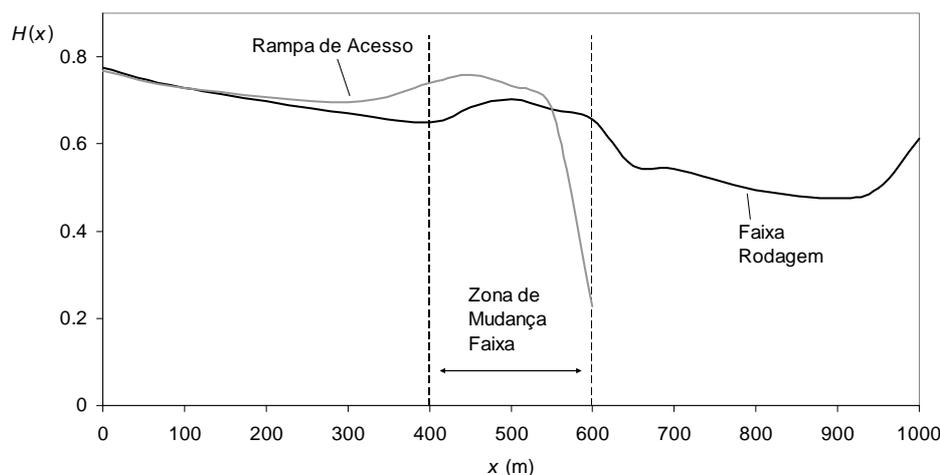


Figura 5.38 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para estrada com uma faixa de rodagem ($l = 1000$ m) e uma ramal de acesso ($l = 200$ m), com $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_k(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} em ambas as vias

Analisando a figura 5.38 conclui-se que existe uma forte variação da entropia, em ambas as vias, ao longo da zona de mudança de faixa, correspondendo às coordenadas de estrada $x \in [400, 600]$ m. No caso da faixa de rodagem verifica-se que, após uma fase de estabilização ($600 < x < 700$ m), a entropia tem uma variação semelhante à variação verificada para o caso da experiência com apenas uma faixa de rodagem.

5.6 Controlo de tráfego em auto-estrada

As auto-estradas foram inicialmente concebidas com o propósito de proporcionar mobilidade virtualmente ilimitada aos seus utilizadores libertando-os, desta forma, das constantes interrupções do fluxo de tráfego provocadas pelos semáforos e cruzamentos existentes em estradas convencionais. No entanto, e devido ao crescente número de condutores que passaram a utilizar este tipo de vias, rapidamente se verificou um incremento significativo dos congestionamentos de tráfego. Estes congestionamentos verificam-se diariamente, nas horas de ponta (congestionamento recorrente), ou quando ocorre algum incidente (congestionamento não recorrente). Este cenário, de auto-estradas congestionadas à volta e dentro de áreas metropolitanas, assemelha-se bastante ao que acontecia inicialmente no tráfego urbano antes da introdução dos semáforos, ou seja, condições de tráfego caóticas no

pontos de intersecção, longas filas de transito, rápida degradação das infra-estruturas e redução da segurança. Actualmente as autoridades competentes ainda não se encontram suficientemente sensibilizadas para o facto de este tipo de infra-estruturas, na maior parte dos casos bastante dispendiosas, estarem a ser subaproveitadas durante uma grande parte do dia devido à inexistência de um sistema de controlo de tráfego adequado e eficiente.

Na figura 5.39 estão representados os elementos básicos de uma malha de controlo de tráfego preconizada por Papageorgiou *et al.* (2003). O comportamento do fluxo de tráfego, numa determinada estrada, depende de um conjunto de variáveis externas que podem ser agrupadas em dois grupos distintos: as entradas de controlo, que estão directamente relacionadas com os correspondentes elementos de controlo (*e.g.*, semáforos, sinais de mensagens variáveis) e as perturbações, cujos valores não podem ser manipulados, mas podem no entanto ser quantificados, detectados ou previstos para um determinado horizonte temporal.

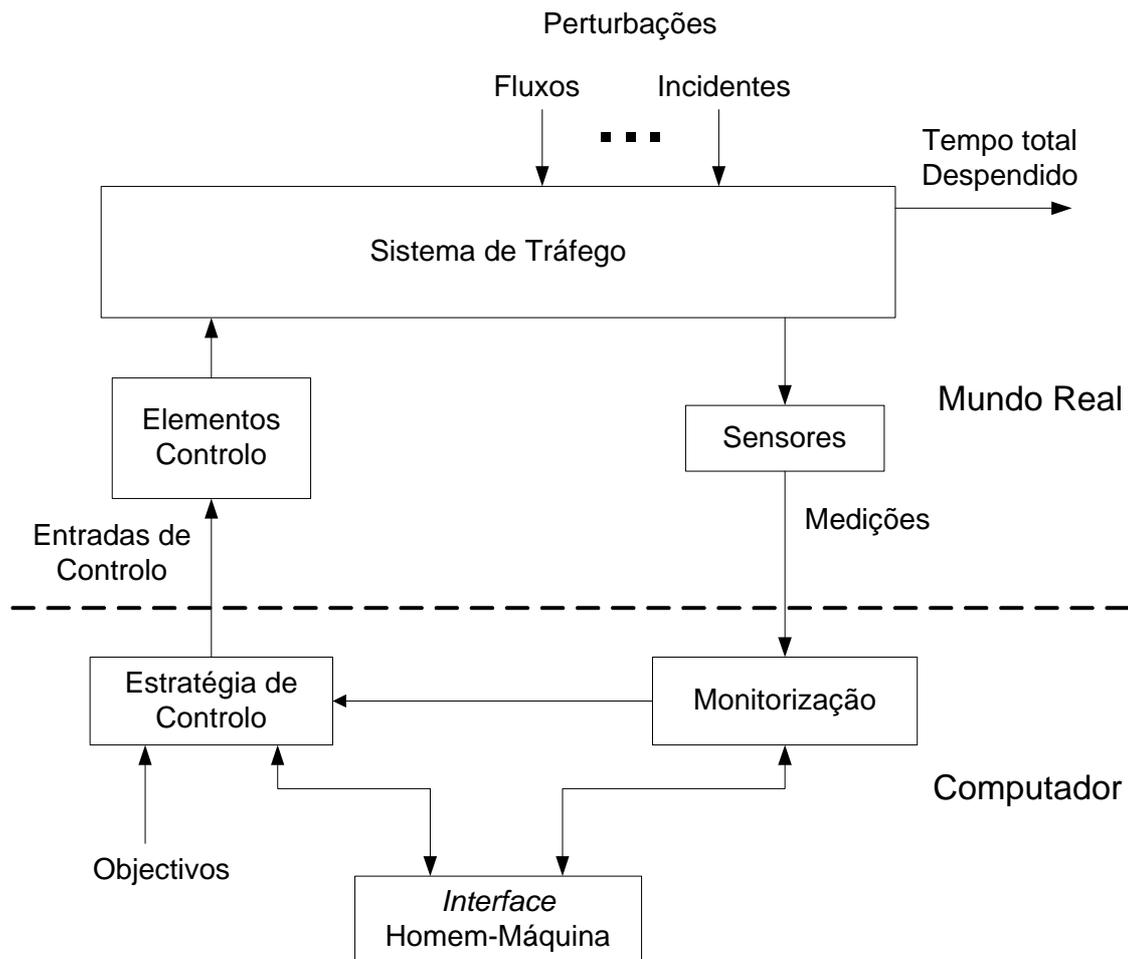


Figura 5.39 – Malha de controlo

O desempenho do sistema de controlo poderá ser medido através de índices apropriados tais como, o tempo total despendido por todos os veículos para realizar um determinado percurso ou o nível de poluição produzida por todos os veículos que circulam num determinado percurso. A função da monitorização consiste em melhorar e supervisionar toda a informação proveniente dos sensores colocados na estrada, sendo posteriormente enviada para a estratégia de controlo ou para o operador do sistema. O componente mais importante da malha de controlo é a estratégia de controlo, cuja tarefa é a especificação em tempo real das entradas de controlo, baseando-se para isso nas medidas, avaliações e previsões, assim como no cumprimento dos objectivos previamente estabelecidos. A aplicabilidade e a eficiência da estratégia de controlo determina, em grande parte, a eficiência de todo o sistema de controlo.

Os modos de controlo normalmente utilizadas em auto-estradas são:

- controlo de fluxo nos ramais de acesso (*ramp metering*),
- controlo de percurso (*link control*) na qual se inclui controlo da faixa de rodagem, limites de velocidade variáveis, alertas de congestionamentos e instruções para manter a faixa de rodagem,
- informação ao condutor e sistemas para orientação de percursos.

O controlo do fluxo, nos ramais de acesso, é considerado, por uma grande parte dos especialistas na área, como a forma mais directa e eficiente de controlar e melhorar o tráfego em auto-estradas. Como foi referido anteriormente, o controlo de fluxo de tráfego numa faixa de rodagem é uma outra forma eficiente de controlar o tráfego em auto-estrada. Para tal são colocados sensores ao longo das faixas de rodagem, que recolhem informação sobre as condições de tráfego, e por sinais limitadores de velocidade variável (SLVV), que informam o condutor sobre qual a velocidade mais adequada. A velocidade mais adequada terá de ser determinada por um sistema de controlo adequado e eficaz, nomeadamente com o recurso a sistemas de apoio à decisão e a sistemas de optimização multi-objectivo.

A figura 5.40, representa uma estrutura geral de um sistema para controlo de fluxo de tráfego numa faixa de auto-estrada.

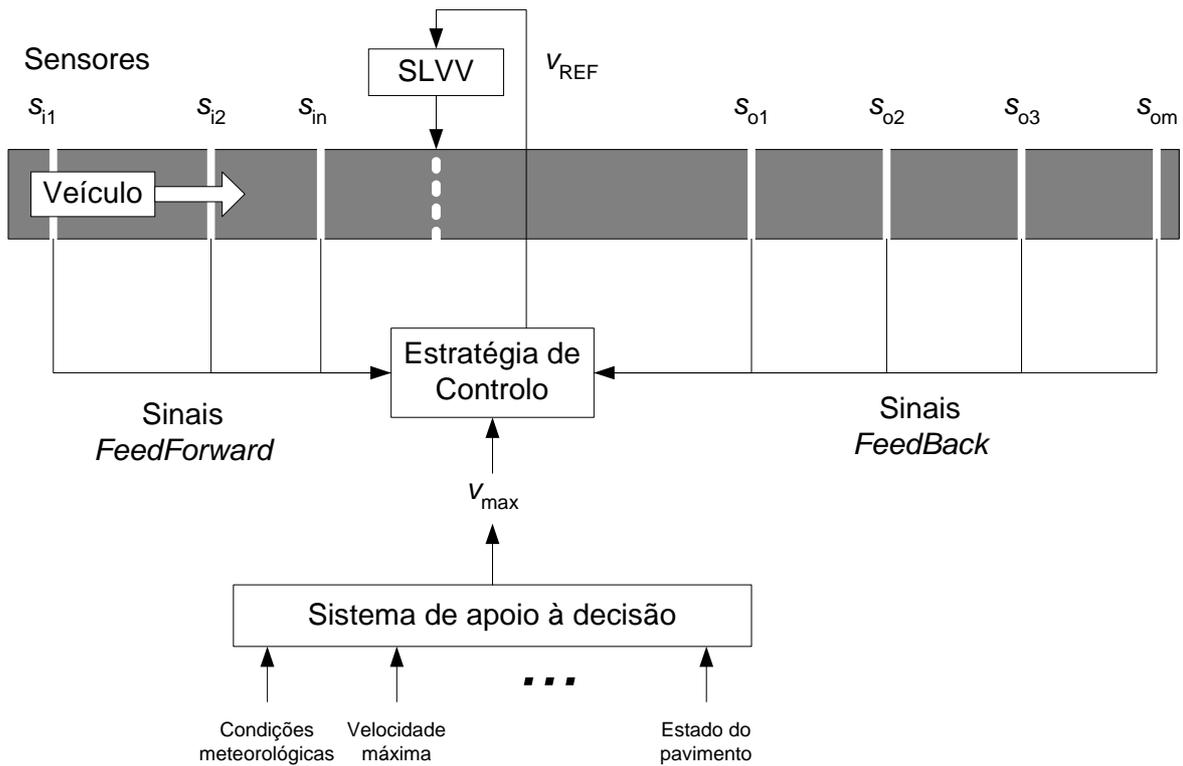


Figura 5.40 - Estrutura geral de um sistema de controlo de fluxo de tráfego numa faixa de rodagem

Um conjunto de sensores colocados antes e depois do SLVV, designados respectivamente por sensores *feedforward* e *feedback*, fornecem informação ao sistema de controlo, em tempo real, sobre as condições de tráfego na faixa de rodagem (*i.e.*, velocidade média, densidade de tráfego). O valor de v_{max} é determinado recorrendo a sistemas de optimização multi-objectivo, onde se pondera o impacto na velocidade dos veículos de factores tais como, as condições meteorológicas actuais, a velocidade máxima permitida, o estado do pavimento, a previsão das condições de tráfego, etc. A determinação de um valor apropriado para v_{max} é a etapa mais importante e ao mesmo tempo mais complexa dos sistemas de controlo de tráfego através da limitação da velocidade, sendo esta uma das áreas onde se verifica uma maior incidência de trabalhos de investigação (Smulders, 1990). A estratégia de controlo tem como tarefa a determinação do valor que irá ser colocado no SLVV, podendo este ser calculado através da expressão:

$$v_{ref} = f(v_{max}, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_o) \quad (5.24)$$

onde:

$$\mathbf{u}_i = [s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{in}]^T \quad (5.25a)$$

$$\mathbf{u}_o = [s_{o1}, s_{o2}, \dots, s_{om}]^T \quad (5.25b)$$

Um sistema de controlo deste tipo tem como objectivo a homogeneização do fluxo de tráfego (*i.e.*, homogeneizar a velocidade dos carros da mesma faixa de rodagem e a velocidade média entre diferentes faixas de rodagem). Desta forma reduz-se o risco de ocorrerem congestionamentos quando se verificam altas densidades de tráfego e consegue-se aumentar a capacidade da auto-estrada. Neste momento existem poucos estudos que permitam quantificar o impacto provocado pela utilização deste tipo de sistemas em auto-estradas.

O desenvolvimento de um sistema de controlo com as características do sistema descrito anteriormente é uma tarefa difícil e complexa, essencialmente devido à volatilidade do condutor (*i.e.*, o tempo durante o qual o condutor aceita respeitar a velocidade indicada pelo SLVV, número de condutores que obedecem ao SLVV, etc.) e à variabilidade da estrada (*i.e.*, condições meteorológica, estado do pavimento, incidentes). O primeiro factor pode influenciar a “controlabilidade” do sistema, enquanto que o segundo afecta a “observabilidade”⁵.

5.6.1 Sistema de controlo adoptado

Utilizado os recursos do SITS, foi estudado um novo conceito para controlo de tráfego numa faixa de auto-estrada, baseado nos pressupostos teóricos descritos na secção anterior. A figura 5.41 mostra os componentes principais do sistema de controlo assim como a sua localização.

⁵ Os conceitos de “controlabilidade” e “observabilidade” estão a ser tomados numa perspectiva mais lata do que a definição clássica encontrada na representação de sistemas no espaço dos estados.

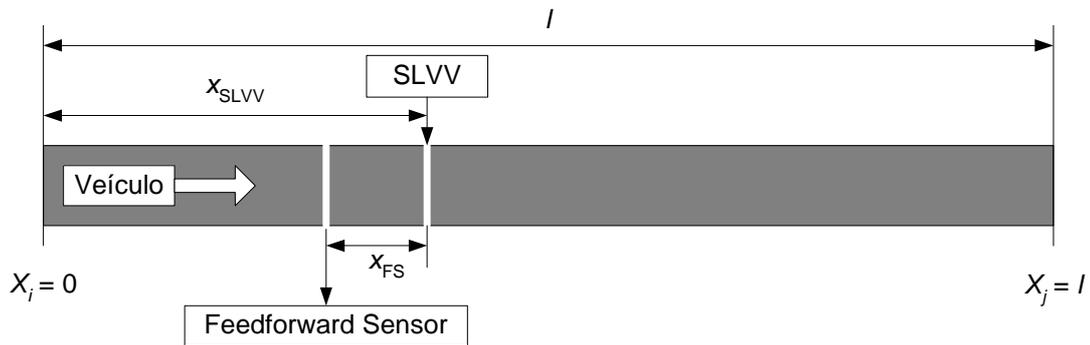


Figura 5.41 - Elementos principais do sistema de controlo adoptado

O elemento principal do sistema é o sinal limitador de velocidade variável (SLVV), colocado à distância x_{SLVV} do início da estrada, cuja função é indicar aos condutores a velocidade de circulação mais apropriada, assim, partindo do pressuposto que os condutores respeitam a informação transmitida pelo SLVV, considera-se que esta é uma forma do sistema uniformizar as velocidades dos veículos. O sensor *feedforward*, colocado a uma distância x_{FS} antes do SLVV, tem como função captar as velocidades dos veículos antes de estes serem influenciados pelo SLVV.

A velocidade de referência, que irá aparecer no SLVV, é calculada através da expressão:

$$v_{\text{ref}} = \rho v_{\text{max}} + (1 - \rho) v_{\text{media}}, \quad 0 < \rho < 1 \quad (5.26)$$

onde v_{max} é a velocidade máxima permitida na faixa de rodagem e v_{media} é a velocidade média dos veículos calculada com base nas leituras do sensor *feedforward*.

Como foi referido anteriormente, a velocidade v_{max} é definida ponderando a influência que vários factores exercem na imposição da velocidade máxima de circulação dos veículos numa determinada via. Nesses factores incluem-se, as condições da estrada, as condições meteorológicas e, não menos importante, as restrições tecnológicas (dos materiais do pavimento, do desempenho dos veículos). A figura 5.42 representa a estrutura geral do sistema de controlo adoptado.

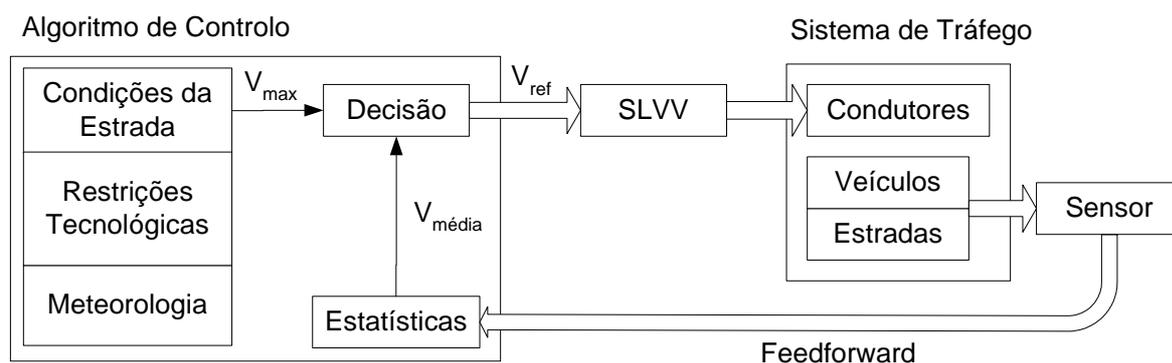


Figura 5.42 - Estrutura geral do sistema de controlo adoptado

Desta forma, e numa perspectiva de teoria de controlo, podem fazer-se as seguintes analogias com um sistema de controlo clássico: v_{ref} consiste no ‘sinal de referência’, $v_{média}$ é o *feedforward* e a equação (5.26) implementa o ‘controlador’.

5.6.2 Análise dinâmica em malha fechada de um sistema de tráfego

Nesta secção faz-se uma análise ao comportamento dinâmico do sistema de tráfego quando submetido ao sistema de controlo de velocidade descrito na secção anterior. Para permitir fazer uma comparação entre os comportamentos dinâmicos “controlado” e “livre”, ou seja, de um sistema de tráfego com e sem sistema de controlo mantiveram-se os parâmetros de simulação e as condições de tráfego que originaram a *STF* da figura 5.13 a). Assim, foi considerada uma estrada com uma faixa de rodagem $n_l = 1$, de comprimento $l = 1000$ m, e com: fluxo e velocidade dos veículos no início da faixa de rodagem de $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_k(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1} .

O sistema de controlo é composto por um SLVV colocado na coordenada de estrada $x_{SLVV} = 205$ m e por um sensor *feedforward* colocado 5 metros em avanço fase ao SLVV (*i.e.*, $x_{FS} = 5$ m), de acordo com o esquema representado na figura XX1.

Deve referir-se que, o sistema de controlo implementado não é totalmente automático, uma vez que não foi desenvolvido o sistema de optimização multi-objectivo que permitisse gerar automaticamente o valor mais apropriado para v_{max} . Na realização desta simulação foi considerado $v_{max} = 100$ km h^{-1} e $\rho = 0.5$ e um tempo de amostragem da velocidade limite no SLVV de $T_s = 100$ segundos.

O gráfico de curvas de nível representado na figura 5.43 permite dar uma ideia da distribuição das velocidades dos veículos ao longo da estrada quando sujeitos ao sistema de controlo de velocidade.

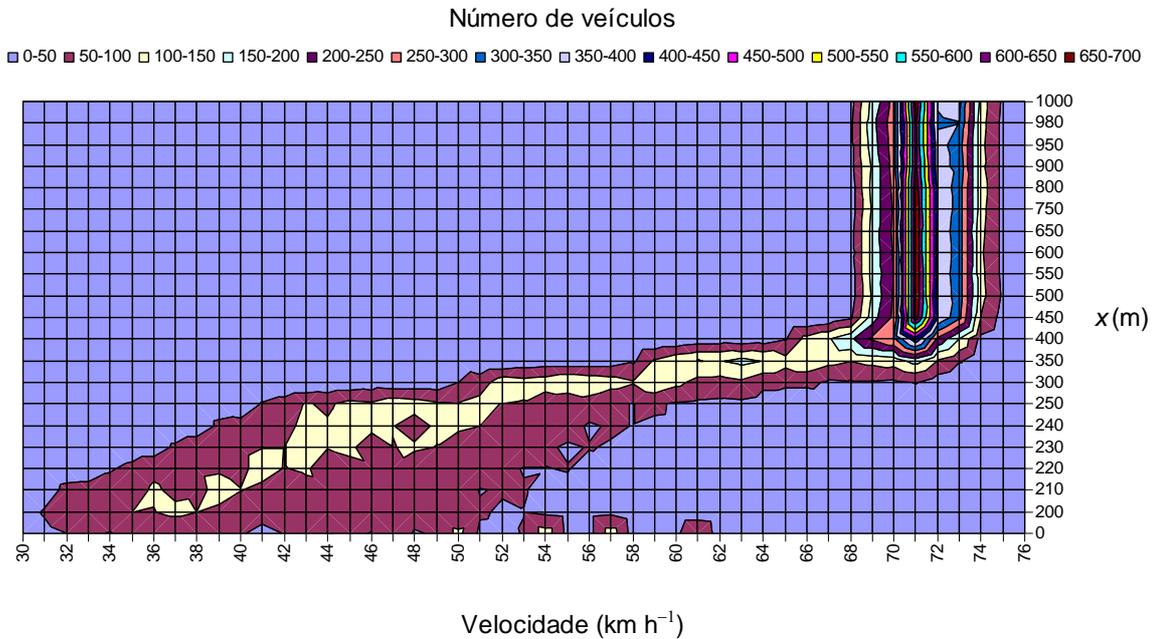


Figura 5.43 - Curvas de nível que representam o número de veículos *versus* a variação da velocidade e a coordenada de estrada x , para uma estrada com uma faixa de rodagem e sistema de controlo de velocidade, comprimento $l = 1000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s⁻¹, e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h⁻¹

Conforme se pode observar, os veículos depois de passarem pelo SLVV ($x_{\text{SLVV}} = 205$ m), alteram a sua velocidade por forma a respeitar a velocidade definida pelo SLVV, desta forma consegue-se homogeneizar a velocidade dos carros. Comparando as curvas de nível das figuras 4.13 (*i.e.*, sem controlador) e 5.43 (*i.e.*, com controlador), observa-se claramente o efeito do sistema de controlo adoptado no comportamento dos veículos. Conforme seria de esperar, para o caso de um sistema de tráfego sem controlo a velocidade dos veículos tende a aproximar-se da velocidade dos veículos mais lentos, enquanto que num sistema de controlo a velocidade dos veículos aproxima-se da velocidade definida pelo SLVV.

O comportamento dinâmico do sistema de tráfego em malha fechada (*i.e.*, com controlador) é significativamente diferente do comportamento dinâmico do sistema de tráfego em malha aberta (*i.e.*, sem controlador), conforme se pode verificar através da comparação entre a *STF* da figura 5.13 a) e a *STF* da figura 5.44.

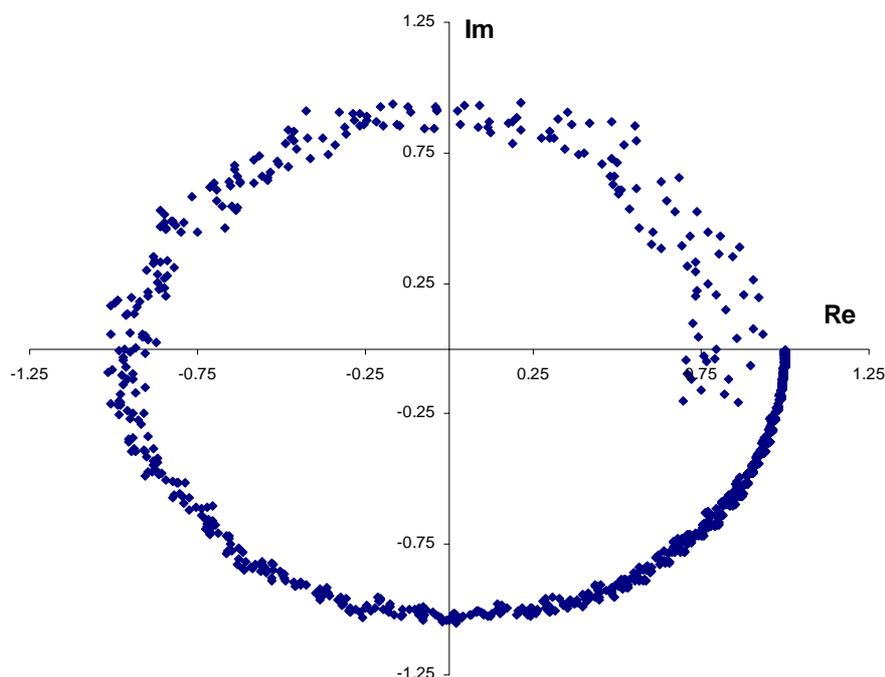


Figura 5.44 - Diagrama polar da STF para $\omega \in [0, 0.1]$ rad s^{-1} de $T_1(s;1000,0)$ do sistema de malha fechada considerando $l = 1000$ m, $n_f = 1$, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

A expressão analítica que melhor ajusta os valores numéricos da STF da Figura 5.44 requer um maior número de pólos e zeros do que no caso da STF de figura 5.13 a). No entanto, para facilitar a comparação entre os comportamentos dinâmicos dos sistemas em malha fechada e malha aberta foi adoptada a mesma expressão (5.11), uma vez que esta se ajusta razoavelmente à curva STF .

5.6.3 Variação dos parâmetros da STF

São realizadas varias simulações considerando diferentes valores de velocidade média v_{av} , fixando a máxima variação de velocidade $\Delta v = 20$ km h^{-1} e mantendo as restantes condições de tráfego e os parâmetros de simulação da experiência anterior. Desta forma consegue-se analisar a variação dos parâmetros τ , p e α da STF com a variação da velocidade média v_{av} . Os resultados obtidos são comparados com os valores dos parâmetros da STF para o caso do sistema em malha aberta. Os gráficos das figuras 5.45, 5.46 e 5.47 mostram, respectivamente a variação τ , p e α *versus* v_{av} .

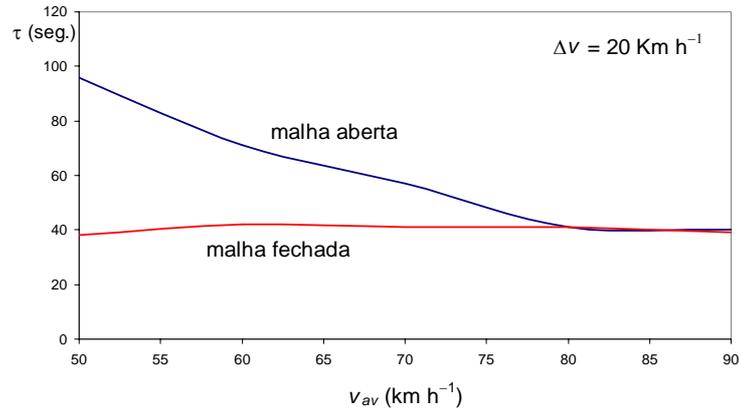


Figura 5.45 - Parâmetro τ versus v_{av} para o caso de sistemas de malha aberta e malha fechada, considerando

$$l = 1000 \text{ m}, n_j = 1, \phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1} \text{ e } \Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$$

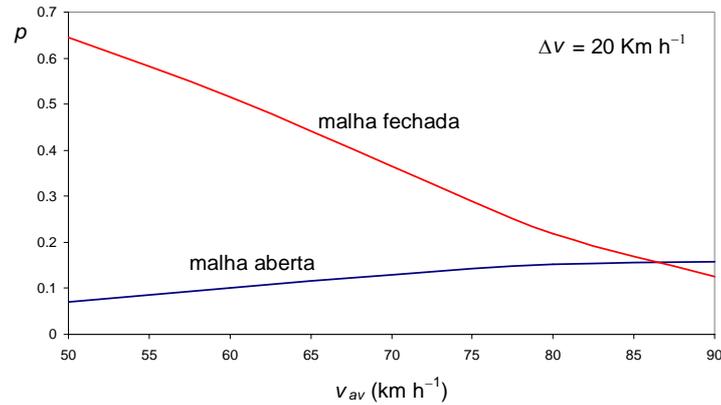


Figura 5.46 - Parâmetro ρ versus v_{av} para o caso de sistemas de malha aberta e malha fechada, considerando

$$l = 1000 \text{ m}, n_j = 1, \phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1} \text{ e } \Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$$

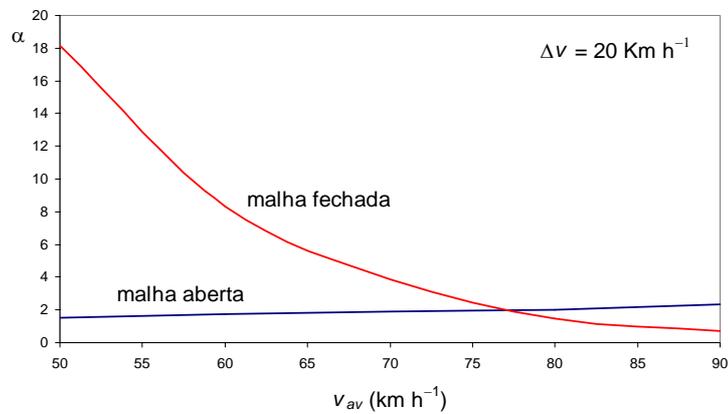


Figura 5.47 - Parâmetro α versus v_{av} para o caso de sistemas de malha aberta e malha fechada, considerando

$$l = 1000 \text{ m}, n_j = 1, \phi_1(t;0) \in [0.12, 1] \text{ veículos s}^{-1} \text{ e } \Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$$

Analisando a variação dos parâmetros para o caso de malha fechada verifica-se que diminuindo a velocidade média v_{av} , se tem:

- o atraso τ mantém-se quase sempre constante devido ao efeito do algoritmo de controlo,
- o valor do pólo p aumenta, correspondendo a uma maior largura de banda,
- a variação de α é mais complexa e parece estar relacionada com a eliminação do ruído associado ao tráfego não controlado.

5.6.4 Análise do comportamento dinâmico versus ρ

Nesta secção faz-se uma análise ao comportamento dinâmico do sistema considerando diferentes valores para o parâmetro ρ da expressão (5.26). assim, são realizadas duas novas simulações, uma considerando $\rho = 0.25$ e outra com $\rho = 0.75$. Os restantes parâmetros do sistema de controlo, de simulação e de condições de tráfego são idênticos aos da simulação descrita na secção 5.6.2. Na figura 5.48 estão representados os valores numéricos da *STF* para o caso a) $\rho = 0.25$ e b) $\rho = 0.75$.

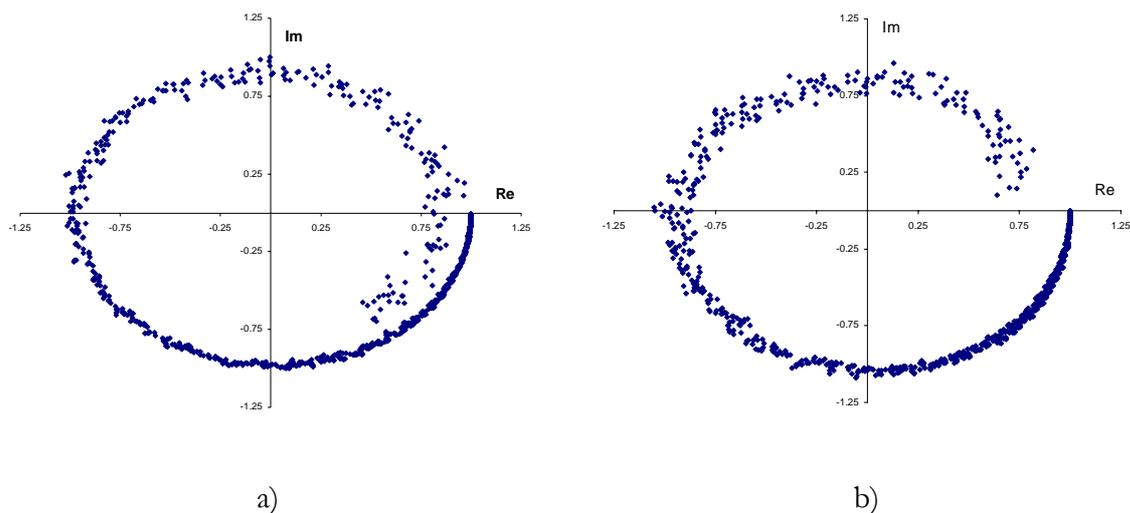


Figura 5.48 - Diagrama polar da *STF* para $\omega \in [0, 0.1]$ rad s^{-1} de $T_1(s;1000,0)$ do sistema de malha fechada para a) $\rho = 0.25$ e b) $\rho = 0.75$, considerando $l = 1000$ m, $n_l = 1$, $\phi_1(z;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(z;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

Analisando as figuras 5.44 e 5.48, verifica-se que os parâmetros p e α que melhor se ajustam às *STFs*, apresentam valores muito aproximados, pelo que o único parâmetro que revela uma maior variação é o tempo de atraso τ , conforme se pode observar na tabela 5.2.

Tabela 5.2 - ρ versus τ

ρ	0.25	0.5	0.75
τ	63	56	52

Os resultados obtidos para τ são consistentes, e estão de acordo com a estratégia de controlo adoptada. A expressão 5.26 mostra que aumentando o valor de ρ , v_{ref} tem um contributo maior de v_{max} , dado que $v_{max} = 100 \text{ km h}^{-1}$ e $v_{media} \in [30, 70] \text{ km h}^{-1}$ então o valor de v_{ref} será por isso superior e os veículos circulam a uma maior velocidade tendo como consequência directa uma diminuição do atraso τ .

5.6.5 Variação da entropia ao longo da estrada

A experiência anterior permite também recolher dados sobre a variação da entropia ao longo da estrada para o caso de um sistema em malha fechada. Na figura 5.49 está representado, a variação da entropia ao longo da estrada para os dois casos: sistema em malha fechada e sistema em malha aberta.

Analisando a figura 5.49 verifica-se que existe uma forte variação da entropia devido ao efeito de controlo provocado pelo SLVV colocado na coordenada de estrada $x = 205 \text{ m}$. Por esse facto verifica-se um transitório para $205 < x < 450$, enquanto para $x > 450 \text{ m}$ o valor da entropia se mantém aproximadamente constante.

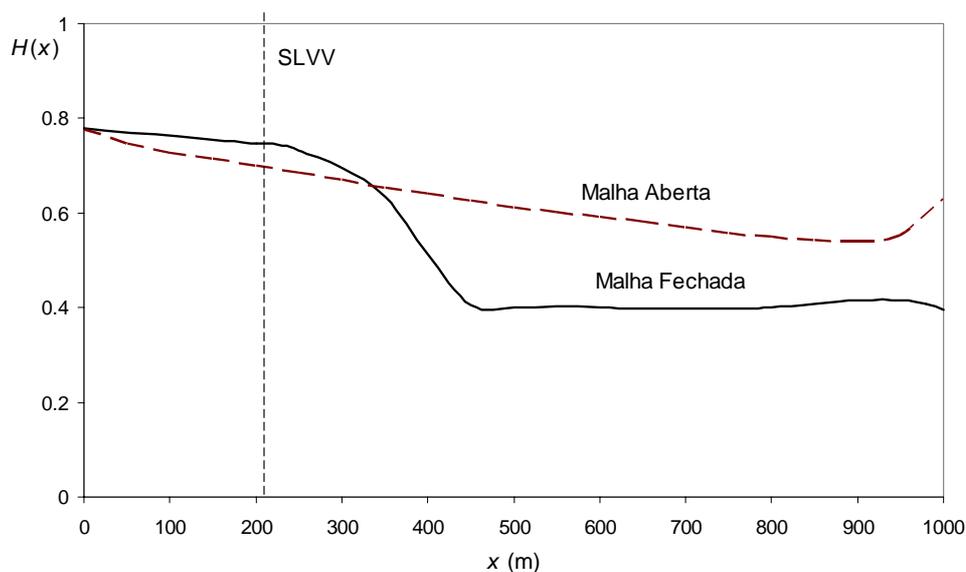


Figura 5.49 - Entropia $H(x)$ versus coordenada de estrada x , para o caso malha fechada e malha aberta, estrada com uma faixa de rodagem, comprimento $l = 10000$ m, $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} e $v_1(t;0) \in [30, 70]$ km h^{-1}

5.7 Conclusão

Neste capítulo foi efectuado um estudo sobre a influência da velocidade dos veículos, do comprimento da estrada e do número de faixas de rodagem sobre o fluxo de tráfego com base nos resultados obtidos pelas experiências realizadas com o simulador SITS.

A análise de um sistema de tráfego segundo a perspectiva da teoria de sistemas é um processo complexo, por isso desenvolveu-se um novo formalismo designado de Função de Transferência Estatística (*Statistical Transfer Function - STF*) que integra a estatística com a Transformada de Laplace/Fourier. Os resultados obtidos mostraram que este novo método se revelou bastante eficaz no tratamento da informação. Para descrever o comportamento dinâmico do fluxo de tráfego numa estrada com uma faixa de rodagem foi adoptado um sistema de ordem fraccionária com atraso.

Para analisar a evolução do tráfego de veículos ao longo de uma estrada, nomeadamente no que respeita à interferência entre veículos que circulam na mesma faixa de rodagem, utilizou-se a entropia, que permite quantificar a dispersão de velocidades verificada num determinado ponto da estrada.

Aproveitando as potencialidades do simulador SITS desenvolveu-se um novo algoritmo de controlo de tráfego baseado no conceito de sinais limitadores de velocidade variável (SLVV) que informam o condutor sobre qual a velocidade mais adequada.

Capítulo 6

Conclusões

Neste capítulo resume-se o trabalho desenvolvido e apontam-se as principais contribuições da tese. De seguida perspectivam-se possibilidades para desenvolvimentos futuros, que poderão complementar e dar seguimento ao trabalho realizado no âmbito desta dissertação.

“O trabalho é a coisa mais importante do mundo.

Por isso devemos deixar sempre um pouco para o dia seguinte”

Don Herold

6.1 Introdução

A simulação microscópica é uma ferramenta adequada para o estudo dos sistemas de gestão de tráfego através da representação das condições reais de tráfego e da modelação do comportamento do condutor. Esta metodologia permite a realização da análise dinâmica do impacto provocado na rede de transporte pela implementação de estratégias de controlo e gestão de tráfego que podem contemplar alterações a nível de veículos, das configurações das estradas e do comportamento dos condutores.

A análise dinâmica do fluxo de tráfego numa estrada, segundo a perspectiva de teoria de sistemas, é um processo complexo. Esta complexidade é justificada seja pela natureza estocástica do sistema seja pela faceta discreto-contínuo, não existindo ferramentas matemáticas de análise simples e eficientes. Sabe-se que os modelos clássicos são utilizados em sistemas lineares e invariantes no tempo, não sendo a sua aplicação indicada para sistemas que incluem fenómenos aleatórios como é o caso de sistemas constituídos por ambientes não estruturados. Assim, o recurso a conceitos alternativos, nomeadamente a ferramentas

matemáticas complementares como a estatística, é uma solução possível para ultrapassar este problema. Num sistema de tráfego, é, ainda, necessário incluir a capacidade de ajustar a descrição à variação contínua das condições operacionais do sistema, pelo que, deve ser dada uma especial atenção à descrição correspondente.

6.2 Resumo do trabalho desenvolvido

Este trabalho de investigação centra-se na questão da análise dinâmica de tráfego. Para o efeito desenvolveu-se uma ferramenta de simulação de tráfego microscópica que permite simular condições de tráfego reais, considerando diferentes geometrias de estradas e tipos distintos de condutores e veículos, em meios urbanos e auto-estradas. Para a sua implementação adoptou-se a técnica computacional da programação orientada aos objectos devido à sua modularidade e flexibilidade, o que permitiu a simulação da interacção entre os diferentes modelos considerados no simulador.

O objectivo fundamental da análise dinâmica de um sistema de tráfego consiste em verificar a influência da variação de alguns parâmetros (*e.g.*, velocidade dos veículos, comprimento da estrada e número de faixas de rodagem) sobre o fluxo de tráfego. Para o efeito realizou-se um conjunto de experiências utilizando o simulador de tráfego desenvolvido, considerando cenários distintos, relativamente aos parâmetros indicados. Como se referiu na secção anterior a análise de um sistema de tráfego, segundo a perspectiva da teoria de sistemas, é um processo complexo e, por isso, desenvolveu-se um novo formalismo designado de Função de Transferência Estatística (*Statistical Transfer Function - STF*) que integra a estatística com a transformada de Fourier. Os resultados obtidos mostraram que este novo método se revelou bastante eficaz no tratamento da informação.

6.2.1 Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte - SITS

O simulador desenvolvido, denominado de Simulador de Sistemas Inteligentes de Transporte (*Simulator of Intelligent Transportation Systems - SITS*), é do tipo microscópico e estocástico. O SITS é do tipo microscópico devido ao elevado nível de detalhe com que descreve um sistema de tráfego. Assim, consideram-se diversas configurações de estradas, número de faixas,

sinalização, comportamentos e perfis dos condutores e características de diferentes tipos de veículos (*e.g.*, velocidades máximas e mínimas, acelerações, travagens, dimensões), por outro lado, o modelo de simulação adoptado no SITS é do tipo estocástico, uma vez que em alguns dos processos os valores atribuídos a determinadas variáveis são aleatórios (*e.g.*, a velocidade atribuída a cada veículo ou o fluxo de tráfego de uma dada estrada).

O SITS compreende cinco módulos, nomeadamente (i) o módulo nuclear de modelação orientada ao estado, onde se procede à modelação de cada veículo na rede, (ii) o módulo de decisão do condutor, onde se contempla o ambiente circundante, a geometria da estrada o regime de condução e o processo de mudança de faixa, (iii) o módulo de controlo de tráfego, que inclui um novo algoritmo de controlo de velocidade, o controlo de ramais de acesso e o controlo de semáforos, (iv) o módulo de interface com o utilizador, que permite a entrada de dados e a visualização de resultados e (v) o módulo de saída de dados, onde se recolhem os resultados das simulações efectuadas e que serão posteriormente utilizados no processo de análise dinâmica de tráfego.

Para a modelação de cada veículo desenvolveu-se uma nova técnica computacional de modelação designada de modelação orientada ao estado (*State Oriented Modelling* - SOM), cujo objectivo é a modelação de cada veículo como uma entidade individual na rede. Nesta abordagem cada veículo na rede tem um único estado possível para cada período de amostragem. A transição entre estados depende do modelo de comportamento do condutor e do ambiente circundante. O SOM faz a integração entre os elementos relacionados com o controlo de tráfego e os elementos relacionados com a decisão do condutor.

O SITS incorpora três modelos de condução, a saber, o seguidor de veículo (*car-following*), o fluxo livre (*free-flow*) e a lógica de mudança de faixa (*lane changing*). Cada veículo na rede assume um dos dois regimes: *free flow* ou *car-following*. O regime *free flow* prevalece, relativamente ao *car-following*, sempre que a distância entre veículos seja superior à distância crítica ou sempre que não existam veículos à frente. Desenvolveu-se um novo modelo para simular as acelerações ou desacelerações, nomeadamente o modelo de percepção do condutor (*Perception-Driver Model* - PDM). Neste modelo o condutor reage ao estímulo (distância crítica) apenas quando esta excede a distância entre os veículos. O facto de o condutor ter a percepção de qual é o seu estado actual permite-lhe, respeitando o diagrama de estados do SOM, saber quais os comportamentos (estados) para os quais pode transitar, podendo, assim, tomar a decisão mais

conveniente. Desta forma, ultrapassam-se as limitações do ponto de vista comportamental que a generalidade dos modelos *car-following* apresentam, nomeadamente as várias evoluções dos modelos GM. O tempo de reacção do condutor não está explicitamente representado no modelo *car-following*, como acontece na maior parte dos modelos deste tipo. O SOM permite fazer a interacção entre um modelo para o tempo de reacção do condutor e o PDM. O modelo *lane changing*, utilizado no SITS, tem uma metodologia que imita o comportamento do condutor no processo de mudança de faixa, compreendendo três passos: decisão para efectuar e mudança de faixa, selecção da faixa de rodagem e execução da manobra. Para determinar se é possível efectuar uma manobra de mudança de faixa foi desenvolvido um modelo de aceitação da distância disponível (*gap acceptance*).

O ambiente circundante pode ser modelado por um conjunto de modelos, cada um deles caracterizando diferentes fenómenos que podem ocorrer num sistema de tráfego e que influenciam o comportamento do condutor (*e.g.*, sinais de trânsito, semáforos, peões, condições da via, condições atmosféricas e geometria da estrada). Para a especificação da geometria da estrada foi utilizado o conceito de vias e nodos. As vias são definidas como uma sucessão de segmentos de recta desde um ponto inicial até um ponto final. Os nodos são entidades fictícias de interligação entre duas ou mais vias, localizando-se em pontos de início ou de fim de vias, sendo os únicos pontos através dos quais as vias se podem interligar.

O conjunto de dados gerados pelo SITS abrange informação sobre o comportamento individual dos veículos (*e.g.*, fluxos, velocidades, tempos de viagem e consumos de combustível) e informação captada pelos sensores colocados na estrada que permite avaliar a evolução temporal do comportamento dos veículos ao longo da estrada.

6.2.2 Análise dinâmica de tráfego

Com base nos resultados obtidos pelas experiências realizadas com o simulador SITS, foi possível efectuar um estudo sobre a influência da velocidade dos veículos, do comprimento da estrada e do número de faixas de rodagem sobre o fluxo de tráfego. É possível obter-se a Função de Transferência (*FT*) do fluxo de tráfego entre dois pontos da estrada. No entanto, na realização de várias experiências considerando os mesmos parâmetros de entrada, verificou-se que se obtinham diferentes valores para a *FT*, o que se justifica pela natureza

estocástica dos parâmetros envolvidos na simulação. Assim, no sentido de ultrapassar este problema, desenvolveu-se um novo método designado por Função de Transferência Estatística (*Statistical Transfer Function* - STF) que conjuga a estatística, vocacionada para tratar grande volumes de dados variados, com a transformada de Fourier, adequada para lidar com relações que dependem do tempo.

Para descrever o comportamento dinâmico do fluxo de tráfego, numa estrada com uma faixa de rodagem, foi adoptado um sistema de ordem fraccionária com atraso. Assim, através do cálculo fraccionário obtém-se um melhor ajuste dos valores numéricos à *FT*, e uma ferramenta matemática que se adapta melhor ao comportamento dinâmico do sistema que se pretende analisar. Para ajustar a *SFT* aos valores numéricos foi utilizado um método baseado na minimização do erro quadrático.

Um factor importante na obtenção da *STF* prende-se com o facto de encontrar o número de simulações mais conveniente para se obter o melhor compromisso entre o erro mínimo quadrático e o tempo de processamento. Pela experiência sabe-se que, quanto maior for o número de simulações menor vai ser o erro. Por outro lado, o aumento do número de simulações tem como consequência directa um aumento do tempo de processamento. Neste caso verificou-se que um bom compromisso entre o valor do erro quadrático e o tempo de processamento ocorre para 500 simulações. Quanto aos índices estatísticos, compararam-se os resultados obtidos no cálculo da *STF* considerando a média aritmética e a mediana, tendo-se verificado que a utilização da mediana no cálculo da *STF* se revelou mais vantajosa uma vez que se obteve mais rapidamente a convergência da *STF* (*i.e.*, necessidade de amostras com um menor número de simulações). Foram efectuadas algumas experiências considerando estradas com várias faixas de rodagem e diferentes condições de tráfego que permitiram tirar algumas conclusões relativamente ao comportamento da *STF* e à variação dos seus parâmetros, nomeadamente sobre o atraso τ , o pólo p , a ordem fraccionária α e o ganho k_B . Com base nos resultados gerados pelo simulador de tráfego microscópico SITS pode-se afirmar que o modelo proposto para análise dinâmica, conduz a resultados compatíveis com o conhecimento e a experiência existente na teoria dos sistemas clássica. Além disso, é de realçar, também, que a adopção do cálculo fraccionário, para a representação das características dinâmicas da variação contínua dos sistema de tráfego, constituiu uma opção

adequada, pois traduziu-se em resultados coerentes em expressões analíticas simultaneamente simples e adaptáveis às diferentes experiências.

Para analisar a evolução do tráfego de veículos ao longo de uma estrada, nomeadamente no que respeita à interferência entre veículos que circulam na mesma faixa de rodagem, utilizou-se a entropia, que permite quantificar a dispersão de velocidades verificada num determinado ponto da estrada. Realizaram-se várias experiências com vista à análise da variação da entropia considerando diferentes parâmetros de simulação (*e.g.*, diferentes comprimentos de estrada, e intervalos de máxima variação de velocidade, velocidade médias e várias faixas de rodagem, bem como uma geometria envolvendo uma faixa de rodagem com rampa de acesso).

Os resultados obtidos permitiram concluir que a entropia é tanto menor quanto maior for o comprimento da estrada. Verificou-se que para pequenas variações de velocidade a entropia se mantém aproximadamente constante em todos os pontos da estrada. Por outro lado, para variações de velocidade mais elevadas, a variação da entropia ao longo da estrada é mais acentuada, devido ao facto de no início da estrada a dispersão de velocidades ser maior. Quando se efectuou a comparação entre uma a várias faixas de rodagem, verificou-se que no início da estrada, a entropia tem aproximadamente o mesmo valor para ambas as situações. No entanto, no caso de uma estrada com uma faixa de rodagem a entropia decresce mais rapidamente do que no caso de uma estrada com várias faixas de rodagem. Este fenómeno ocorre porque para estradas com mais do que uma faixa de rodagem, o simulador utiliza um modelo de mudança de faixa (*lane changing*) que permite aos veículos que pretendem circular a uma velocidade mais elevada mudarem de faixa de rodagem. A análise da entropia para um cenário com uma faixa de rodagem com rampa de acesso, permitiu verificar que existe uma forte variação em ambas as vias, ao longo da zona de mudança de faixa mas, após decorrida uma fase de estabilização, a sua variação é semelhante à verificada para o caso da experiência com apenas uma faixa de rodagem.

6.2.3 Controlo de tráfego em auto-estrada

O controlo de fluxo em cada faixa de rodagem é uma das formas mais eficientes de controlar o tráfego em auto-estrada. O objectivo é a homogeneização do fluxo (*i.e.*, homogeneizar a velocidade dos carros da mesma faixa de rodagem e a velocidade média entre diferentes faixas

de rodagem), reduzindo-se o risco de ocorrerem congestionamentos quando se verificam altas densidades de tráfego. Aproveitando as potencialidades do simulador SITS desenvolveu-se um novo algoritmo de controlo de tráfego baseado no conceito de sinais limitadores de velocidade variável (SLVV) que informam o condutor sobre qual a velocidade mais adequada. Assim, colocam-se sensores ao longo das faixas de rodagem que recolhem informação sobre as condições de tráfego, sendo a velocidade máxima de circulação adequada obtida ponderando a influência de vários factores (*e.g.*, condições da estrada, condições meteorológicas e restrições tecnológicas).

Realizaram-se algumas experiências com vista ao cálculo do desempenho do algoritmo de controlo desenvolvido, efectuando uma comparação entre o comportamento dinâmico do sistema com e sem controlo de velocidade. Para o efeito mantiveram-se as condições das anteriores simulações, tendo-se verificado que as *STF* obtidas em ambos são bastante diferentes o que comprova que o comportamento dinâmico do sistema de tráfego em malha fechada (*i.e.*, com controlador) é significativamente diferente do comportamento dinâmico do sistema de tráfego em malha aberta (*i.e.*, sem controlador).

6.3 Contribuições da tese

No capítulo 1 referem-se os principais objectivos deste trabalho, nomeadamente no que respeita ao simulador e à abordagem à análise dinâmica de um sistema de tráfego. Nesta secção realçam-se alguns dos contributos e dos aspectos mais originais inerentes ao simulador desenvolvido e à análise dinâmica de tráfego, nomeadamente o formalismo matemático utilizado e o algoritmo de controlo de tráfego propostos.

- **Contribuição para a simulação microscópica de tráfego**

- Desenvolveu-se uma nova técnica computacional de modelação orientada ao estado (*State Oriented Modelling* - SOM) que apresenta uma estrutura modular e flexível, proporcionando uma representação mais explícita e compreensível sobre o comportamento e propriedades dos veículos como entidades autónomas no sistema. Nesta estrutura cada veículo tem um estado que pode variar de acordo com o modelo de condução adoptado ou com as condições do meio que o rodeia. Esta nova técnica

de modelação permite a integração de vários modelos, nomeadamente no que respeita aos modelos, de condução, do tempo de reacção e do ambiente circundante.

- Na modelação do comportamento do condutor foram considerados, o perfil do condutor e três regimes de condução, o *free-flow*, o *car-following* e o *lane changing*. O perfil de condutor pode variar desde passivo até agressivo.
- Foi desenvolvido um novo modelo de percepção do condutor (*Perception Driver Model - PDM*), para a simulação de acelerações e travagens. Neste modelo a distância de segurança, para o veículo da frente, depende da distância mínima de segurança e do perfil do condutor. Além disso, o PDM permite que o condutor tenha a percepção de qual é o seu estado actual, o que lhe permite, respeitado o diagrama de estados definido pelo SOM, saber quais os comportamentos (estados) para os quais pode transitar, podendo conseqüentemente tomar a decisão mais conveniente. Assim, ultrapassam-se as limitações do ponto de vista comportamental que a generalidade dos modelos *car-following* apresentam.
- O tempo de reacção do condutor não está explicitamente representado no modelo, ao contrário do que acontece na maior parte dos modelos *car-following*. Devido à técnica orientada ao estado (SOM) é possível utilizar um modelo para o tempo de reacção do condutor e um modelo para gerar a distância crítica (PDM). A modelação de cada um dos fenómenos é realizada individualmente ultrapassando uma das limitações da generalidade dos modelos *car-following*, ou seja, o facto de assumirem que o veículo segue sempre o seu líder mesmo quando o espaçamento entre eles é significativo.
- O processo de mudança de faixa é baseado num modelo *lane changing* que funciona com um processo de tomada de decisão, considerando o perfil do condutor, em situações de mudança de faixa obrigatórias e arbitrárias.
- O controlo de tráfego é efectuado com base em sinais limitadores de velocidade variável (SLVV). Para o efeito desenvolveu-se um novo algoritmo de controlo para homogeneizar o fluxo de tráfego.

- **Contribuição para a análise dinâmica de tráfego**

- Desenvolveu-se um novo formalismo designado por Função de Transferência Estatística (*Statistical Transfer Function - STF*), que integra a estatística com a transformada de Fourier. Desta forma, ultrapassaram-se as dificuldades inerentes ao processo de análise de um sistema caracterizado como um ambiente não estruturado.
- Para descrever o comportamento dinâmico do fluxo de tráfego, adoptou-se um sistema de ordem fraccionária com atraso. Com este tipo de descrição obtém-se um melhor ajuste dos valores numéricos à *FT*, o que é mais difícil conseguir para o caso de uma *FT* de ordem inteira que iria requerer *FTs* mais complexas (*i.e.*, com mais pólos e zeros). Por outras palavras, o cálculo fraccionário constitui uma ferramenta matemática que se adapta melhor às características dinâmicas do sistema que se pretende analisar.
- A utilização da entropia, para a quantificação da dispersão de velocidades num determinado ponto da estrada, revelou-se uma ferramenta importante para analisar a interferência entre veículos que circulam na mesma faixa de rodagem.

- **Contribuição para o controlo de tráfego**

- Implementou-se um novo algoritmo para controlo de tráfego numa faixa da auto-estrada, baseado no conceito de sinais limitadores de velocidade variável (SLVV) que informam o condutor sobre qual a velocidade mais adequada. Neste algoritmo a velocidade máxima é definida ponderando a influência das condições da estrada, das condições meteorológicas e das restrições tecnológicas.
- Analisou-se o comportamento dinâmico do sistema de tráfego em malha fechada (*i.e.*, com controlador) e o comportamento dinâmico do sistema de tráfego em malha aberta (*i.e.*, sem controlador) tendo-se verificado que o as *STF* obtidas em ambos são bastante diferentes, o que comprova que o comportamento dinâmico é significativamente diferente.

6.4 Perspectivas de desenvolvimentos futuros

No trabalho desenvolvido há aspectos que podem ser melhorados ou explorados, o que permite perspectivar a possibilidade de desenvolvimentos futuros em várias vertentes a seguir identificadas. Por outro lado há um conjunto de ideias mais ambiciosas que implicarão um maior estudo e experimentação e que se poderão situar no âmbito de futuros trabalhos de investigação.

6.4.1 Simulador de sistemas inteligentes de transporte

- Desenvolvimento de um editor gráfico para especificar a rede de estradas, que permita desenhar alterações na rede de estradas e testar futuras alterações ao traçado existente. No SITS a informação da rede de estradas é transferida para o simulador através de um ficheiro com formato ASCII com uma estrutura específica.
- Estudo e desenvolvimento de interfaces gráficos com maiores potencialidades, nomeadamente com recurso a gráficos 3D, que permitam observar em diferentes perspectivas, e com um maior realismo, o que se passa numa determinada rede de estradas.
- Desenvolvimento do modelo do tempo de reacção do condutor a um estímulo que avalie a influencia de vários factores tais como: idade do condutor, estado psicológico (*e.g.*, sereno, irritado, cumpridor das regras de trânsito, estado alcoolizado), visibilidade, condições atmosféricas, características dos veículos, velocidade do veículo e condições de tráfego.
- Desenvolvimento de um modelo que permita integrar informação sobre os níveis de poluição produzidos pelos veículos numa rede de estradas.
- Desenvolvimento de modelos, para integrar no simulador microscópico SITS, que possibilitem a adopção de algoritmos para o controlo de fluxo nos ramais de acesso e o controlo de tráfego através de semáforos.

- Execução de um processo de estimação e validação com dados reais ou com informação mais completa, de forma a garantir que os modelos sejam o mais exactos possível, e por consequência, os resultados obtidos também. Assim, é necessário desenvolver uma actividade de estimação e validação dos modelos utilizando dados mais completos, por exemplo, dados recolhidos sobre uma porção de estrada com um comprimento mais elevado (*e.g.*, 1500~3000 mts) que proporcionem a variabilidade adequada para avaliar o impacto de vários factores, ou dados mais precisos sobre as características geométricas da estrada (*e.g.*, comprimento, curvatura, declive e estado do pavimento) através da recolha de dados de locais diferentes com características geométricas distintas.

6.4.2 Análise dinâmica de tráfego

- Complementar o estudo efectuado sobre evolução dos parâmetros k_B , p e α da *STF* para diferentes valores de máxima variação de velocidade Δv e de velocidade média v_{av} , através da realização de mais experiências para analisar a influência do comprimento da estrada e do fluxo de tráfego.
- Completar o estudo iniciado sobre evolução dos parâmetros k_B , p e α da *STF* para uma estrada com três ou mais faixas de rodagem.

6.4.3 Sistema de controlo de tráfego

- Desenvolvimento de um sistema de controlo assente numa estratégia de controlo adequada e eficaz, nomeadamente com o recurso a sistemas de apoio à decisão e a sistemas de optimização multi-objectivo. Pensa-se ser esta a forma mais eficaz para gerar dinamicamente o valor v_{\max} referido no sistema de controlo proposto.

6.5 Conclusão

Neste trabalho desenvolveu-se uma ferramenta de simulação microscópica para representar condições de tráfego reais em meios urbanos e auto-estradas. Efectuou-se uma análise dinâmica do fluxo de tráfego adoptando, para o efeito, um formalismo baseado na teoria de sistemas. Os resultados obtidos levam a concluir que o simulador desenvolvido fornece resultados adequados e muito próximos dos reais, e que é possível estudar sistemas de tráfego, na perspectiva da teoria de sistemas.

Bibliografia

Abdel-Aty, M.A., Kitamura, R. & Jovanis, P.P. (1997), “Exploring Route Choice Behaviour Using Geographic Information System-Based Alternative Routes and Hypothetical Travel Time Information Input”, *Transportation Research Record 1493*, National Research Council, Washington DC.

Adebisi O. and Sama G.N., (1989), “Influence of stopped delay on driver gap acceptance behavior”, *ASCE Journal of Transportation Engineers* 115, pp. 305-315.

Afonso, J., Sá da Costa e Huerre, B., (1994), “Alguns Aspectos da Modelação do Comportamento de um Condutor de Automóveis no Seguimento de uma Trajectória”, *1º Encontro Português de Controlo Automático*, vol. II, pp. 161-166. (In Portuguese).

Ahmed, K.I., Ben-Akiva, M.E., Koutsopoulos, H.N. e Mishalani, R.G., (1996), “Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior”, J. Lesort (Ed), *Transportation and Traffic Theory*, pp. 501-515. Pergamon.

Ahmed, K.I., (1999), “*Modeling Driver's Acceleration and Lane Changing Behavior*”, Doctoral Thesis in Transportation Systems and Decision Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environment Engineering, Cambridge, Massachusetts.

Algers, Staffan, Bernauer, Eric, Boero, Breheret, Marco Laurent, di Taranto, Carlo, Dougherty, Mark, Fox, Ken e Gabard, Jean-François, (2001), “Smartest-Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests”, pp. 33, (<http://www.its.leeds.ac.uk/smartest>).

Ambrosino, G., Timms, P., Turrini, M., Romanazzo, M., Valenti, G. (1996), “Evaluation Methodology for Energy Impacts of Traffic Network Based on Urban TT Services: the SLAM Project in Florence”, *Proc. of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems*, October 1996, Orlando, Florida

APAS (1995), “*APAS Roads 2: Assessment of Road Transport Models and System Architectures*”, European Commission Directorate General for Transport.

Autofoco, (2004), “Controlo remoto”, reportagem de patícia Carvalho, Publicação semanal nº 248, pp. 29-29.

Aycin, M.F., e Benekohal, R., (1998), “A linear acceleration car-following model development and validation”, J. Lesort (Ed.), *Transportation and Traffic Theory*, pp- 501-515. Pergamon.

Barceló J. e Casas J. (2002), “Dynamic Network Simulation with Aimsun”, in *Proc. International Symposium on Transport Simulation*, Yokohama, Japan.

Barceló, J., Casas, J., Ferrer, J.L. , e Garcia, D., (1997), “*Modeling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators: The Case of AIMSUN 2*”, Polytechnic University of Catalunya.

Barceló, J., Casas, J., Ferrer, J.L. e Garcia, D., (1996), “Modelling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators: The Case of AIMSUN2”, *TSS - Transport Simulation Systems* (<http://www.tss-bcn.com>).

Barceló, J., Ferrer, J.L., García, D., Florian, M. & Le Saux, E. (1996), “The Parallelization of AIMSUN2 Microscopic Simulator for ITS Applications”, *The 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems*, Florida, USA.

Barrett, C., K. Berkgigler, L. Smith, V. Loose, R. Beckmann. J. Davis, D. Roberts and M. Williams, (1995), “An operational description of TRANSIMS”, *Working Paper, LA-UR- 95-2393*, Los Alamos National Laboratories, Los Alamos.

Betsold, R., (1989), “Intelligent Vehicle Highway Systems for the United States – an Emerging National Program”, *JSK International Symposium - Technological Innovations for Tomorrow's Automobile Traffic and Driving Information Systems*, Japan, pp. 53-59.

Bishop D. (1997), “*Vehicle-Highway Automation Activities in the United States*”, U.S. Department of Transportation.

Booch, G. (1991), “*Object Oriented Design with Applications*”, The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., California, USA.

Boote, J. (1995), “Introduction to HLU Concepts I”, *NCAR Graphics User Conference*, Colorado, USA - <http://ngwww.ucar.edu/conf4.0/HLUconcepts1/025.html>.

-
- Brachman, R.J. & Anand, T. (1996), "The Process of Knowledge Discovery in Databases", *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, Fayyad et al (eds.) MIT Press, London, England, pp.37-58.
- Brilon W. (Ed.), (1991), "*Intersections without traffic signals IP*", Springer-Verlag, New-York.
- Broggi, A., Bertozzi, M., Fascioli, A. e Conte, G., (1999), "*Automatic Vehicle Guidance: the experience of the ARGO Autonomous Vehicle*", World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd.
- Brule, J.F. (1992), "Fuzzy Systems - A Tutorial",
http://www.csu.edu.au/complex_systems/fuzzy.html
- Buble, D. (1994), "Virtual Reality: Video Game or Business Tool", *Financial Times Management Report*, Financial Times Business Information, London, England.
- Chandler, R., Herman, R., e Montroll, E., (1958), "Traffic Dynamics; studies in car following", *Operations Research* n°6, 165+
- Clark, J., Daigle, G., (1997), "The Importance of Simulation Techniques in ITS Research and Analysis", *Proceedings of the Winter Simulation Conference*.
- Clegg, R. & Ghali, M. (1995), "*Road Network Simulator (RONETS) - Introduction to STEER¹ v2.0.*", York Network Control Group, University of York. Unpublished.
- Comissão Europeia - DG Energia e Transportes, (2003), "*A política europeia de transportes no horizonte 2010: a hora das opções*", publicado por Comissão Europeia - DG Energia e Transportes, Bruxelas.
- Cuena, J. (1988), "The Qualitative Modelling of Axis-Based Flow Systems: Methodology and Examples", *Proc. of European Conference on Artificial Intelligence* 1988, Munchen.
- Daganzo C.F. (1981), "Estimation of gap acceptance parameters within and across the population from direct roadside observation", *Transportation Research* 15B, pp. 1- 15.
- Dantzig, J.A. e Trucker, C.L., (2001), "*Modelling in Materials Processing*", Cambridge University Press.
- De Palma, Andre, Marchal, Fabrice, e Nestrov, Yuri, (1996), "METROPOLIS: A Modular system for Dynamic Traffic Assignment", *76th Annual Meeting of the Transportation Research*, Washington DC..

- DeKleer, J., Brown, J.S., (1984) “A Qualitative Physics based on Confluences”, *Artificial Intelligence Journal* (24), pp 7-83,
- Drew, D.R., (1986), “*Traffic flow theory and control*”, McGraw-Hill.
- Duarte, Fernando Baltazar Moreira, (2002), “*Análise de Robots Redundante*”, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Duncan, G. (1996), “Simulation at the Microscopic Level”, *Traffic Technology International*, Feb/Mar, pp.62-66.
- Duncan, G. (Undated), “Paramics Traffic Simulation Ltd”, <http://www.paramics.com/>
- Edie, L., (1961), “Car-following and steady-state theory for noncongested traffic”, *Operations Research*, n°9, 66+
- ENTERPRICE (1996), “The ENTERPRICE Project - Functional Specification”, *Tech Rep. Softeco Sismat*
- Exame Informática, 2003, “*Uma ponte para o futuro*”, pp.80
- Fambro D.B., Koppa R.J., Picha D.L. and Fitzpatrick K., (1998), “Driver perception-brake response in stopping sight distance situations” .*Transportation Research Record* 1628, pp. 1-7.
- Fathy, S., (1974), “Some ideas and projects in biomathematics” *Annual Rev. Biology*, pp 255.
- Fausett L., *Fundamentals of Neural Networks*, Prentice-Hall, 1994
- FHWA-JPO-96-012, (1996), “*The National Architecture for ITS: A Framework for Integrated Transportation into the 21 st Century*”, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- FHWA, (1997), “*revised Monograph on Traffic Flow Theory*”, Nathan H. Gartner, Carroll J. Messer, and Ajay K. Rathi (Eds). U.S., Department of Transportation, Federal Highway Administration..
- Figueiredo, Lino, Jesus, Isabel, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., e Martins de Carvalho, J. L., (2001 a)), “Towards the Development of Intelligent Transportation Systems, *IEEE Intelligent Transportation Systems*, California, E.U.A..

Figueiredo, Lino, Jesus, Isabel, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2001 b)), "Towards Emerging Intelligent Transportation Systems Technologies", *INES'2001- 5th International Conference on Intelligent Engineering Systems 2001*, Helsinki-Stockholm, Finland- Sweden.

Figueiredo, Lino, Jesus, Isabel, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2002), "Intelligent Transportation Systems ", *ASM'2002 - LASTED international Conference on Applied Simulation and Modelling*, Crete, Greece.

Figueiredo, Lino, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2003 a)), "Simulation and Dynamical Analysis of Freeway Traffic", *SMC'2003 - IEEE international Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Washington D.C., USA.

Figueiredo, Lino, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2003 b)) "On the Dynamics Analysis of Freeway Traffic", *IEEE 6th Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems*, Shanghai, China.

Figueiredo, Lino, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2003 c)), "*Fractional-Order Dynamics in Freeway Traffic*", *International Journal of Applied Mathematics*, Vol 14, No 4, pp 303-315, ISSN: 1311-1728.

Figueiredo, Lino, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2004 a)), "A System Approach to the Analysis of Traffic Dynamics", *2004 IEEE Int. Conf. on Networking, Sensing and Control*, Taipei, Taiwan.

Figueiredo, Lino, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2004 b)), "A Fourier Perspective of Freeway Traffic", *11th World Congress on Intelligent Transportation Systems*, Nagoya, Japan.

Figueiredo, Lino, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2004 c)), "Fractional-Order Dynamics in Freeway Traffic", *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol 13, No 2, pp 167-179.

Figueiredo, Lino, Tenreiro, J.A. Machado, Ferreira, J.R., (2004 d)), "Dynamical Analysis of Freeway Traffic", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol 5, No 2, ISSN: 1524-9050.

Forbus, K., (1984) "Qualitative Process Theory", *Artificial Intelligence Journal* (24), pp 85-168,

French, Robert L., (1999), "The IEEE and ITS", R&D French Associates, *IEEE Intelligent Systems*, 75-77.

- Fujimoto, R.M. (1990), "Parallel Discrete Event Simulation", *Communications of the ACM*, Vol.33, No.10, pp.31-53.
- Fujimoto, R.M. (1990), "Parallel Discrete Event Simulation", *Communications of the ACM*, Vol.33, No.10, pp.31-53.
- Gaziz, D., Herman, R. e Potts, B., (1959), "Car-following theory of steady-state traffic flow", *Operations Research*, n°9, 449+.
- Gaziz, D., Herman, R. e Rothery, R., (1961), "Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow", *Operations Research*, n°9, 545+.
- Gerlough, D. and Huber, M., (1975), "*Traffic flow theory. A monograph*", TRB Special Report 165, Washington.
- Ghosh, S. and Lee T. (2000), "*Intelligent Transportation Systems – New Principles and Architectures*", CRC Press.
- Gipps, P.G., (1981), "A Behavioural car-following model for computer simulation", *Transportation Research-B 15B*, pp. 105-111.
- Gipps, P.G., (1986), "A model for the structure of lane changing decisions", *Transportation Research-20B(5)*, pp. 403-414.
- Goldberg, David E., (1989), "*Genetic Algorithms in search, Optimization, and Machine Learning*", Addison-Wesley Publishing Company.
- Graefe, V. e Kuhnert, K., (1991), "Vision-Based Autonomous Road Vehicle", *Vision-Based V. Guidance, Berlin*, pp.1-29.
- Hamed M.M., Ease S.M. and Batayneh R.R., (1997), "Disaggregate gap-acceptance model for unsignalized T-intersections", *ASCE Journal of Transportation Engineering* 123, pp. 36-42.
- Hanebutte, U.R. & Tentner, A.M. (1995), "Traffic Simulations on Parallel Computers Using Domain Decomposition Techniques", *The 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems*, Yokohama, Japan.
- Helbing, D., (1996), "Derivation and empirical validation of a refined traffic flow model", *Physica A* 233, 253-282.
- Helbing, D., e Treiber, M., (1998), "Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations", *Journal de Physique I* Letter 81.

-
- Herman R. and Weiss G.H. (1961), "Comments on the highway crossing problem", *Operations Research* 9, pp. 838-840.
- Hidas, P. and K. Behbahanizadeh, (1999), "Microscopic Simulation Of Lane Changing Under Incident Conditions", *Transportation and Traffic Theory (ISTTT)*, Abbreviated Presentation Sessions, (Ed. A. Ceder), pp. 53-70.
- Holland, J. H., (1992), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, 1ª edição, MIT Press.
- Hoogendoorn, Serge P. e Piet H.L. Bovy, (2001), "State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling", *Special Issues on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of Systems and Control Engineering*, Delft University of Technology.
- Horiguchi, R., Katakura, M., Akahane, H. & Kuwahara, M. (1994), "A Development of a Traffic Simulator for Urban Road Networks: AVENUE", *1994 Vehicle Navigation and Information Systems Conference Proceedings*, Yokohama, Japan, pp.245-250.
- Horiguchi, R., Kuwahara, M., Katakura, M., Akahane, H. & Ozaki, H. (1996), "A Network Simulation Model for Impact Studies of Traffic Management: AVENUE Ver.2", *The 3rd Annual World Congress on Intelligent Transport Systems*, Florida, USA.
- Hotta, M., Yokota, T., Nagai T. & Inoue, T. (1995), "Congestion Analysis and Evaluation by Traffic Simulation", *The 2nd World Congress on Intelligent Transport Systems*, Yokohama, Japan
- Ibid, (1998), "Validation of Multi-Regime Microscopic Traffic Simulation Program", *78th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, July.
- Janet, (1992), "*Strategic Plan for IVHS in the United States*", IVHS AMERICA.
- Jayakrishnan, R., Mahmassani, H. e Hu, Ta-Yin, (1994), "*An Evaluation Tool for Advanced Traffic Information Systems in Urban Networks*", *Transportation Research Record C*, Vol. 2, No. 3, pp. 1929-2147.
- Junchaya, T., Chang, G-L. & Santiago, A. (1992), "*Advanced Traffic Management System: Real-Time Network Traffic Simulation Methodology with Massively Parallel Computing Architecture*", *Transportation Research Record* 1358, National Research Council, Washington DC, pp.13-21.
- Kallberg, H., (1971), "*Traffic simulation*", Helsinki University of Technology, Transportation Engineering.

KITS (1996), “*DRIVE II R&D Programme*”, DRIVE Project V2039, Deliverable No. 13, Final Assessment of Applications; Tested Methodologies and Models.

Koshi M., (1989), “Development of the Advanced Vehicle Road Information Systems in Japan – the CACS Project and after“, *JSK International Symposium - Technological Innovations for Tomorrow's Automobile Traffic and Driving Information Systems*, Japan, pp. 9-19.

Lerner N., Huey R., McGee H. and Sullivan A. (1995), “*Older driver perception-reaction time for intersection sight distance and object detection*”. Report FHWA-RD-93-168, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC.

Leutzbach, W., (1988), “*Introduction to the Theory of Traffic Flow*”, pp. 143-146

Lin, Y-B. & Fishwick, P.A. (1995), “Asynchronous Parallel Discrete Event Simulation”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*.

Lopes, Jorge e Costa, Pedro, (2004) “Incident Management through the Brisa Operational Control Centre”, Proceedings of the 11th World Congress on ITS, Nagoya, Aichi, Japan.

Machado, J. A. Tenreiro (2003). “A probabilistic Interpretation of the Fractional-Order differentiation”, in *Journal of Fractional Calculus & Applied Analysis*, vol. 6, n. 1, pp. 73-80.

Mahmassani, Hani, e Srinivas Peeta, (1994), “*Network Performance Under System Optimal and User Equilibrium Dynamic Assignments: Implications for Advanced Traveler Information Systems*”, Transportation Research Record 1408.

Mahmassani H. and Sheffi Y. (1981), “*Using gap sequences to estimate gap acceptance functions*”, Transportation Research 15B, pp. 143-148.

Manstetten D., Krautter W. e Schwab T. (1998), “Traffic Simulation Supporting Urban Control System Development”, in *Proc. of the 5th World Conference on Intelligent Transportation Systems*, Seoul, Korea.

Martin, G., Toledo, F., Moreno, S. (1994), “Qualitative Simulation of Traffic Flows for Urban Traffic Control”, *Artificial Intelligence Applications to Traffic Engineering*, Bielli, M., Ambrosino, G., Boero, M. (Eds), VSP, Utrecht, The Netherlands

Masaki, (1998), “Machine-Vision Systems for Intelligent Transportation Systems”, *IEEE Intelligent Systems*, MIT, pag. 24-3.

-
- McDonald, M., Brackstone, M. and Sultan, B., (1998), "Instrumented vehicle studies of traffic flow models", *Proceedings of the third International Symposium on Highway Capacity*, volume 2, pp.755-774.
- McQueen, B. and McQueen, J., (1999), "*Intelligent Transportation Systems Architectures*", Artech House.
- McTrans Catalog, (1996), The University of Florida Transportation Research Center.
- Miller A.J. (1972), "Nine estimators of gap acceptance parameters", *Proceedings of the 5th International Symposium on the Theory of Traffic Flow*, pp. 215-235.
- Murphy, John, (undated), "*Overview of Modelling*",
<http://www.eeng.dcu.ie/~murphyj/the/the.html>)
- Nagel, K., (1966), "Particle hopping models and traffic flow theory", *Phys.Rev. E*,53(5), pp. 46-55.
- Nagel, K, Schreckenberg, M., (1992), "*A cellular automaton model for freeway traffic*", *Journal de Physique I France* 2, 2221-2229.
- Newell, G., (1961), "Nonlinear effects in the dynamics of car-following", *Operations Research* 9, 209+.
- OECD (1990), "*1st OECD Workshop on Knowledge-Based Expert Systems in Transportation*", Jamsaa H. (Ed.), VTT, Espoo, Finland.
- OECD (1992), "*2nd OECD Workshop on Knowledge-Based Expert Systems in Transportation: Operational Experiences and Perspectives*", Transport Canada, Montreal, Canada.
- Ogata K., (1982), "*Engenharia de Controlo Moderno*", Prentice Hall do Brasil, ISBN 85-7054-019-1.
- Ozaki, H., (1993), "Reaction and anticipation in the car-following behavior", C.F. Daganzo (Ed.), *Proceedings of the 12th International Symposium on the Theory of traffic Flow and Transportation*, New York, pp. 349-366. Elsevier.
- Papageorgiou M., Diakaki C., Dinopoulou V., Kotsialos A., e Wang Y., (2003), "Review of Road Traffic Control Strategies", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No 12, pp. 2043-2067.

Parent, Michel, Dumontet, François, Texier, Pierr-Yves e Leurent, Fabien, (1994), "Design and Implementation of a Public Transportation Systems Based on Self-Service Electric Cars", *IFAC/IFORS congress*, China.

PIARC, Committee on Intelligent Transport, (2000), "ITS Handbook 2000: Recommendations from the World Road Association (PIARC)", Edited by Kan Chen and John C. Miles, Artech House ITS Library, London.

Pipe, L.A., (1953), "An Operational Analysis of traffic Dynamics", *Journal of Applied Physics*, vol.24, n°1, 274-287

Quadstone Lmd., (1999), "*Quadstone Limited. Paramics Traffic Simulation System Overview*".

Rodriguez-Moscoso, J.J., Chin, S-M., Santiago, A. & Roland, R. (1989), "Object-Oriented Programming in Traffic Simulation", *Traffic Control Methods. Proceedings of the 5th Engineering Foundation Conference*, California, USA, pp.177-190.

Saad F., Delhomme P. and Van-Elslande P., (1990), "Drivers' speed regulation when negotiating intersections", *Proceedings of the 11th International Symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, pp.193-212.

Sadek, A.W., Smith, B.L. & Demetsky, M.J. (1997), "Dynamic Traffic Assignment: A Genetic Algorithms Approach", *Transportation Research Board 76th Annual Meeting*, Washington DC.

Sauthier, E., Faltings, B. (1992), "Model-Based Traffic Control", *Proc. of the Int. Conf. on Artificial Intelligence Applications in Transportation Engineering*, San Buenaventura, Ca, USA, pp 133-152

Sayed, D., (1997), "Estimating the safety of unsignalized intersection using traffic conflicts", *Proceedings of the third international conference on intersection without traffic signals*, pp. 230-235, Portland.

Schreckenberg, M. e Wolf, D.E., (Eds.), (1998), "*Traffic and Granular Flow'97*", Singapore.

Shepherd, S. P., (1992), "*Review of Traffic Signal and Control*", Institute for Transport studies, University of Leeds.

Shibata, J., (1999), "Progress in intelligent transportation systems in the US, Europe and Japan", *ISATA Magazine*, Sumitomo Electric Industries Ltd and R. French, R&D French Associates, pp. 27-29.

-
- Shladover, S., (1995), "Review of the State of Development of Advanced Vehicle Control Systems (AVCS)", *Vehicle System Dynamics* 24, 551-595.
- Skabardonis, Alexander, e May, Adolf D., (1997), "*Simulation Models for Freeway Corridors: State-of-the-Art and Research Needs*", Institute of Transportation Studies, the University of California, Berkeley.
- SMARTTEST Report, (2000), "*SMARTTEST Final Report For Publication*",(2000), Project Part Funded By The European Commission Under The Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme.
- Smith, S.A. (1985), "*Freeway Data Collection for Studying Vehicle Interaction*", Vol. 1, Technical report FHWA/RD-85/108, Federal Highway Administration, Office of Research, Washington D.C.
- Smulders S., (1990), "Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs", *Transport Research Part B*, Vol. 128, pp. 111-132.
- Subramanian, H., (1996), "*Estimation of car-following models*", Master Thesis, MIT, Department of Civil and Environment Engineering, Cambridge, Massachusetts.
- Stretz, P, e Berkgigler, K.P., (1998), "Microsimulation", *Tab 4 in Transportation Analysis Simulation System (TRANSIMS)*, version 1.0, Los Alamos National Laboratory.
- Sugimoto, T., Nonaka, S. & Oohama, H. (1992), "Traffic Prediction and Qualitative Reasoning", *Proc. of the Int. Conf. on Artificial Intelligence Applications in Transportation Engineering*, San Buenaventura, Ca, USA, pp 3-18
- Sussman, Joseph, (2000), "*Introduction to transportation Systems*", Artec House, Intelligent transportation systems library, Lndon.
- Sutton, J.C. (1996), "Role of Geographic Information Systems in Regional Transportation Planning", *Transportation Research Record 1518*, National Research Council, Washington DC, pp.25-31.
- Tokuyama, H., (1997), "*Asia-Pacific Projects Status and Plans*", US Dept. of Transportation.
- Toledo, Tomer, (2003), "*Integrated Driving Behavior Modeling*", Doctoral Thesis in Transportation Systems, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Cambridge, Massachusetts.

- Tomizuka, M., (1997), "Automated Highway Systems – An Intelligent Transportation System for the Next Century", *IEEE/ASME Int.. Conf. Advan. Mechatronics*, Japan.
- Tsang, E. (1993), "*Foundations of Constraint Satisfaction*", Academic Press.
- Ulmer, B., (1994), "VITA II: Active Collision Avoidance in Real Traffic", *IEEE Int. Vehicle Symp.*, Piscataway, pp. 1-6.
- Wiedemann, R., (1974), "*Simulation des Strassenverkehrsflusses*", Technical report, Institute for traffic Engineering, University of Karlsruhe, Germany.
- Wolfram, S., (1986), "*Theory and Applications of Cellular automata*", World Scientific.
- Van Aerde, M. (1985), "*Modeling of Traffic Flows, Assignment and Queuing in Integrated Freeway/Traffic Signal Networks*", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada.
- van Aerde, M. (1999), "*INTEGRATION: Users Guide for Model Version 2.0.*", Transportation Systems Group, Queen's University and M. Van Aerde Associates, Ltd. Canada.
- van Grol, H.J.M. & Bakker, A.F. (1991), "Special-Purpose Parallel Computer for Traffic Simulation", *Transportation Research Record 1306*, National Research Council, Washington DC, pp.40-48.
- von Newman, (1949), "*Theory and Organisation of Complicated Automata*"
von Newman, (1963), "*Collected works*"
- Vonderohe, A.P., Travis, L., Smith, R.L. & Tsai, V. (1993), "*NHCRP Report 359: Adaptation of Geographic Information Systems for Transportation*", National Research Council, Washington DC.
- Yang, Q. & Koutsopoulos, H.N., (1996), "A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems", *Transportation Research C 4(3)*, pp. 113-129.
- Yu, Lei, (1998), "*Simulation of Congested Dallas Freeways: Microscopic vs. Macroscopic?*", Proposal Submitted to the Texas Department of Transportation, Texas Southern University.
- Zadeh, Lotfi A., (1965), "Fuzzy sets", *Inf. Control 8*, 338-353.
- Zadeh, Lotfi A., (1973), "Fuzzy Logic", *Trans. on Systems, Man and Cybernetics SMC-3*, 28-44.

Sítios WWW

http#1: <http://www.itsa.org/whatits.html>

http#2: <http://itsa.org> – “*What is ITS*”

http#3: <http://www.geomatics.org/roadmap-s/markets-4.html>

http#4: <http://www.imt.mx/Espanol/TLCAN/5yplan/schp3.html>

http#5: <http://www2.ing.puc.cl/~iing/ind6.html>

http#6: <http://www.its.go.jp/ITS/index.html> - “*Comprehensive plan for ITS*”, Japanese ministry of land infrastructure and transport road bureau.

http#7: <http://www.netpark.or.jp/ahs/eng/c08e/> - “*Smart Cruise Systems Demonstrations Around the World*”,

http#8: http://www.civil.utah.edu/~blaser/MM_project/transport/index.html - “*Innovative Transportation Solutions*”, Transportation Eng. at the University of UTAH.

http#9: <http://www.wsdot.wa.gov/PugetSoundTraffic/webflow/> - “*Webflow32*”, Washington State Department of Transportation

http#10: <http://www.netpark.or.jp/ahs/eng/c03e/> - “*Smart Cruise Systems*”, Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association

http#11: <http://www.its.washington.edu/transitwatch/> - “*Smart Trek: Transit Watch*” ITS Research Program, UW

http#12: http://busview.its.washingtinedu/busview_help.html - “*Busview*”, Intelligent Transportation Systems Research University of Washington

http#13: <http://eewww.eng.ohio-state.edu/citr/Demo97/osu-av.html> - “*The Osu Autonomous Vehicle*”, The Ohio State University.

http#14: <http://www.its.go.jp/ITS/whatsITS/safety.html> - “*Assistance for Safe Driving*”, Japanese ministry of land infrastructure and transport road bureau.

http#15: <http://www.itsa.org> - “*Advanced Rural Transportation Systems Strategic Plan*”, U.S. Department of Transportation, 1998.

- http#16 : <http://www.its.ho.jp/ITS/whatsITS/safety.html> - “ULTra - Urban Light Transport – Advanced Transport Systems Lda” University of Bristol.
- http#17: <http://www.ivhs.washington.edu>- “Intelligent Transportation Systems”, University of Washington.
- http#18: <http://www.gatech.edu> - Georgia Tech University.
- http#19:<http://www.english.ptv.de/produkte/dynemo.asp> - “Dynemo Traffic Simulation Model”
- http#20: <http://www.cwf.cc.utexas.edu/~kraah/dtautx.com>, 1999.
- http#21: <http://www.itepsg1.epfl.ch/~metro/papers/trb97/>, 1999.
- http#22: <http://www.tss-bcn.com/products.html> - “Transport Simulation Systems (Aimsun2)”
- http#23: <http://www.its.leeds.ac.uk/smarest> - Leeds University, Smartest Project
- http#24: <http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/english.html> - University of Tokyo
- http#25: <http://www.trucksim.com/index.html> - “CARSIM Simulation Model”
- http#26: <http://www.its.leeds.ac.uk/smarest/links.html> - “Smartest Links”
- http#27: http://ops.fhwa.dot.gov/Travel/Traffic_Analysis_Tools/tsis_5.0.htm
- http#28: <http://www.fhwa.tsis.com> - Federal Highway Administration (Corsim).
- http#29: <http://www.its.leeds.ac.uk/smarest/abstools.html> - Smartest Tools.
- http#30: <http://its.mit.edu/products/simlab/node29.html>
- http#31: <http://www.hutif/units/Transportation/Research/hutsim.html> - “Hutsim Traffic Simulation Model”
- http#32_ <http://www.kldassociates.com>, 2000
- http#33: <http://www.fhwa.gov> - Federal Highway Administration
- http#34: <http://www.paramics.com> - “Paramics Traffic Simulation Model”
- http#35: <http://swutc.tamu.edu/Reports/167602-1.pdf> Traffic Simulation Models.
- http#36: <http://www.transims.tsasa.lanl.gov/documents-research98.html> -Transims

http#37:[http:// www.quadstone.com/paramics/ext](http://www.quadstone.com/paramics/ext) - Quadstone Limited's Paramics site

http#38:

<http://europa.eu.int/comm/transport/themes/network/english/its/html/index.html>

http#39: <http://www.its.go.jp/ITS/home.html>

http#40: <http://www2.iestradas.pt/aestrada/transito.asp>

http#41:<http://www.bbc.co.uk/london/congestion/maps>

http#42: <http://www.viaverde.pt>

http#43: <http://www.trasporti.ing.unibo.it/personale/schweizer/mait/>

http#44: <http://faculty.washington.edu/jbs/itrans/parkshuttle.htm>

http#45: <http://www.path.berkeley.edu/PATH/Research/>

http#49: <http://www.artimis.org/>

http#50: http://www.ertico.com/what_its/succstor/compacon.htm

http#51: http://www.dot.state.ia.us/district1/highway_helper.htm

http#52: www.trauma-conference-berlin.de/ek_61011_2_Navigationssysteme_Philips.html

http#53: www.ertico.com/its_basi/succstor/countcon.htm

http#54: www.ertico.com/its_basi/succstor/dis_dcon.htm

http#55: www.cordis.lu/telematics/tap_transport/research/projectsum/chauffeur.html

http#56: <http://www.cordis.lu/cost-transport/src/cost-323.htm>

http#57: www.oregon.gov/ODOT/MCT/DOWNHILL.shtml

http#58: www.tubexpress.com/

http#59: www.its.berkeley.edu/computing/software/FREQ.html - FREQ

http#60: www.disca.upv.es/pmanzoni/r/sim/r-simart.html

http #61: http://www.brisa.pt/webnew/brisa_barranti_00.asp - Brisa – Auto-estradas de Portugal

ANEXO

Anexo A – Geometria da Estrada

Anexo A

Geometria da Estrada

Estrutura do ficheiro com informação sobre a rede de estradas para o exemplo da figura 4.8.

Número da via	Tipo de nodo Inicial	Coordenada x,y ponto inicial	Coordenada x,y ponto final	Declive	Ordenada na origem	Possibilidade de mudança de faixa		
1	<u>0</u>							
1	0	60	300	60	0	60	<u>3</u>	
1	300	60	420	60	0	60	0	
1	420	60	300	5	60	0	60	<u>3</u>
1	<u>1</u>							
2	0							
2	0	65	200	65	0	65	1	
2	200	65	300	65	0	65	2	
2	300	65	310	65	0	65	0	
2	310	65	400	65	0	65	3	
2	400	65	420	65	0	65	0	
2	420	65	520	65	0	65	2	
2	520	65	300	5	65	0	65	1
2	1							
3	0							
3	0	70	200	70	0	70	2	
3	200	70	310	70	0	70	0	
3	310	70	400	70	0	70	2	
3	400	70	520	70	0	70	0	

```
3 520 70 3005 70 0 70 2
3 1
4 0
4 100 100 150 100 0 100 0
4 150 100 200 75 -0.5 175 0
4 200 75 210 75 0 75 0
4 210 75 310 75 0 75 2
4 3 3 ← Número da via de interligação
5 0
5 150 15 200 15 0 15 0
5 200 15 300 55 0.4 -65 0
5 300 55 310 55 0 55 0
5 310 55 420 55 0 55 3
5 3 1
6 0
6 220 150 300 150 0 150 0
6 300 150 350 125 -0.5 300 0
6 350 125 400 75 -1 475 0
6 400 75 410 75 0 75 0
6 410 75 520 75 0 75 2
6 3 3
```

Tipo de nodo:

- 0 nodo de entrada
- 1 nodo de saída
- 2 nodo normal
- 3 nodo fim de rampa de acesso

Possibilidade de mudança de faixa num determinado segmento de recta:

- 0 não é possível mudar de faixa;
- 1 é possível mudar para a faixa à esquerda;

- 2 é possível mudar para a faixa à direita;
- 3 é possível mudar para ambas as faixas