
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	161
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- N° 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 $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 1$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	183
Figura 5.20 - Estrada com 2 faixas de rodagem ($n_1 = 2$)	185
Figura 5.21 - Diagrama de Bode das amplitudes de $T_{1,k}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$, $k = 1,2$	186
Figura 5.22 - Diagrama Polar da STF para $\omega \in [0, 0.07]$ rad s^{-1} de a) $T_{1,1}(s;1000,0)$ e b) $T_{2,2}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1} , $\Delta v = 20 \text{ km h}^{-1}$	187
Figura 5.23 - Diagrama Bode de $T_{1,k}(s;1000,0)$ $v_{av} = 90 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ 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 $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ 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 $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ 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 $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ 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 $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ 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 $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ 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 $n_1 = 2$, $l = 1000 \text{ m}$ e $\phi_1(t;0) \in [0.12, 1]$ veículos s^{-1}	190
Figura 5.30 - Estrada com 3 faixas de rodagem ($n_1 = 3$)	191
Figura 5.31 - Diagrama Bode de $T_{1,k}(s;1000,0)$, $v_{av} = 50 \text{ km h}^{-1}$, $n_1 = 3$, $l = 1000 \text{ m}$, $\phi_k(t;0) \in [0.12, 1]$ 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 $v_1(t;0) \in [30, 70]$ 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 $v_1(t;0) \in [30, 70]$ 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 $v_1(t;0) \in [30, 70]$ 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
