

# SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE

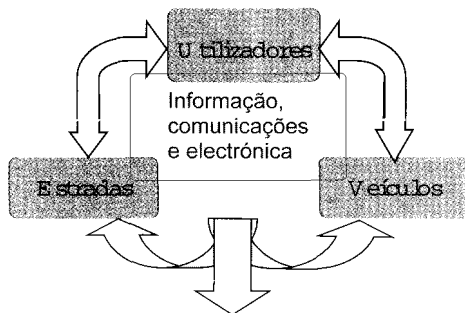
**LINO FIGUEIREDO, ISABEL JESUS, J. A. TENREIRO MACHADO,**  
ISEP, Rua Dr. Antonio Bernardino de Almeida, 4200-072 Porto  
email:{lino, isj, jtm}@dee.isep.ipp.pt

**JOSÉ RUI FERREIRA**  
FEUP, Rua Roberto Frias, 4200-465 Porto  
email:jrf@fe.up.pt

**Resumo:** Neste trabalho são apresentados os sistemas inteligentes de transporte (SITs). Assim, analisa-se o estado de arte dos SITs, focando os seus sub-sistemas mais relevantes, dando-se um ênfase particular à modelização e à simulação nos SITs. Nesta perspectiva referem-se vários projectos, já desenvolvidos ou em curso, nesta área científica.

## 1 - Introdução

Nas últimas décadas a integração das telecomunicações e da informática nos sistemas de transporte deu lugar ao conceito dos Sistemas Inteligentes de Transporte (SITs). A aplicação das tecnologias dos sistemas de informação, comunicações, controlo e electrónica, permitem aos SIT criarem vias de comunicação, veículos e utilizadores "mais inteligentes" (Fig. 1). Espera-se que a aplicação destas tecnologias melhore a operação e a segurança dos sistemas de transporte, promovendo rotas mais eficientes e mecanismos de advertência de acidentes.



Efficiência nos Transportes, Conforto,  
Segurança e Protecção do Meio Ambiente

Fig. 1 - Sistemas Inteligentes de Transporte

Actualmente os SITs estão a revolucionar vários aspectos dos transportes, tais como a redução dos congestionamentos de trânsito, o incremento da segurança, a optimização de transportes públicos e a melhoria da logística e da distribuição. Os SITs podem ser aplicados em áreas como a gestão de viagens, o controlo e a informação sobre o tráfego, a operação com veículos comerciais e a optimização da circulação de frotas de veículos ou de veículos de emergência.

Um meio de optimização dos recursos estruturais disponíveis, no contexto da coordenação do fluxo de veículos, consiste em adoptar sistemas de supervisão e controlo. Na realidade o tráfego de veículos nas zonas urbanas é uma expressão do comportamento humano, sendo, por isso, variável no tempo e no espaço, pelo que o seu controlo requer a capacidade de adaptação para possibilitar acções adequadas. O uso de sistemas computacionais permite aumentar a adaptabilidade na coordenação do fluxo dos veículos. Assim, através da utilização de tecnologias de monitorização e controlo é possível conceber sistemas que actuem (em tempo real) em resposta à informação recebida directamente das vias de comunicação.

Nesta perspectiva, verificou-se um desenvolvimento assinalável dos sistemas SITs em todo o mundo. Os avanços tecnológicos associados à crescente atenção com o aumento do número de veículos motorizados e as exigências de maior segurança para os utilizadores, originou a criação de projectos de investigação e desenvolvimento nesta área.

Tendo em conta os aspectos referidos anteriormente, este artigo apresenta o estado actual da arte na área dos SITs e encontra-se organizado em cinco secções. Na secção dois é efectuada uma breve referência à evolução histórica dos SITs na Europa, nos EUA e no Japão. Na secção três introduziu-se as categorias mais relevantes dos SITs. De seguida, na secção quatro, analisou-se as ferramentas de modelização e de simulação dos SITs e descreveram-se alguns dos projectos de maior interesse nesta

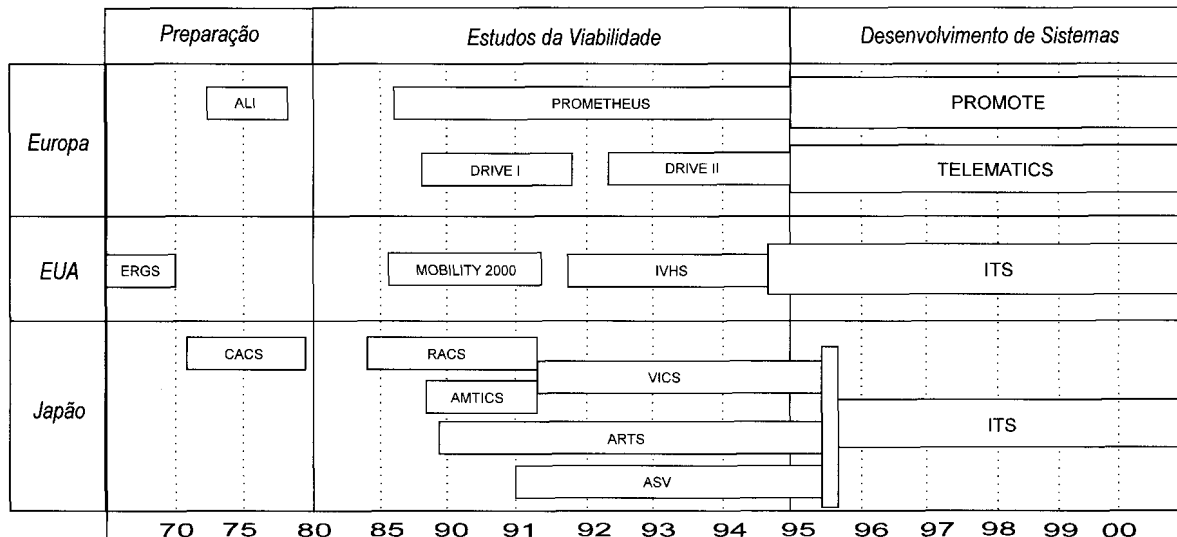


Fig. 2 - Evolução histórica dos SITs<sup>[2]</sup>

área. Por último, na secção cinco referem-se as principais conclusões que decorrem deste artigo.

## 2 - Evolução histórica

Os SITs surgiram no início dos anos trinta, tendo sofrido uma evolução inicial muito lenta devido à ausência da tecnologia necessária<sup>[1]</sup>. Os desenvolvimentos principais surgiram na Europa, nos EUA e no Japão<sup>[2]</sup>, tendo atravessado três fases distintas, (Fig. 2):

- **Preparação** - (1930 - 1980) Foi o primeiro período de desenvolvimento dos SIT que se confrontou com a falta de tecnologia necessária, pelo que a construção de novas estradas era a estratégia mais atractiva. O primeiro sistema SIT consistiu nos semáforos criados em 1928 nos EUA. Em 1939, em New York, foi apresentado o conceito de sistemas de estradas automáticas (AHS). Mais recentemente, a década de setenta foi muito importante para os SIT, devido à introdução do microprocessador e ao início do desenvolvimento do GPS (Global Position System).
- **Estudo da Viabilidade** - (1980 - 1995) Foi um período caracterizado por uma explosão de programas de desenvolvimento patrocinado pela indústria e pelos governos. Esses programas emergiram na sequência da evolução das tecnologias básicas para os SIT, criados na fase precedente.
- **Desenvolvimento de Sistemas** - (1995 - ) É um período caracterizado pelo estabelecimento de sistemas de alto nível para os SIT, tendo alguns destes tido um êxito assinalável e estando outros ainda numa fase de desenvolvimento.

De seguida, descrevem-se mais em pormenor alguns dos projectos realizados durante as três fases de desenvolvimento dos SIT na Europa, nos E.U.A e no Japão.

### 2.1 - Os SITs na Europa

Na década de setenta os SITs começaram a ser uma área de forte investigação e, nesse contexto, iniciou-se o projecto ALI (Autofahrer Leit und Information System) na Alemanha. Posteriormente, em 1986, foi estabelecido o programa PROMETHEUS (Program for European Traffic with Efficiency and Unprecedented Safety) e, em 1988, foi lançado o Projecto DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe). Estes dois programas, deram mais tarde origem aos projectos PROMOTE e Telematics Implementation Coordination Organization que, em conjunto, agregaram os sectores público e privado com a finalidade de implementarem projectos relativos a sistemas de transporte na Europa.

Mais recentemente, com a normalização criada pela CEN e pela ISO, inicializou-se um novo período na Europa. Um exemplo consistiu no projecto "Chauffeur", liderado pela Daimler-Benz envolvendo vários institutos de pesquisa, tendo como objectivo conseguir um conjunto de dois camiões conduzidos por um único operador humano.

Nos anos noventa um grupo liderado pela Daimler-Benz desenvolveu o VITA II. Este projecto consistiu num veículo incorporando 10 câmaras e 60 processadores, com a finalidade de guiar o veículo no centro da pista, mantendo uma distância segura dos carros que se encontravam à sua frente evitando, simultaneamente, eventuais colisões.

Vários outros projectos foram desenvolvidos no espaço do programa PROMETHEUS, tais como o projecto ARGO [4] que pretendia projectar-se e tornar-se num veículo de soluções inovativas para o futuro. Este programa foi seguido pela DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe) para o desenvolvimento e teste de sistemas de comunicação e para a gestão de tráfego<sup>[3]</sup>. Em 1991 foi formada a organização ERTICO (European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization) para suportar a execução e o desenvolvimento do projecto telemático dos transportes na Europa.

### 2.2 - Os SITs nos EUA

Nos EUA os SITs conheceram um início anterior ao verificado na Europa. Assim, na década de cinquenta, era colocado em operação um sistema hidráulico que variava fisicamente o número de pistas num determinado sentido de trânsito, de acordo com a intensidade de tráfego (Fig. 3).

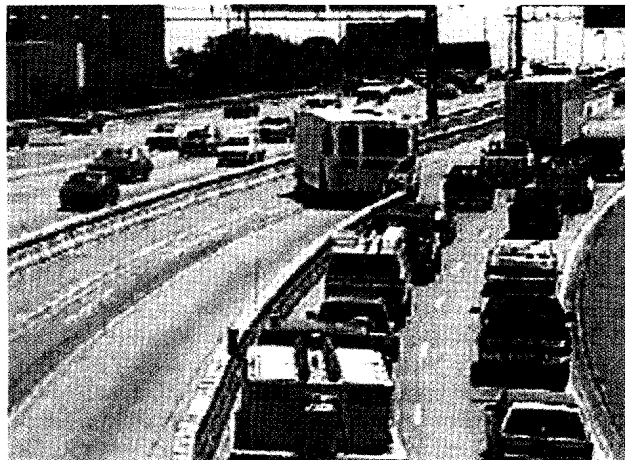


Fig. 3 - Máquina que altera o número de faixas de rodagem<sup>[6]</sup>

Nos anos sessenta apareceu o primeiro computador a controlar sinais de trânsito e foi criado o projecto ERGS (Electronic Route Guidance Systems) que usava um sistema de comunicações nos dois sentidos, através de um veículo que circulava nas estradas e que fornecia a orientação sobre a melhor rota.

Em 1968 iniciou-se investigação sobre sinalização, a fim de que os utilizadores a captassem correctamente com rapidez. Assim, analisaram-se sinais "tele-ópticos" ou "holográficos", nomeadamente com informação projectada na atmosfera.

Nos anos oitenta a equipa de estudo da MOBILITY 2000 formou o IVHS América (Intelligent Vehicle Highway Systems) com o intuito de estabelecer um fórum para consolidar o interesse nos SITs e promover a cooperação internacional. Em 1994 o USDOT (United States Department of Transportation) atribuiu o nome de IVHS aos SIT Americanos (Intelligent Transportation Society of America) iniciando o desenvolvimento de diversos projectos.

Após estes desenvolvimentos dos SIT o passo seguinte consistiu na sua implementação, nomeadamente:

- Em 1992 o IVHS Strategic Plan, formulou um plano de aplicação dos SIT, com um horizonte temporal de vinte anos;
- Em 1995 preparou-se o plano nacional dos EUA na área dos SITs. Em conjunto foram desenvolvidos sistemas específicos para os condutores.
- Iniciou-se o projecto AHS (Automated Highway System), conduzido pela NAHSC (National Automated Highway System Consortium).

Mais recentemente, em 1996, foi iniciado o projecto ITI (Intelligent Transportation Infrastructure) para implementação dos SIT nas maiores cidades dos EUA.

### 2.3 - Os SITs no Japão

O Japão foi um dos pioneiros na área dos SITs. Numa primeira fase, em 1973, a CACS (Comprehensive Automobile Traffic Control System) em conjunto com o ministério do comércio e indústria, iniciou o desenvolvimento de sistemas de orientação em estradas e estabeleceu testes operativos. Numa segunda fase, durante os anos oitenta, foram estabelecidos os projectos RACS (Road Automobile Communication System), e o AMTICS (Advanced Mobile Traffic Information and Communication System) respectivamente com o ministério das obras públicas e com a polícia nacional.

Mais recentemente, nos anos noventa, os ministérios dos correios e das telecomunicações juntaram esforços para normali-

zarem projectos relacionados com o VICS (Vehicle Information and Communication System).

Entre os anos oitenta e noventa, o projecto ARTS (Advanced Road Transportation Systems) integrou os conceitos envolvendo estradas, veículos e estruturas. Posteriormente, o ASV (Advanced Safety Vehicle) promoveu o desenvolvimento e investigação das tecnologias de segurança dos veículos. Um outro caso recente é o programa AHS ("Automated Highway System"), que consiste num sistema de ajuda da condução.

### 3 - Principais categorias dos sits

Um dos problemas com o qual são confrontados os sistemas de transporte é o crescimento do número de utilizadores e o consequente aumento dos níveis de congestionamento do tráfego. Para a solução deste problema podem adoptar-se duas estratégias. Por um lado, podem aumentar-se as capacidades instaladas através da construção de novos caminhos, do melhoramento das vias existentes e do uso de melhores sistemas de controlo de tráfego. Por outro lado, são possíveis, acções adicionais tais como o uso de horários flexíveis de trabalho, o aumento do número de parques de estacionamento, o estabelecimento de faixas prioritárias para veículos com alta ocupação e a adopção de tecnologias de informação para evitar congestionamentos.

O primeiro grupo de soluções, para ter um impacto significativo, implica fortes gastos. O aumento da capacidade das infra-estruturas existentes fica, geralmente, abaixo do incremento das solicitações e, num curto espaço de tempo, as vias aparecem congestionadas de novo. O segundo grupo, ou seja, medidas para o controlo das solicitações, é menos dispendioso. Estas soluções limitam-se a reduzir o número de utilizadores nas redes de estradas ou a redistribuí-los para assim diminuir os níveis de congestionamento, e tornar o sistema mais eficiente.

Nesta ordem de ideias os SITs encontram-se dentro das técnicas para o controlo de solicitações, a fim de minimizar os problemas de congestionamento. Os SIT podem dividir-se em seis sub-sistemas fundamentais:

- 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).

Estes sub-sistemas podem adoptar-se tanto em ambientes urbanos como rurais. Todavia, a aplicação de alguns deles, tais como os de Gestão de Tráfego e os de Transporte Público, originam maiores benefícios em ambientes urbanos, devido à gravidade dos problemas de congestionamento que estas zonas enfrentam.

Dado o alto custo dos componentes dos SIT, considera-se que a aplicação dos SAGT, SATP e SAIV, são as que acarretam maior benefício para um ambiente urbano. Como os SACV se encontram numa fase de desenvolvimento, estima-se que os sistemas que primeiro vão ser concluídos e onde se deverá aprofundar o estudo para a sua aplicação no transporte interurbano são os SOVC e os SATR.

No que diz respeito aos transportes ferroviário, aéreo e marítimo, já se utilizam alguns dos componentes dos SIT, tais como os sistemas de posicionamento global, no entanto, não existe ainda um esforço para agrupar estas aplicações visando um denominador comum.

De seguida descreve-se mais detalhadamente cada um destes sub-sistemas.

#### 3.1- Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego

Os Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego (SAGT) são a parte fundamental dos SITs. Os SAGT consistem em métodos para melhorar o nível do serviço e reduzir o atraso dos veículos, através de sistemas computacionais que monitorizam as condições

do tráfego. Os SAGT efectuem a recolha de dados 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 os dados, combinando-a com informação proveniente de outras fontes, incluindo veículos que actuam como "detectores móveis" inseridos no fluxo de tráfego. A informação recolhida permite gerir o sistema, seleccionando o número de veículos admitidos nas rampas de acesso<sup>[7]</sup>, ajustando semáforos e tratando eventuais incidentes. A informação obtida por meio destes sistemas, pode também ser transferida para os SAIV que fornecem a informação aos viajantes. Assim, estes podem tomar decisões mais adequadas relativamente às suas viagens ou meios de transporte e horários a adoptar. Os viajantes podem decidir permanecer na sua rota original e sofrer os eventuais atrasos, adoptar uma rota alternativa, escolher um meio diferente de transporte ou trocar a sua hora de partida.

Os três elementos dos SAGT são:

- Equipa de recolha de informação, para monitorar as condições de operação de uma estrada ou de uma rede de estradas;
- Sistemas de controlo (em tempo real) em resposta às condições de tráfego, para modificar a operação dos sistemas de controlo tais como semáforos, sinais nos acessos a auto-estradas ou mensagens em painéis electrónicos;
- Sistemas de suporte para os operadores do sistema, por forma a facilitar o controlo e gestão da rede em tempo real.

Alguns elementos que integram os SAGT consistem em sistemas de detecção de gelo, equipamento electrónico para peões e painéis para apresentação de mensagens.

#### 3.2 - Sistemas Avançados de Informação para Viajantes

O objectivo principal dos Sistemas Avançados de Informação para Viajantes (SAIV) é informar os utentes sobre as condições de operação da rede de transportes. Outros objectivos adicionais dos SAIV consistem em otimizar o fluxo de veículos, reduzir os congestionamentos e melhorar a qualidade do meio ambiente. Para alcançar estes objectivos é necessário alertar os condutores e utilizadores dos transportes públicos sobre eventuais incidentes, educar os viajantes relativamente ao uso dos diferentes meios de transporte, promover viagens partilhadas e fornecer informação sobre eventos locais e a sua possível correlação com o tráfego e os horários dos transportes públicos.

Os SAIVs formam a base para a transmissão da informação de tráfego entre os sistemas de monitorização e o viajante comum. A informação obtida por meio destes sistemas permite aos viajantes decidir quando partir, em que meio de transporte e quais os caminhos a adoptar. Entre os elementos que integram estes sistemas incluem-se ferramentas para melhorar a informação que se proporciona, tais como:

- Modelos de optimização - Estes modelos foram desenvolvidos

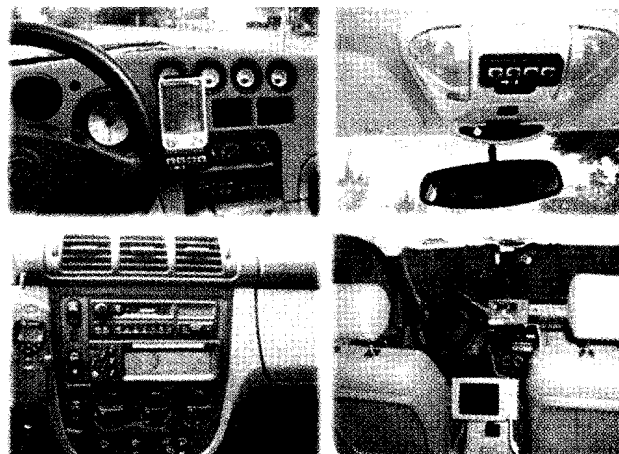


Fig. 4 - Sistemas personalizados/portáteis -GPS + GSM + Internet

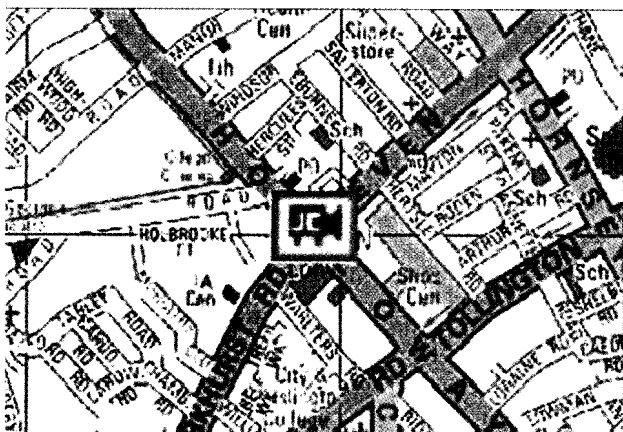


Fig. 5 - Mapa de estradas com câmaras (Londres)

para melhorar o desempenho das redes de estradas;

- Estimação do comportamento dos condutores - Estes modelos simulam o comportamento dos condutores na selecção de rotas, dos meios de transporte e nas reacções a incidentes ou acidentes que ocorrem nas estradas.

Por outro lado os SAIV incluem ainda:

- Sistemas de orientação nos veículos - São ajudas audiovisuais, tais como mapas electrónicos ou transmissões via rádio, que permitem ao condutor seleccionar a melhor rota;
- Sistemas Personalizados/Portáteis - Estes sistemas são similares, em tamanho e aparência, aos jogos electrónicos de bolso (Fig.4). Todavia, proporcionam informação sobre restaurantes, hotéis, bombas de gasolina, lojas, estacionamento e eventos especiais.
- Sistemas para passageiros utilizados em casa/trabalho/público - São sistemas localizados em lugares fixos e que proporcionam informação aos passageiros antes de iniciarem a sua viagem (Figs. 5 e 6).

Alguns exemplos dos SAIVs que já se encontram disponíveis são:

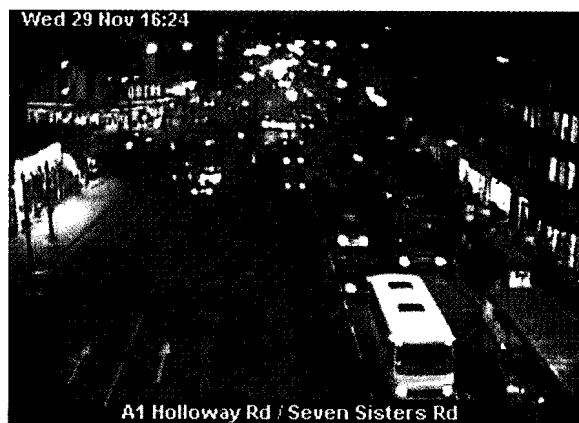


Fig. 6 - Visualização da estrada referente à câmara seleccionada (Londres)

- Sistemas de localização - Estes sistemas disponibilizam no veículo um mapa de estradas destacando a sua localização e providenciando informação dos arredores. Alguns sistemas estão ligados a um centro de informação que proporciona ao condutor informação sobre o tráfego, o que permite trocar de rota em caso de necessidade.
- Sistemas de planeamento de rotas - Informam o viajante sobre a rota óptima para atingir o seu destino. A rota pode incluir mais do que um meio de transporte, dependendo das preferências do viajante.
- Sistemas de guia para rotas - Uma vez escolhida uma determinada rota, o sistema descreve ao viajante cada uma das manobras necessárias para a efectuar. As instruções podem ser escritas, esboçadas no mapa ou transmitidas em voz sintetizada.
- Informação da rede de transporte em tempo real - Trata-se da informação (actualizada em tempo real) sobre o fluxo de tráfego, congestionamentos e atrasos nos transportes públicos ou eventuais trocas de horário.

### 3.3 - Sistemas Avançados de Controlo de Veículos

Os Sistemas Avançados de Controlo de Veículos (SACV) combi-

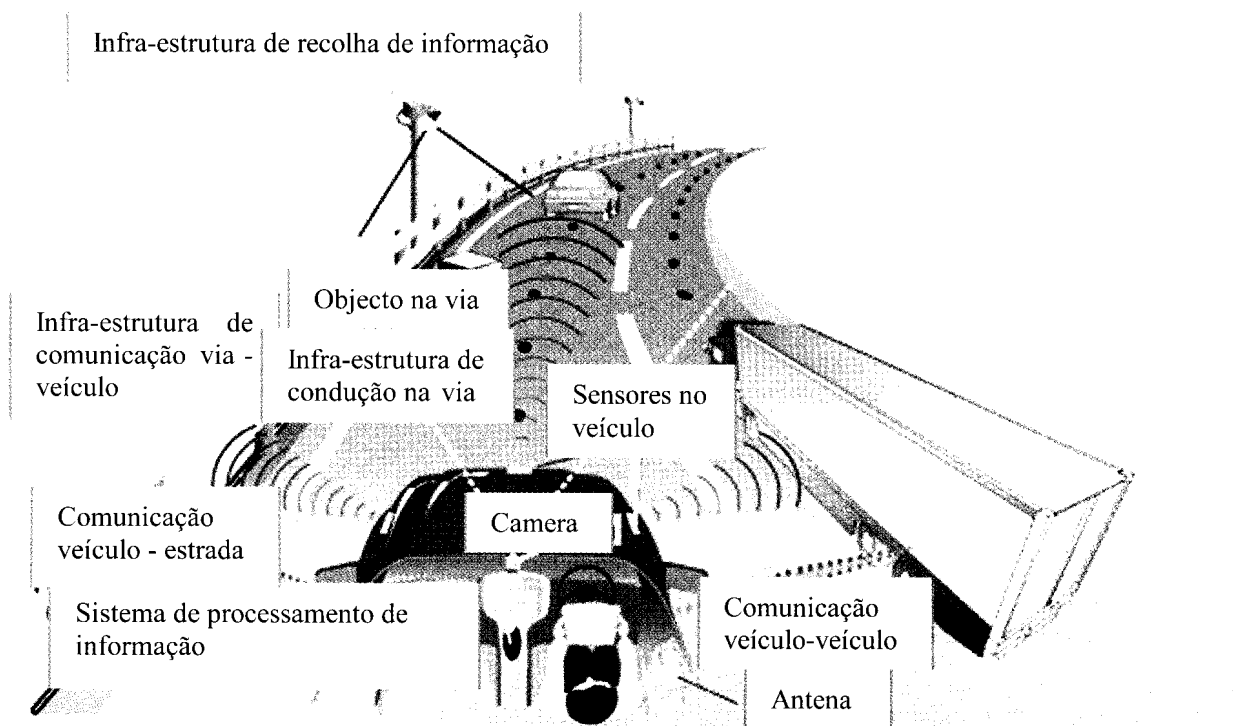


Fig. 7 - Veículo com condução automática

nam sensores, computadores e controladores, quer nos veículos quer nas infra-estruturas, para alertar e assistir os condutores (ou, eventualmente, intervir) na condução do veículo. Os objetivos dos SACVs 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. As características dos SACVs são:

- Melhorar a percepção - Os SACVs fornecem aos condutores uma melhor informação visual e auditiva sobre os perigos iminentes e a situação geral dentro e fora do veículo (Fig. 7).
- Obter o controlo automático - Os SACVs são mais rápidos, precisos e fiáveis que os reflexos humanos, ajudando o condutor em ocasiões perigosas. Exemplos destes sistemas consistem no estacionamento, na condução e na aceleração de forma automática ou numa compensação por falta de perícia do condutor.

Os SACVs envolvem uma série de elementos que se converteram progressivamente em vários produtos. Os primeiros desenvolvimentos consistiram em sistemas totalmente contidos nos veículos, não requerendo assim uma equipa nas estradas. Neste caso, os princípios do funcionamento são relativamente simples: uma combinação de sensores desenhados especificamente para detectar situações de perigo imediato, tal como a aproximação demasiadamente rápida de veículos. O sistema emite então um sinal auditivo ou visual para advertir o condutor, proporcionando uma ajuda complementar em situações que efectivamente o requeiram, como se de um "co-piloto virtual" se tratasse. No futuro, o sistema poderá tomar o controlo automático do veículo, travando para evitar acidentes, se necessário (Fig 7).

Quando se associa a comunicação entre veículos ou do veículo com a estrada, melhora-se o sistema, nomeadamente na segurança e na "produtividade" da entrada. Sistemas de controlo automático permitirão que os veículos mantenham uma menor separação (tanto no sentido do fluxo, como lateralmente) e maiores velocidades sem, todavia, diminuir a segurança. Por outro lado, as tecnologias de controlo automático serão também 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 estender-se a cidades completas e, posteriormente, a estradas interurbanas.

### 3.4 - Sistemas de Operação de Veículos Comerciais

Os sistemas de Operação de Veículos Comerciais (SOVCs) aplicam várias das tecnologias dos SIT para melhorar a segurança e a eficiência das operações dos veículos comerciais e das frotas. Os SOVCs incrementam a segurança, permitem acelerar as entregas, melhoram a eficiência operativa e a resposta a incidentes e reduzem os custos operacionais.

Os SOVCs utilizam algumas tecnologias das áreas de ordenamento de trânsito, informação para viajantes e controlo de veículos (Fig. 8), tais como:

- Identificação Automática de Veículos (IAV).
- Classificação Automática de Veículos (CAV).
- Localização Automática de Veículos (LAV).
- Detecção de peões em Movimento (PEM).
- Existência de computadores a Bordo (CAB).
- Adopção de comunicação nos dois Sentidos em Tempo Real (CSTR).
- Estabelecimento de Transmissão Digital de Tráfego em Tempo Real (TDTTR).

### 3.5 - Sistemas Avançados de Transporte Público

Os Sistemas Avançados de Transporte Público (SATPs) aplicam as novas tecnologias para a operação de veículos de alta taxa de

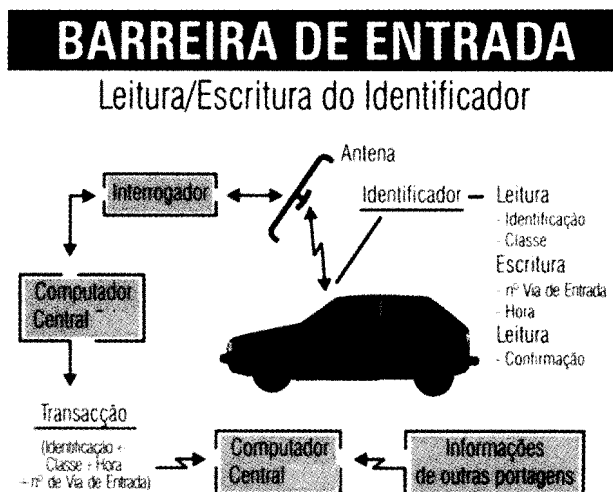


Fig. 8 - Identificação, classificação e localização automática do veículo ocupação. As tecnologias desenvolvidas para os SAGT e os SAIV têm um grande potencial para melhorar os serviços de transporte maciço e permitem informar os viajantes sobre os horários e custos disponíveis para qualquer viagem.

Esta informação pode ajudar a aumentar o número de passageiros que preferem deslocar-se em transportes públicos ao terem disponíveis mais alternativas e ao encontrarem um serviço mais fiável. O sistema de transporte público é também beneficiado pela gestão dos sinais de tráfego, pois confere-lhes esquadras de maior prioridade. A segurança vê-se aumentada por câmaras instaladas dentro dos autocarros com as quais o condutor pode observar o que sucede no interior do veículo e informar o sistema central de supervisão.

Os SATPs podem também manter informado o viajante, em tempo real (Fig. 9), sobre qualquer alteração nos sistemas de transporte e, assim, responderem a eventuais alterações nos planos do viajante.

- Algumas características específicas dos SATPs incluem:
- Informação sobre os sistemas de transporte maciço, actualizada, de fácil acesso, possibilitando uma fácil compreensão e adequada às necessidades dos utilizadores, permitindo viagens com partidas exactas.

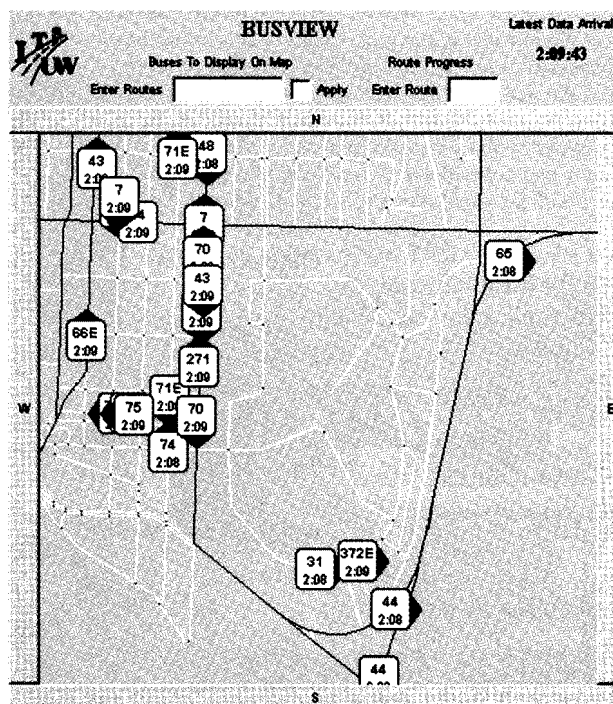


Fig. 9 - Informação sobre a localização dos vários autocarros<sup>(8)</sup>

- Informação que permite uma grande flexibilidade na reformulação de planos num curto espaço de tempo ou durante a própria viagem.
- Sistemas de transporte público que eliminam a necessidade de contar com quantidades exactas de dinheiro ou com sistemas de reserva e pagamento de utilização difícil.
- Controlo de tráfego dando um tratamento preferencial a veículos de alta ocupação, reduzindo assim atrasos para os utilizadores dos transportes públicos.
- Métodos de pagamento que permitem um acesso rápido aos passageiros, mantendo um registo para cobrança a terceiros, para promoções ou para planeamento.
- Monitorização automática e supervisão dos caminhos de ferro.
- Planeamento de operações das frotas, baseado numa maior e melhor informação.
- Optimização das operações através de uma monitorização em tempo real.
- Gestão da frota que responde às necessidades do utilizador.
- Controlo automático de veículos.

### 3.6 - Sistemas Avançados de Transporte Rural

Os objectivos principais dos Sistemas Avançados de Transporte Rural (SATRs) são a previsão do tempo necessário para as viagens, a redução dos acidentes, o incremento do tráfego, a redução dos custos e uma maior satisfação dos consumidores<sup>[14]</sup>.

Os SATRs englobam viagens dentro, e através de centros habitacionais com menos de 50000 residentes. As condições deste tipo de povoações, as características dos viajantes e os custos de manutenção dos sistemas rurais de transporte, determinam a necessidade no desenvolvimento de soluções tecnológicas para o transporte rural. Alguns dos atributos dos ambientes rurais são:

- Mistura de viajantes urbanos e viajantes rurais;
- Caminhos secundários com necessidade de manutenção;
- Vias com pouca visibilidade e com curvas fechadas;
- Grande variabilidade nas velocidades;
- Viagens envolvendo distâncias elevadas;
- Um número reduzido de rotas alternativas;
- Caminhos com superfície de rodagem em mau estado e possibilidade de condições climáticas adversas;
- Escassa sinalização;
- Menor número de infra-estruturas de apoio;
- Áreas geográficas extensas que impedem a detecção rápida e a resposta a acidentes;
- Existência limitada ou inexistência de transportes públicos.

## 4 - Modelização e simulação de sistemas inteligentes de transporte

### 4.1 - Introdução

Nos anos mais recentes, o crescimento rápido dos SIT, motivou a utilização de ferramentas para o estudo e o planeamento dos sistemas de transporte. A modelização e simulação de tráfego é uma das ferramentas mais económicas com vista a alcançar esses objectivos. Esta secção avalia vários aspectos da criação de modelos e da simulação de tráfego como uma parte principal destas iniciativas.

### 4.2 - Modelização e Simulação

A simulação é uma representação dinâmica do sistema com o objectivo de facilitar a sua análise, projecto e/ou controlo.

A simulação por computador tornou-se numa ferramenta comum na avaliação e desenvolvimento de sistemas inteligentes de transporte. Os algoritmos de simulação satisfazem um largo conjunto de exigências, tais como a avaliação de alternativas, o treino de pessoal e a análise de aspectos relativos à segurança.

O primeiro trabalho de pesquisa nesta área foi publicado em 1955, na Universidade de Califórnia, com o título "Simulation of freeway traffic on a general-purpose discrete variable com-

puter". Posteriormente, em 1975, foi criado o algoritmo "car-following" baseado no modelo desenvolvido na GM Co. O modelo GM é um dos algoritmos mais antigos e o mais adoptado na simulação, onde o movimento de cada veículo é gerido por uma equação diferencial. Assim, nos últimos trinta anos, foram desenvolvidos vários algoritmos de simulação de tráfego, tais como o CORSIM, o TRANSYT 7F e o AIMSUN2 para estudar e controlar o fluxo de tráfego. Mais recentemente têm vindo a ser implementados novos modelos como o INTEGRATION, o DYNASMART e o METROPOLIS, com vista ao estudo das cadeias de tráfego urbano e para definir estratégias de transmissão da informação e de controlo da configuração dos sistemas.

Os programas ATIS e ATMS, foram criados no âmbito dos projectos INTEGRATION e DYNASMART. O INTEGRATION foi desenvolvido nos anos oitenta pela Universidade Queen. Trata-se de um modelo mesoscópico que se orientou para uma simulação integrada da rede de auto-estradas e de ruas. No âmbito dos SIT constituiu o primeiro algoritmo de simulação a considerar informação sobre rotas, nos veículos. Por seu lado, o DYNASMART é principalmente uma ferramenta para a avaliação de estratégias de informação, medição e controlo do tráfego e para a análise das regras de trânsito ao nível da cadeia de estradas.

Um outro algoritmo de simulação de tráfego, que se pode considerar na vanguarda dos SIT, é o PARAMICS. Este projecto explora as possibilidades dos SIT e implementa um sistema que inclui a visualização e a simulação microscópica 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 de várias localidades nos EUA.

Outro projecto já realizado foi o INTELIGENT, desenvolvido pela Universidade de Leeds. O projecto é vocacionado para modelizar e simular problemas dinâmicos de gestão de tráfego originados por incidentes, tráfego de 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 mais de oitenta 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 SMARTTEST que cobre as diferentes áreas de ATMS e que é aplicado no transporte europeu por estrada, no planeamento e em testes.

#### 4.2.1 - Necessidades de Criação de Algoritmos para 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 SITs. A ferramenta adequada é o modelo e o algoritmo de simulação de tráfego através do qual se pode identificar, quantificar e analisar fenómenos que ocorrem. Assim, pode-se simular situações e ter a possibilidade para uma análise que estava só disponível no próprio sistema real ou, por outras palavras, é possível criar, avaliar e modificar o sistema sem haver a necessidade de o implementar.

#### 4.2.2 - Tipos de Algoritmos de Simulação de Tráfego

Os simuladores podem fornecer aos engenheiros um quadro global do tráfego e a possibilidade de avaliarem os problemas para projectar possíveis soluções. Assim, podem ser implementadas novas técnicas a serem testadas sem qualquer interferência na cadeia de tráfego real.

O tráfego possui características de um sistema complexo verificando-se estados estáveis/instáveis, comportamentos determinísticos/estocásticos, transições de fase e outros fenómenos. De acordo com o conhecimento actual, os algoritmos de simu-

lação de tráfego podem ser classificados como microscópicos, mesoscópicos, ou macroscópicos:

- Os modelos microscópicos são algoritmos que prevêem o estado de veículos individualmente. As medidas microscópicas são as posições e as velocidades individuais de cada veículo.
- Os modelos macroscópicos geralmente associam-se a descrições "globais" do fluxo do tráfego. As medidas contempladas pelos modelos macroscópicos são a velocidade, o fluxo e a densidade.
- Os modelos mesoscópicos são algoritmos que possuem aspectos dos modelos macro e microscópicos.

Deve ainda referir-se, de uma forma breve, que os algoritmos podem também ser classificados pela sua funcionalidade, a saber, para sinalização, de auto-estrada e integrados.

#### 4.2.3 - Funções dos Algoritmos de Simulação de Tráfego

A arquitectura dos sistemas identificam quatro funções principais dos algoritmos de simulação dos SITs:

- Um dos propósitos principais dos simuladores é avaliar o comportamento dos veículos em função das condições do piso, do veículo, do condutor, entre muitos outros aspectos que podem ser introduzidos como variáveis e parâmetros. A avaliação efectuada nas estradas é difícil porque varia de dia para dia, o que torna difícil e dispendiosa a recolha de dados para produzir conclusões estatísticas com algum significado.
- A simulação a "curto prazo" é utilizada para conseguir análises imediatas de resultados. Exemplos disto, consiste na avaliação do sistema em tempo real após um incidente numa estrada, ou a previsão de emissões de gases para a atmosfera, por forma a serem restringidas as entradas de carros nos centros das cidades, quando se verificarem emissões superiores a um certo nível pré-estabelecido.
- Os modelos de certas tarefas prevêem alterações nos fluxos de tráfego quando são efectuadas modificações na rede de estradas. Se o sistema de controlo responder às variáveis físicas em estudo, então ocorrem interações entre as variáveis o que pode tornar o sistema difícil de modelizar sem recorrer à utilização de uma simulação do tráfego.
- Os modelos dos sistemas de condução permitem o desenvolvimento de novas viaturas, por forma a atingir-se uma estrutura mais segura.

#### 4.2.4 - Limitações da Simulação de Tráfego nos SIT

Relativamente à simulação de tráfego foram identificadas algumas limitações no âmbito dos SIT:

- Modelização de congestionamentos - a maioria dos sistemas de simulação modelizam simplificada o carro que segue uma pista. Durante as condições de congestionamento estes algoritmos não reflectem um comportamento realista do condutor pelo que se obtêm, frequentemente, resultados pouco satisfatórios.

- Modelização ambiental - está a ser efectuado um esforço considerável no sentido de desenvolver modelos relativos a emissão de gases com impacte no ambiente, para posteriormente serem incorporados na simulação. Para algumas emissões isto é relativamente fácil de se obter; no entanto, para certas reacções químicas, que surgem dentro do próprio carro, a modelização torna-se bem mais complexa. Por outro lado, é difícil a aquisição de dados provenientes de emissões, que possam ser consideradas fidedignas para uma variedade razoável de situações de tráfego.

- Ambientes integrados e dados comuns - a simulação é frequentemente utilizada em conjunto com outros algoritmos. Assim, existem dados comuns aos modelos como, por exemplo, dados de origem-destino, topologia das estradas e definições das rotas a seguir pelos transportes públicos. Porém, cada modelo requer os dados num formato distinto, pelo que terão de ser convertidos para o formato desejado.

- Avaliação da segurança - a segurança é outro aspecto que se revela complexo. A maioria dos modelos que prevêem as condições de segurança estão ainda muito limitados pois, na realidade, muitos dos veículos circulam com velocidades desadequadas, e os modelos não contemplam essas situações. Além disso, os sistemas de simulação "ignoram" utentes vulneráveis, como sejam os ciclistas e os peões.

- Procedimentos normalizados e indicadores de desempenho - a simulação de tráfego tem que produzir experiências 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.

Em conclusão, há uma necessidade clara de criar modelos e sistemas de simulação de tráfego que apoiem o desenvolvimento dos SIT. Por outro lado, há também a necessidade de avaliar os modelos, por forma a delinear-se as características específicas das suas funções.

#### 4.2.5 - Classificação dos Sistemas de Simulação

Os sistemas de simulação de tráfego podem ser classificados de acordo com vários critérios, nomeadamente pela avaliação do comportamento das variáveis independentes, pela representação dos processos e pelos 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 to-

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	

Tabela 1 - Modelos de Simulação de Tráfego

das as entidades representadas no modelo são definidas através de relações exactas. No segundo caso o modelo estocástico incorpora e modeliza processos que incluem variáveis aleatórias.

O nível de pormenor de representação do sistema de tráfego pode ser classificado em Microscópico, Mesoscópico e Macroscópico:

- O modelo de simulação Microscópico descreve o comportamento individual das entidades do sistema ao longo do tempo, e as suas interacções com um nível de pormenor mais elevado.
- O modelo Mesoscópico representa a maioria das entidades a um alto nível de pormenor, mas descreve as suas actividades e interacções com um nível de pormenor mais baixo.
- O modelo Macroscópico representa as entidades e descreve as suas actividades e interacções com um baixo nível de pormenor. Estes modelos descrevem o tráfego com um alto nível de agregação, como seja o fluxo, sem distinguir as suas partes constituintes.

Na Tabela 1 são apresentados alguns dos modelos de simulação de tráfego mais importantes desenvolvidos durante os últimos quarenta anos.

Presentemente a maioria dos simuladores de tráfego são de natureza microscópica, baseados na simulação das interacções entre veículos.

A simulação macroscópica é usada na análise do fluxo de tráfego que é representado de uma forma integrada, utilizando certas características como fluxo / taxa-de-ocupação, densidade e velocidade. As manobras dos veículos individuais, como por exemplo as mudanças de pista, não são representadas explicitamente. A maioria das aplicações macroscópicas mais conhecidas nesta área foram desenvolvidas nas décadas de sessenta e setenta. Um exemplo de simulação macroscópica de tráfego de estrada é o modelo de célula de transmissão. Num esquema de célula de transmissão divide-se uma estrada em pequenas secções (células) e mantém-se a informação do conteúdo das mesmas (número de veículos). O registo é actualizado em fracções de tempo pré-definidas, calculando o número de veículos que cruzam o limite que separa cada par de células contíguas, durante o intervalo de relógio correspondente. Este fluxo médio resulta de uma comparação entre o número máximo de veículos que podem ser enviados directamente para cada uma das células seguintes e o limite dos que podem ser recebidos, bem como os que se encontram a jusante da célula. Por seu lado, 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 exigências veiculares espaciais e as correlações de velocidade entre veículos sucessivos.

Um modelo mesoscópico não distingue veículos individuais, mas especifica o comportamento individual através de condi-

ções probabilísticas. Alguns modelos mesoscópicos são obtidos por analogias da teoria "gás-cinético". Com um modelo "gás-cinético" podem descrever-se distribuições de velocidade e as localizações em momentos específicos de tempo. A dinâmica destas distribuições é geralmente governada por alguns processos que caracterizam o comportamento do motorista individual (por exemplo, aceleração, interacção entre veículos, pista-variável). O modelo "Multi-pista de gás cinético" e o modelo "gás-cinético melhorado" têm uma aproximação semelhante, embora o primeiro considere explicitamente a pista-variável. Por exemplo, o DYNASMART é um modelo de simulação de tráfego deste tipo, projectado como uma ferramenta de pesquisa para o estudo de sistemas ATIS/ATMS. Além disso, avalia as estratégias para promover informação aos viajantes, medir o controlo do tráfego e definir regras para as tarefas das rotas. 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 de cadeia. Estas classes permitem modelizar o comportamento do utilizador em resposta à informação dos ATIS. O modelo pode ainda simular semáforos, rampas de acesso e incidentes. O DYNASMART calcula os caminhos óptimos de viagem, baseados nos tempos simulados de viagem e simula os seus movimentos, ignorando as decisões tomadas pelos motoristas equipados com sistemas de informação.

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

Os componentes principais da modelização de tráfego microscópico são:

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

Com estes componentes é possível tratar os SIT como sendo 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.

A recente evolução dos simuladores microscópicos tirou proveito do desenvolvimento de simuladores com programação orientada a objectos. A adaptação das exigências da modelização 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. Há um número considerável de modelos de simulação microscópicos já desenvolvidos. O projecto SMARTTEST identificou 58 destes modelos dos quais são listados na tabela 2 os mais importantes. Os modelos classificados como "outros" servem para designar algoritmos que consideram a condução de veículos inteligentes. Com estes modelos pretende-se avaliar a segurança e as condições de conforto de uma fila de carros numa única pista e simular estratégias de condução.

#### 4.3 - Projectos de Modelização e Simulação

A avaliação dos algoritmos de simulação de tráfego para os SIT requer uma série de critérios tais como funcionalidade, relevância e

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			

Tabela 2 - Tipos de Modelos de Microsimulação



capacidade do modelo. Uma pesquisa dos simuladores de tráfego revela a existência de cerca de 80 modelos. Para eliminar os modelos sem potencialidades de utilização nos SIT foram desenvolvidos critérios para a sua avaliação segundo a sua aplicabilidade ou, então, modificados para satisfazer os padrões estabelecidos. Alguns desses critérios consistem em ter:

- uma modelização através de uma teoria bem estabelecida;
- um modelo testado para aplicações no mundo real;
- a capacidade para medir o desempenho do sistema como, por exemplo, os tempos de viagem e as velocidades;
- um modelo com, pelo menos, uma característica capaz de solucionar um dos problemas dos SIT;

Numa avaliação mais detalhada identificam-se as características e as limitações do modelo que deverá:

- ser capaz de incorporar no algoritmo os dispositivos de tráfego como sejam os sensores, semáforos, e outros;
- ter o poder de “imitar” as funções de dispositivos de tráfego que incluam a previsão das medidas de tráfego, em intervalos de tempo pré estabelecidos;
- reflectir um comportamento realista do condutor e as interações com o veículo;
- possuir a capacidade para modelizar as diversas condições do fluxo de tráfego a um nível elevado de pormenor (por exemplo os congestionamentos e os acidentes);
- simular a variabilidade do tráfego em função do tempo e modelizar a evolução / interacção do tráfego, a deterioração das faixas de rodagem, e a redução da velocidade devido a incidentes e a estrangulamentos das faixas;
- ser capaz de avaliar várias estratégias de controlo;
- ser capaz de se interligar com outros algoritmos de controlo das aplicações SIT;
- fazer estimativas fidedignas das condições de tráfego das estradas;
- prever padrões do fluxo das estradas, em resposta às várias estratégias de informação;
- possuir informação para auxílio aos viajantes;
- ter capacidade para modelizar auto-estradas e tráfego das estradas;
- ser bem documentado.

Nesta ordem de ideias, o modelo mais “perfeito” deveria contemplar todos os critérios acima referidos. Porém, algumas das características, embora desejáveis, podem ser consideradas opcionais, ao passo que outras são essenciais.

## 5 - Conclusão

Este artigo apresentou os aspectos fundamentais envolvidos na área dos SIT e revelou que existe um grande número de questões a tomar em consideração que se traduzem em potencialidades de desenvolvimentos futuros. Por outro lado, foi dada ênfase à modelização e à simulação, nomeadamente ao desenvolvimento de modelos de estradas, veículos e seres humanos. Um dos procedimentos mais importantes na modelização e na simulação é a tradução dos contextos e objectivos reais, em parâmetros que possam ser representados numericamente. Este é o ponto onde muitas das inexactidões e erros são introduzidos.

Foram também identificados modelos de simulação e uma colecção de critérios de avaliação que definem quais as características que um algoritmo deve apresentar, para responder às necessidades das aplicações nos SIT.

A avaliação é efectuada em duas fases:

- uma primeira fase que gera uma lista generalizada dos modelos de simulação de tráfego;
- uma segunda fase que permite uma avaliação mais detalhada de cada um dos modelos, a fim de determinar qual o modelo que é mais satisfatório para uma determinada aplicação dos SIT. As exigências aqui impostas incluem a funcionalida-

de, a relevância e a capacidade do modelo, no âmbito dos SIT.

Actualmente nenhum dos modelos existentes satisfazem completamente as necessidades das aplicações dos SIT, pois não são capazes de simular totalmente, em tempo real, os fenómenos que ocorrem nos SIT, controlar as operações da administração do tráfego e interagir com as acções de controlo dos sistemas de informação aos viajantes.

## Bibliografia

- [1] Lino Figueiredo, Isabel Jesus, J. A. Tenreiro Machado, José Rui Ferreira, J. L. Martins de Carvalho, “Towards the Development of Intelligent Transportation Systems”, IEEE Intelligent Transportation Systems, California, E.U.A., 2001
- [2] Masaki, “Machine-Vision Systems for Intelligent Transportation Systems”, IEEE Intelligent Systems, MIT, pag. 24-31, 1998.
- [3] “Comprehensive plan for ITS”, Japanese ministry of land infrastructure and transport road bureau. (<http://www.its.go.jp/ITS/index.html>)
- [4] Broggi, M. Bertozzi, A. Fascioli, G. Conte, “Automatic Vehicle Guidance: the experience of the ARGO Autonomous Vehicle”, World Scientific, Singapore, 1999.
- [5] M. Tomizuka, “Automated Highway Systems - An Intelligent Transportation System for the Next Century”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Mechatronics, Japan, 1997.
- [6] “Innovative Transportation Solutions”, Transportation Eng. at the University of UTAH.
- [7] “SMARTTEST Final Report For Publication”, Project Part Funded By The European Commission Under The Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, 2000.
- [8] “Busview”, Intelligent Transportation Systems Research University of Washington, ([http://busview.its.washington.edu/busview\\_help.html](http://busview.its.washington.edu/busview_help.html)).