



## **Gestor de Tráfego de Automóveis Autónomos em Interseções de Vias**

**FRANCISCO MANUEL GOMES DA TORRE E FRIAS-BULHOSA**

Setembro de 2025

# GESTOR DE TRÁFEGO DE AUTOMÓVEIS AUTÓNOMOS EM INTERSEÇÕES DE VIAS

Francisco Manuel Gomes de Torre e Frias-Bulhosa

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Telecomunicações



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de  
Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Francisco Manuel Gomes da Torre e Frias-Bulhosa, Nº 1130359,  
1130359@isep.ipp.pt

Orientação científica: André Vaz da Silva Fidalgo, anf@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica  
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores  
Área de Especialização em Telecomunicações

**2025**



## *Resumo*

Cada vez existem mais sistemas que incorporam equipamentos eletrónicos para aumentar a fiabilidade, permitir controlo em tempo real e/ou remoto e aumentar a interoperabilidade, com recurso à implementação de processamento de dados e de telecomunicações. Os sistemas veiculares não são exceção, sendo que alguns já incorporam tamanha quantidade de sensores e de unidades de processamento, que têm a capacidade de se deslocarem de forma autónoma.

Com o surgimento destes veículos autónomos, surgiram também implementações de comunicações, nomeadamente sem fios, para os veículos poderem trocar dados com outros veículos, como por exemplo para determinarem as condições do caminho numa zona não alcançável pelos seus sensores e por conseguinte definirem melhor as ações a tomar.

Nesta tese será dimensionado um controlador de trânsito para veículos autónomos, com o intuito de ordenar os vários veículos ao atravessarem uma zona de interseção de vias públicas, de forma a não ocorrerem colisões. Para validação prática da adequação do sistema de controlo a diferentes condições de trânsito automóvel, foi desenvolvido um programa para simulação.

## *Palavras-Chave*

Veículos autónomos, telecomunicações, controlo de tráfego, simulação.



## *Abstract*

There are ever more systems including electronic equipments to enhance the reliability, allow real time and/or remote control and increase the interoperability, with the use of data processing and telecommunications. Vehicular systems are no exception to this, being so that some already include so many sensors and processing units, that they have the capability of manoeuvring themselves autonomously.

With the appearance of such autonomous vehicles, also appeared the implementation of communications, namely wireless, to allow the interchange of information between vehicles, for example to determine the conditions of the path ahead in an area unreachable by its sensors and thus more accurately defining the actions to take.

In this thesis a traffic controller will be dimensioned for autonomous vehicles, with the intention of lining the various vehicles as they cross an intersection zone of roads, in a way that collisions will not occur. To validate the practical suitability of the system to different traffic conditions, a simulation program was developed.

## *Keywords*

Autonomous vehicles, telecommunications, traffic control, simulation.



# Índice

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABELAS.....	IX
ACRÓNIMOS.....	XI
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	4
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1. VEÍCULOS AUTÓNOMOS.....	6
2.2. COMUNICAÇÕES ENTRE VEÍCULOS.....	11
2.2.1. <i>Tecnologias de comunicação</i> .....	12
2.3. CONTROLO DE TRÁFEGO.....	16
2.3.1. <i>Sobreposição de caminhos</i> .....	19
2.3.2. <i>Controlo com distribuição no tempo</i> .....	21
2.3.2.1. <i>Controlo com distribuição no tempo dinâmico</i> .....	25
2.3.3. <i>Controlo orientado ao veículo</i> .....	28
2.3.3.1. <i>Autonomous Intersection Management (AIM)</i> .....	34
2.3.3.2. <i>Virtual Traffic Lights (VTL)</i> .....	43
<b>3. PROPOSTA DE CONTROLADOR PARA VEÍCULOS AUTÓNOMOS.....</b>	<b>47</b>
3.1. CAUSAS DE TEMPOS DE ATRASO.....	48
3.2. DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA.....	49
3.3. EQUAÇÕES.....	54
3.3.1. <i>Verificação de colisão</i> .....	62
3.3.2. <i>Atraso máximo absoluto</i> .....	74
3.3.3. <i>Cálculo da capacidade da interseção</i> .....	76
3.4. VANTAGENS.....	76
3.5. DESVANTAGENS.....	77
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>79</b>
4.1. SIMULADOR.....	80

4.1.1. Função principal.....	81
4.1.2. Função de temporização.....	87
4.1.3. Função de zona.....	92
4.2. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO.....	94
4.3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO SISTEMA PROPOSTO.....	94
4.3.1. Simulação com o sistema proposto.....	97
4.3.2. Simulação com semáforos.....	100
4.3.3. Simulações com entrada de veículos aleatória.....	104
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>107</b>
5.1. POSSÍVEIS MELHORIAS.....	109
<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>	<b>113</b>

## Índice de Figuras

Figura 1	Potencial teórico para prevenção de acidentes com veículos autónomos[2].....	8
Figura 2	Pelotão formado por camiões com auxílio de comunicação entre veículos[23].....	12
Figura 3	Ilustração de pontos de possível colisão em zona de interseção[40].....	18
Figura 4	Interseção folha de trevo, com sobreposição de caminhos destinados a automóveis[42].....	21
Figura 5	Trama TDMA do protocolo de comunicação sem fios GSM[43].....	22
Figura 6	Ciclo de luzes de semáforos, pré-temporizado, numa interseção com duas fases[45]....	23
Figura 7	Ciclo de duração variável entre 45 s e 120 s por os tempos de verde serem variáveis em sistemas atuados[45].....	26
Figura 8	Determinação do tempo de verde com deteções de veículos[45].....	27
Figura 9	Sistema de controlo com deteção sem fios de veículos prioritários[51].....	28
Figura 10	Interseção em T com a ordem de passagem das 3 fases de movimento[46].....	30
Figura 11	Imagem do simulador AIM em funcionamento[54].....	34
Figura 12	Exemplo ilustrativo do princípio de funcionamento do VTL[48].....	45
Figura 13	Descrição gráfica das diferentes secções da interseção e pontos de interesse quando sujeita ao sistema de controlo proposto.....	52
Figura 14	Função de velocidade instantânea em função do tempo (a azul) para um veículo $n$ quando estiver dentro da zona de controlo.....	57
Figura 15	Situação limite, à entrada da interseção, para não ser necessário introduzir atraso ao veículo $n+1$ , para evitar colisão de traseira.....	64
Figura 16	Situação limite, à saída da interseção, para não ser necessário introduzir atraso ao veículo $n+1$ , para evitar colisão de traseira.....	66
Figura 17	Ilustração da condição limite para o veículo $n+1$ , passar atrás do veículo $n$ e evitar	

colisão lateral sem requerer tempo de atraso adicional.....	68
Figura 18 Ilustração da condição limite para o veículo $n+1$ , passar à frente do veículo $n$ e evitar colisão lateral sem requerer tempo de atraso adicional.....	70
Figura 19 Representação de um ambiente de simulação, com 4 entradas e 10 veículos em simulação.....	86

## Índice de Tabelas

Tabela 1	Corpo das mensagens do tipo <i>Request</i> , enviadas do veículo para o controlador da interseção.....	36
Tabela 2	Corpo das mensagens do tipo <i>Confirm</i> , enviadas do controlador para o veículo.....	38
Tabela 3	Corpo das mensagens do tipo <i>Reject</i> , enviadas do controlador para o veículo.....	39
Tabela 4	Definição de variáveis utilizadas.....	54
Tabela 5	Dois pontos intersetados pela função $v_n(t)$ , durante a fase de travagem.....	58
Tabela 6	Dois pontos intersetados pela função $v_n(t)$ , durante a fase de aceleração.....	58
Tabela 7	Argumentos aceites na linha de comandos, pelo programa de simulação.....	81
Tabela 8	Tempos de travessia, sem influência de controlo, para cálculo do tempo de atraso.....	96
Tabela 9	Duração de travessia média, para diferentes distâncias de separação.....	97
Tabela 10	Tempo de atraso médio, para diferentes distâncias de separação.....	98
Tabela 11	Volume de trânsito medido, para diferentes distâncias de separação.....	98
Tabela 12	Energia média consumida pelos veículos, para diferentes distâncias de separação.....	99
Tabela 13	Cálculo da desaceleração máxima, consoante velocidade de cruzeiro e distância de separação.....	101
Tabela 14	Duração de travessia média, para diferentes desacelerações máximas.....	102
Tabela 15	Tempo de atraso média, para diferentes desacelerações máximas.....	102
Tabela 16	Volume de trânsito medido, para diferentes desacelerações máximas.....	103
Tabela 17	Energia média consumida pelos veículos, para diferentes desacelerações máximas....	104
Tabela 18	Condições para cada par de simulações.....	105
Tabela 19	Resultados das simulações a implementar o sistema de controlo proposto, para cada par.....	105

Tabela 20 Resultados das simulações a implementar controlo com semáforos, para cada par..... 106

# Acrónimos

3GPP	– <i>3rd Generation Partnership Project</i>
5G-NR	– <i>5th Generation New Radio air interface</i>
AIM	– <i>Autonomous Intersection Management</i>
BASt	– <i>Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen</i>
BSS	– <i>Basic Service Set</i>
BTP	– <i>Basic Transport Protocol</i>
CAM	– <i>Cooperative Awareness Message</i>
C-V2X	– <i>Cellular V2X</i>
D2D	– <i>Device-to-Device</i>
D2N	– <i>Device-to-Network</i>
DENM	– <i>Decentralized Environmental Notification Message</i>
DSRC	– <i>Dedicated Short Range Communications</i>
EDCA	– <i>Enhanced Distributed Channel Access</i>
EGL	– <i>Khronos Native Platform Graphics Interface</i>
ETSI	– <i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FDMA	– <i>Frequency Division Multiple Access</i>
FIFO	– <i>First In First Out</i>
FM	– <i>Frequency Modulation</i>
GPS	– <i>Global Positioning System</i>
GSM	– <i>Global System for Mobile communications</i>
IEEE	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITS	– <i>Intelligent Transport Systems</i>
LAAS	– <i>Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes</i>
LTE	– <i>Long-Term Evolution</i>
MAC	– <i>Medium Access Control</i>
OFDM	– <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OSI	– <i>Open Systems Interconnection</i>
PC	– <i>Protocol Control</i>
PROMETHEUS	– <i>PROgramMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety</i>
QAM	– <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	– <i>Quality of Service</i>

QPSK	– <i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
R2V	– <i>Road-to-Vehicle</i>
SL	– <i>Side Link</i>
TCP	– <i>Transmission Control Protocol</i>
TDMA	– <i>Time Division Multiple Access</i>
UDP	– <i>User Datagram Protocol</i>
V2I	– <i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2N	– <i>Vehicle-to-Network</i>
V2P	– <i>Vehicle-to-Pedestrian</i>
V2V	– <i>Vehicle-to-Vehicle</i>
V2X	– <i>Vehicle-to-Everything</i>
VaMoRs	– <i>Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen</i>
VTL	– <i>Virtual Traffic Lights</i>
WLAN	– <i>Wireless Local Area Network</i>

# 1. INTRODUÇÃO

Atualmente é notável que os seres humanos tiram de forma regular partido dos sistemas veiculares para a maior parte dos deslocamentos que efetuam. No caso dos sistemas automóveis, que incorporam motores para propulsão, é possível o transporte de cargas pesadas, que não poderiam ser transportadas com mero esforço humano. A deslocação pode ser feita a uma rapidez de movimento muito elevada em comparação com as velocidades alcançáveis pelos seres humanos, já para não falar de que os automóveis podem manter essas velocidades por centenas de quilómetros e na maior parte dos mesmos existe um espaço isolado do exterior, que providencia resguardo de elementos como chuva e frio. Por todas estas razões o seu uso é extremamente apelativo para as tarefas que envolvam transportes.

Com o desenvolvimento de veículos autónomos, estes passam a proporcionar todas as vantagens que os automóveis tripulados proporcionam, sem a necessidade de um ser humano a analisar o ambiente circundante e a controlar o veículo a todo o momento.

Em zonas de interceção de vias públicas com trânsito automóvel são regularmente

utilizados semáforos luminosos. Estes atribuem de forma cíclica um tempo de utilização a cada faixa de rodagem e enquanto os veículos de umas vias podem efetuar a travessia, os veículos das outras têm muitas vezes de cessar o movimento e assumir uma posição estacionária antes do início da zona de interseção, enquanto a via em que se encontram não receber permissão de utilização da zona de interseção.

Este tipo de controlo de tráfego assegura que não existem vias de trânsito, que se sobreponham, a utilizar a zona de interseção ao mesmo tempo e dessa forma torna impossível a ocorrência de colisões entre veículos. No entanto, o fato de o tempo de utilização concedido a cada faixa de rodagem ser de duração muitas vezes fixa possibilita, que se uma via apresentar pouco volume de tráfego, pode haver momentos em que essa via pública tem permissão de utilização da zona de interseção, mas por não haver tráfego a zona de interseção não é utilizada. Enquanto isto, nas outras vias os veículos permanecem em espera de permissão, resultando num tempo desperdiçado, pois poderiam estar a prosseguir com o seu deslocamento em segurança. Na prática é notável que esta situação acontece de forma frequente.

Outra desvantagem é que todos os veículos que são forçados a parar antes da zona de interseção, irão arrancar a partir de uma posição estática e devido à falta de momento linear é necessário ser exercida uma força elevada para ser retomado o movimento, o que leva a um grande consumo de energia.

## 1.1. OBJETIVOS

Tendo em conta estas desvantagens dos sistemas de controlo de tráfego com semáforos luminosos e dada a existência e o funcionamento dos veículos autónomos, é proposto o dimensionamento de um sistema de controlo de tráfego exclusivamente para automóveis autónomos, que não atribua tempos fixos para utilização da zona de interseção e que tente não forçar os veículos a parar o movimento e obrigar ao posterior arranque.

O sistema consistirá numa infraestrutura, com características próximas às de um sistema de controlo de semáforos, instalada na proximidade da interseção e com capacidade de

comunicação com os veículos. O sistema deverá implementar um algoritmo que determine para cada veículo o modo e instante em que este deve entrar na zona de interseção. Este algoritmo terá como parâmetros de entrada características do veículo que efetua a aproximação à zona de interseção como: comprimento, velocidade, capacidade de travagem, etc e características da própria zona de interseção para conseguir prever o movimento do veículo. Terá também em conta a localização de todos os outros veículos, que estejam a utilizar a zona de interseção ao mesmo tempo, para prever e evitar possíveis colisões.

Assim que o algoritmo concluir as condições de acesso do veículo em causa, transmite ao veículo como deve proceder antes de e durante a zona de interseção. Se todos os veículos aplicarem o movimento indicado tudo deverá correr como previsto pelo algoritmo e não ocorrerão colisões.

O programa de simulação a desenvolver deverá implementar o sistema de controlo de tráfego definido nesta tese, para se poder avaliar a adequação do mesmo para condições de tráfego realistas. Como serão simuladas condições de tráfego com veículos autónomos, também será necessário que o simulador controle os veículos individualmente de forma suficientemente realista, tratando para isso a sua posição, velocidade instantânea e aceleração instantânea. Para cada veículo será também feita a contagem do tempo, que demorou a atravessar a interseção e será também calculado um valor de energia consumida durante essa mesma travessia. Ambos estes valores contribuirão para a medição da avaliação do tipo de controlo, aquando da sua comparação com os valores resultantes de outro tipo de controlo. O simulador irá, para este fim, permitir a implementação de outros cenários de controlo de tráfego, com semáforos luminosos, para comparação com o tipo de controlo proposto.

## 1.2. ORGANIZAÇÃO DA TESE

Para além deste capítulo, esta tese possui mais quatro, que são aqui numerados, nomeados e é apresentada uma descrição dos seus conteúdos.

O capítulo 2, "Estado da Arte", introduz materiais que expliquem o atual estado de sistemas e tecnologias, que se consideram relevantes para a compreensão dos assuntos a serem abordados nesta tese, sendo estes: veículos autónomos, comunicações entre veículos autónomos e diferentes tipos de sistemas de controlo de trânsito.

O capítulo 3, "Proposta de Controlador para Veículos Autónomos", apresenta o sistema de controlo idealizado, identificando-se os seus requisitos e sendo desenvolvidas as definições matemáticas, imprescindíveis para o funcionamento do sistema de controlo. No fim deste capítulo ainda se expõe as vantagens e desvantagens teóricas, do sistema que foi proposto.

O capítulo 4, "Resultados", tem como função expor resultados numéricos, que permitam uma avaliação do sistema de controlo proposto no capítulo anterior. Para isso, é explicado o programa de *software* desenvolvido, que simula o sistema de controlo proposto ou semáforos para controlo da interseção e permite a obtenção de resultados. No fim, são apresentadas quais as simulações realizadas e são tabelados os resultados delas.

O capítulo 5, "Conclusões", é aquele onde se resume o trabalho realizado. São identificados os objetivos que foram alcançados e apresentam-se os aspetos em que o trabalho pode ser melhorado.

## 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são introduzidos materiais que expliquem o atual estado de sistemas e tecnologias, que se consideram relevantes para a melhor compreensão dos problemas a resolver neste trabalho, tal como outros que possam fazer parte da solução.

É feita uma introdução aos veículos autónomos, onde se expõe as suas valências em relação a veículos conduzidos por humanos. São depois identificadas melhorias ao funcionamento dos veículos autónomos, que podem ser alcançadas com trocas de informação entre veículos autónomos, sendo endereçados os diferentes tipos de comunicação e as tecnologias mais típicas para comunicarem.

Finalmente são apresentados os diferentes tipos de sistemas de controlo de trânsito.

## 2.1. VEÍCULOS AUTÓNOMOS

Não existe uma definição consensual de o que é um veículo autónomo[1]. O grupo de projeto *“Legal consequences of an increase in vehicle automation”* do Instituto Federal de Rodovias e Transportes (BASt) alemão, ao avaliar as consequências, em termos de enquadramento legal, do aumento da automação dos veículos nas estradas alemãs, definiu três níveis de automação que um veículo pode ter, sendo estes[2]:

- parcial - o sistema controla o movimento lateral e longitudinal, apenas conseguindo executar certas tarefas e pode interromper o funcionamento a qualquer instante, sendo o condutor humano obrigado a monitorizar o sistema continuamente e a estar preparado para substituí-lo quando: o sistema chegar aos seus limites dentro da tarefa que realiza, ocorrer alguma falha ou a tarefa ser terminada. Os benefícios principais deste nível de automação advêm, da maior rapidez de reação em comparação com o condutor humano e também de poder prevenir erro humano, com funções de perceção e processamento de informação;
- elevado (ou alto) - o sistema controla o movimento lateral e longitudinal, durante a maior parte do tempo, parando apenas quando alcançar o seu limite. O sistema reconhece quais são todos os seus limites e antes de os alcançar, avisa o condutor humano, de forma atempada, de que vai ter de tomar controlo do veículo. A intervenção humana é minimizada e todos os acidentes são evitados, quando o sistema exerce tarefas para as quais está programado, acontecendo acidentes apenas por erros de terceiras entidades ou por mal funcionamento do sistema;
- completo - similar ao nível elevado, sendo o veículo controlado pelo sistema durante a maior parte do tempo e com a diferença de que, se quando o condutor for solicitado para tomar controlo do veículo e ao fim de algum tempo não o fizer, o sistema é capaz de levar o veículo a uma situação de risco mínimo (fazer uma paragem segura) qualquer que seja a situação.

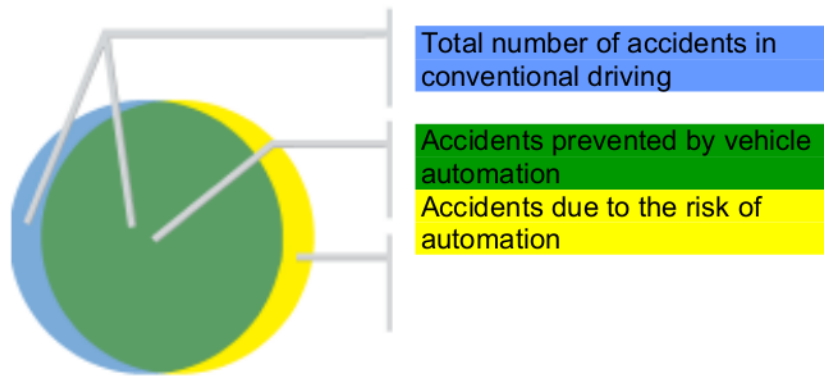
De acordo com estes níveis, as características comuns de um veículo autónomo são, ser um veículo capaz de cumprir tarefas de condução, ao longo das quais controla o movimento longitudinal e lateral, evitando no processo colisões e acidentes, enquanto estiver a operar dentro dos seus limites e sem o sistema ter defeitos[2], sendo capaz de se

monitorizar sem auxílio humano e capaz de identificar os seus limites operacionais e falhas[1].

As motivações para a implementação de veículos autónomos nas estradas públicas são significativas, tendo-se em conta as debilidades dos sistemas rodoviários com veículos conduzidos por humanos[1]. Com maior utilização de veículos autónomos, são esperadas reduções em custos de transporte, que as pessoas tenham mais tempo livre por passarem menos tempo a conduzir e maior facilidade em partilha de carros[3]. O veículo autónomo vai, também introduzir a possibilidade de pessoas, que anteriormente não podiam praticar condução, como crianças, idosos ou pessoas com deficiência, passem a ter a possibilidade de utilizar um veículo autónomo[4][5]. Melhorias são esperadas também em relação ao congestionamento do trânsito, reduzindo pontos de estrangulamento e aumentando a densidade do trânsito ao serem formados pelotões com uma distância de separação entre veículos reduzida, que vão também reduzir o atrito aerodinâmico[6], e devido aos menores tempos de reação e à capacidade de coordenação, os efeitos de propagação em onda causados por travagens poderão ser mitigados[5][7].

15% de todo o congestionamento de trânsito na Europa é devido a acidentes e cerca de 95% dos acidentes nas estradas envolvem algum nível de erro humano[8]. Havendo um menor número de acidentes, graças à maior presença de veículos autónomos nas estradas, irá também sentir-se uma redução direta no congestionamento.

Na figura 1, é ilustrado o potencial da automação nos veículos para prevenção de colisões, baseado em considerações teóricas. A área a azul representa as situações de acidente que se consideram não poderem ser evitadas, nem mesmo pela automação no veículo. São representados pela área a amarelo (área igual à azul) os novos tipos de acidentes, que serão causados pelos sistemas de automação em si. Na área a verde (a maior das três), estão representadas as situações de acidente, que não eram evitadas pelos condutores humanos, e os sistemas de automação conseguem evitar. Em teoria, os benefícios da remoção do fator humano são muito maiores, que os riscos de introdução de automação nos veículos[2].



**Figura 1** Potencial teórico para prevenção de acidentes com veículos autônomos[2].

A União Europeia delineou metas para redução de fatalidades nas estradas europeias, sendo o principal objetivo alcançar zero mortes em estradas europeias até ao ano 2050, com o objetivo intermédio de uma redução de 50% em número de mortes e ferimentos graves, em relação ao número de mortes ocorridas no ano 2020, a ser alcançado até ao ano 2030[9]. Ao mesmo tempo identificando a importância de agilizar a integração de veículos autônomos e conectados nas estradas, por estes poderem ajudar a combater problemas dos sistemas rodoviários, tais como segurança, congestionamento de trânsito, eficiência energética e qualidade do ar[9].

No entanto o aumento da automação nos veículos também tem o potencial para originar problemas ou agravamentos de congestionamento. Passando a haver potencial para mais segmentos populacionais utilizarem veículos autônomos, há também potencial para um aumento da procura e conseqüente agravamento dos níveis de congestionamento. Devido à sua conveniência e maior segurança e aliado ao fato de os ocupantes do veículo terem mais tempo livre, os utilizadores podem escolher passar a viajar durante mais tempo e distâncias maiores, levando ao aumento de veículos nas estradas, podendo vir a compensar as melhorias inicialmente obtidas de eficiência[1][5][3], correndo-se o risco de subsistir o problema de congestão causado por “[...] a procura da mobilidade individual tornar-se de forma regular numa imobilidade coletiva.”[10].

Materialmente os primeiros veículos autônomos, foram protótipos robóticos tendo já dispositivos de instrumentação muito parecidos aos que os veículos autônomos atuais utilizam, tendo apenas como capacidade de aplicação o deslocamento de um ponto A até um ponto B a baixas velocidades e evitando obstáculos no caminho, dentro de divisões

fechadas.

Em 1977 uma equipa do Laboratório de Engenharia Mecânica em Tsukuba, desenvolveu o primeiro veículo autónomo, guiado por visão, capaz de se conduzir sem intervenção humana. Este veículo possuía duas câmaras para se guiar visualmente, gravando e processando imagens de guias laterais. Sendo capaz de se deslocar a 10 km/h[1][11].

Também foi desenvolvido a partir de 1977 no Laboratório de Análise e de Arquitetura de Sistemas (LAAS) em Toulouse na França, um robô móvel com forma triangular e três rodas, sendo uma delas livre, possuindo para medição da sua distância aos obstáculos nos seus arredores, uma câmara de vídeo capaz de obter imagens codificadas em 8 níveis de cinzento, um medidor de distância laser, com capacidade limitada de medições, sensores ultrassónicos e um sistema de triangulação a infravermelhos emparelhado com emissores externos posicionados nos cantos da divisão fechada onde opera. Este robô era capaz de se localizar dentro da divisão onde se encontra e planear a sua deslocação de um ponto para outro evitando obstáculos no caminho[12].

Rodney Schmidt e Les Earnest investigadores do Laboratório de Inteligência Artificial de Stanford modificaram um antigo *rover* lunar, para que conseguisse seguir uma linha branca de elevado contraste quando em condições de luminosidade controladas, a uma velocidade de 1,3 km/h, concluindo o projeto em 1971. Este foi posteriormente modificado em 1977 por Hans Moravec e Victor Scheinman, que construíram um carril sobre o qual ficava instalada a câmara, passando a ser possível obter diferentes pontos de vista com a mesma câmara, sem o *rover* ter de se movimentar e possibilitando assim uma perspetiva tridimensional. Conseguiram que fossem reconhecidos obstáculos e que fossem lentamente contornados pelo veículo. Isso era conseguido movendo-se em deslocamentos de um metro intervalados de 10 a 15 minutos, para obtenção e processamento das imagens e planeamento da direção a seguir. Em 1979 o *rover* atravessou uma sala com várias cadeiras e outros objetos posicionados como obstáculos, de forma completamente autónoma evitando sempre os obstáculos no seu caminho[13].

Em 1984 Ernst Dickmanns, investigador da Universidade das Forças Armadas Federais em Munique na Alemanha e a sua equipa começaram a desenvolver um veículo autónomo capaz de operar a velocidades altas. Uma carrinha Mercedes Benz 508D foi incorporada

com computadores, sensores e atuadores necessários, apelidada de VaMoRs (*Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen*). Este veículo era guiado por visão orientando-se pelas linhas a delinear a estrada, utilizando para obtenção de imagens, duas câmaras digitais a preto e branco com resolução 256x256 *pixels* com 8 bits de informação por *pixel*, uma com um campo de vista de ângulo largo (*wide angle field of view*) e a outra com uma lente telescópica para obtenção de melhor imagem numa zona mais distante da estrada. Como técnica de previsão era utilizado o modelo espaço-temporal, chamado de 4-D, no qual são utilizadas as três dimensões espaciais em conjunto com a categoria do tempo. Desta forma foi possível introduzir uma componente preditiva (*feed-forward*) no sistema, para além da componente de realimentação (*feedback*). Para o teste com o veículo VaMoRs foi usada uma pista circular com raio de 50 m, numa das secções da pista de testes Deimler Benz localizada em Untertürkheim, Estugarda na Alemanha. O veículo prosseguiu a uma velocidade média aproximada de 25 km/h, que corresponde a uma aceleração lateral de 0,1 G[14].

Em 1994 no âmbito do projeto da União Europeia, *PROgraMme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety* (PROMETHEUS), um Mercedes 500 SEL, apelidado de VaMoRs-P, equipado com um sistema de visão e componentes de computação melhorado[15][16], é já capaz de detetar obstáculos[17] (até 6 outros carros) à sua frente na estrada e também atrás de si, graças a um segundo par de câmaras viradas para a traseira do veículo[18]. Este veículo passa a conseguir seguir outros veículos, pode efetuar transição de faixas por conseguir determinar a ocupação ou não da faixa adjacente[19] e em consequência ultrapassagens são conseguidas. Outra adição às capacidades do sistema foi detetar bifurcações na estrada[19] e conseguir passar para a estrada secundária[20]. Em demonstração para a conclusão do projeto PROMETHEUS, o veículo andou mais de 1000 km em modo autónomo, numa autoestrada de três faixas em Paris na França, por entre tráfego normal tendo atingido velocidades de 130 km/h (36 m/s) e em 1995 foi demonstrada a capacidade de condução autónoma do veículo, numa viagem longa, desde Neubiberg em Munique até Odense na Dinamarca, tendo conduzido 95% do trajeto de forma autónoma com velocidades até de 180 km/h[21]. Estes foram marcos significativos na condução autónoma[1].

## 2.2. COMUNICAÇÕES ENTRE VEÍCULOS

Apesar das capacidades funcionais dos veículos autónomos, as suas capacidades podem ser amplificadas, com recurso a trocas de informação entre eles e com outros sistemas à sua volta. Melhorias que podem ser alcançadas com comunicações incluem:

- seguimento de veículos, inclusive quando em pelotões, mais eficiente e a menor distância. Passando a permitir saber qual a variação de velocidade que o veículo da frente vai fazer, em vez de só a medir com sensores depois de ela ter acontecido. Transmitindo para isso, o veículo da frente, ao de trás, quais as suas intenções;
- melhor reação a mudanças de estado de semáforos. No mesmo sentido do ponto anterior, se o veículo receber informação de quando o estado do semáforo vai mudar, poderá reagir de forma imediata, em vez de só poder reagir após detetar a mudança, depois dela ter acontecido;
- permitir atravessar interseções, de forma assistida. O veículo pode, quando for atravessar uma interseção, ser orientado por uma infraestrutura de controlo, que garanta a travessia em segurança e com maior eficiência energética[7];
- permitir que perturbações nas vias, por causas climáticas, de obras, etc... possam ter impactos reduzidos, com coordenação e desvio de trânsito[5];
- permitir variar a distância a que os veículos se seguem quando em pelotão. No caso de pelotões muito longos, por exemplo formados por camiões de mercadorias, como o ilustrado na figura 2, permite serem criados intervalos no pelotão, para permitir a passagem de outros veículos pelo meio[6];
- percepção do ambiente em redor melhorada com receção de dados de sensores de outros veículos. Permite um veículo decidir sobre os seus movimentos, não só processando as imagens que adquire da(s) sua(s) câmara(s) como também as que recebe do veículo da frente[22];
- obtenção de informação sobre outros veículos, que ajude no processo de tomada de decisão no caso de colisão eminente. Por exemplo no caso hipotético de uma colisão inevitável contra um de dois outros veículos, saber o número de ocupantes de cada um dos outros veículos, poderá servir para ajudar a decidir contra qual dos dois colidir[1].

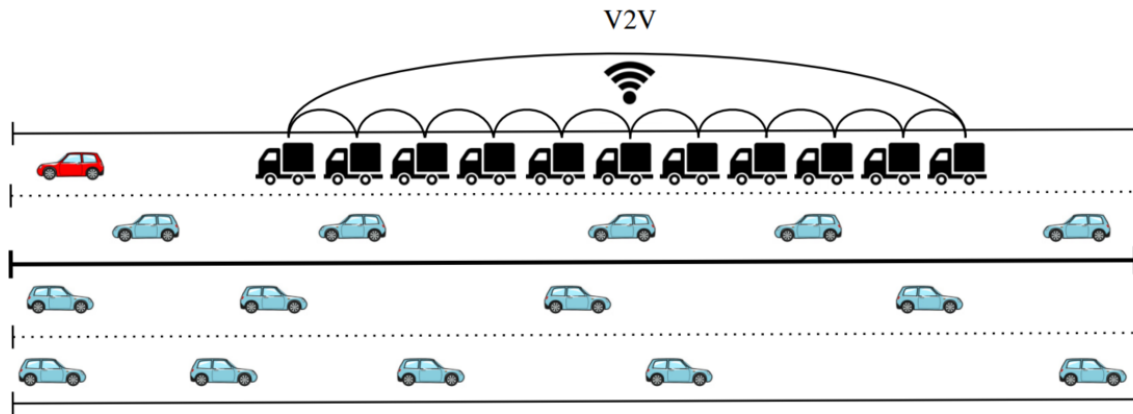


Figura 2 Pelotão formado por camiões com auxílio de comunicação entre veículos[23].

### 2.2.1. TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO

O *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) desenvolveu um conjunto de *standards* que especificam a arquitetura das comunicações entre *Intelligent Transport Systems* (ITS). Sendo estes divididos nos seguintes quatro sub-sistemas[24]:

- veículo - sistema móvel que se desloca dentro da estrada, como carro, camião, autocarro, motociclo, etc;
- pedestre - sistema móvel que se desloca fora da estrada e em passeadeiras, sendo estes dispositivos portáteis transportados por pedestres ou equiparados;
- central - sistema fixo fora da estrada como uma central de monitorização de trânsito;
- infraestrutura rodoviária (*roadside*) - sistema fixo ao lado ou por cima da estrada, incluindo painéis de sinalização, portagens, sinais de limite de velocidade, sistemas de controlo, etc.

As comunicações que envolvam veículos são denominadas de *Vehicle-to-Everything* (V2X) e podem ser sub-categorizadas dependendo do tipo de entidade com que comunicam [25][26]:

- *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) - aquelas que são realizadas entre dois veículos;
- *Vehicle-to-Infrastructure* (V2I) - aquelas que são transmitidas entre veículos e infraestruturas rodoviárias;
- *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P) - aquelas transmitidas entre veículos e pedestres ou

outros utentes equiparados;

- *Vehicle-to-Network (V2N)* - aquelas que envolvam ligações com redes nucleares (*core networks*), como a *internet*.

Sendo os veículos nós de rede móveis, as trocas de informação necessitam de ser, obrigatoriamente, realizadas de forma sem fios (*wireless*)[27]. Dada a importância das comunicações entre ITS, em matéria de segurança rodoviária, uma gama de frequências está alocada para uso por ITS.

Na Europa estão alocadas as frequências de 5875 MHz a 5935 MHz para aplicações relacionadas com segurança de ITS, divididas em canais de 10 MHz[28]. As frequências de 5875 MHz até 5915 MHz têm uso prioritário para ITS em estradas, sendo o canal de 5915 MHz a 5925 MHz limitado a transmissões de infraestruturas rodoviárias para veículos[29]. O uso das frequências acima de 5915 MHz é prioritário para ITS que operem em caminhos de ferro, separados de estradas e de trânsito pedestre, sendo limitado ao seu uso o espectro entre 5925 MHz e 5935 MHz[29]. Existem ainda dois canais de 10 MHz entre 5855 MHz e 5875 MHz alocados para aplicações de ITS, que não tenham intuito de segurança, uma vez que podem receber ruído de serviço móvel, serviço fixo e serviço satélite fixo (Terra-espço), que já partilham lá alocação[30].

No Japão, há uma banda de 80 MHz (entre 5770 MHz e 5850 MHz) dedicada para aplicações ITS, incluindo comunicações V2V e *Road-to-Vehicle (R2V)*[28].

Nos Estados Unidos da América o espectro entre a banda 5850 MHz e 5925 MHz está alocado para *Dedicated Short Range Communications (DSRC)*, com alguns canais específicos para aplicações ITS para segurança e acesso prioritário para aplicações de segurança genéricas para a banda toda[28].

A ETSI desenvolveu o *standard ITS-G5*[31], definindo as camadas 1 e 2 do modelo de comunicações *Open Systems Interconnection (OSI)*, utilizando a gama de frequências alocada a nível europeu para ITS e utilizando uma variante do *standard Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 803.11*, com o intuito de ser implementado em redes *Wireless Local Area Network (WLAN)*, do tipo *ad hoc* para comunicações V2X. Define o uso de Multiplexagem por Divisão em Frequências Ortogonais (OFDM) como

definido em IEEE 803.11, utilizando por defeito um esquema de codificação *Quadrature Phase-Shift Keying* (QPSK) ou 16 *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)[31]. Como os nós da rede são móveis, as transmissões são feitas fora de um contexto de *Basic Service Set* (BSS), como definido na emenda 'p' do standard IEEE 802.11, permitindo a troca de mensagens imediata, entre estações, evitando atrasos associados ao estabelecimento de uma BSS. Isso implica que durante a receção, o endereço nº 3 do cabeçalho *Medium Access Control* (MAC) seja sempre ignorado e aquando da transmissão este endereço seja preenchido com '1's[31]. Outra das especificações de ITS-G5 é que, todos os *frames* enviados devem ter *Quality of Service* (QoS) definido, sendo sempre utilizada a política de acesso *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA)[31].

A ETSI desenvolveu o *standard GeoNetworking*[27], definindo as camadas 3 e 4 do modelo de comunicações OSI, com o objetivo de permitir comunicação em ambientes móveis sem a necessidade de uma infraestrutura de coordenação, para redes sem fios do tipo *ad hoc*. Oferece transmissão de pacotes por retransmissão sucessiva ao longo de vários nós, até ao(s) nó(s) de destino, aumentando o alcance da comunicação com os múltiplos saltos[27]. Os pacotes são entregues em posições geográficas, e não em endereços identificadores de nós individuais. O endereçamento pode ser de três tipos[32]:

- *GeoUnicast* - utilizado quando for pretendido entregar um pacote a um só nó. O nó remetente precisa em primeiro lugar, de determinar a posição geográfica do nó de destino e depois entrega o pacote a um outro nó, perto de si que esteja na direção do nó de destino. O pacote vai sendo sucessivamente entregue a nós posicionados cada vez mais perto do destino, até à entrega;
- *GeoBroadcast* - utilizado quando for pretendido entregar um pacote a todos os nós, dentro de numa área, que pode ser circular, retangular ou elíptica[33]. O nó remetente entrega o pacote, destinado a uma área, a um outro nó perto de si que esteja na direção da área de destino. O pacote vai sendo sucessivamente entregue a nós posicionados cada vez mais perto do destino e uma vez entregue, todos os nós presentes dentro da área endereçada vão receber o pacote;
- *GeoAnycast* - parecido com o *GeoBroadcast*, mas apenas um qualquer nó dentro da área destino é que recebe o pacote;

- *Broadcast* de âmbito topológico - utilizado quando for pretendido entregar um pacote a todos os nós, que estejam a  $n$  saltos do remetente.

*Basic Transport Protocol* (BTP)[34] é o protocolo de camada de transporte definido para oferecer serviço de transporte mínimo, sem conexão e sem garantia de entrega. O seu propósito principal é permitir a multiplexagem e a desmultiplexagem de mensagens, baseada em portos. O cabeçalho BTP contém dois campos cada um com 16 bits, onde identifica o porto de origem e o porto de destino, que por ser pequeno requer processamento mínimo. No entanto o transporte de pacotes não é fiável, eles podem chegar em duplicado, fora de ordem ou podem ser perdidos.

Numa rede GeoNetworking é permitido encapsulamento de pacotes IPv6[35], e também consequente utilização de outros protocolos de transporte como *User Datagram Protocol* (UDP) ou *Transmission Control Protocol* (TCP).

São também definidos dois serviços básicos que geram mensagens do tipo:

- *Decentralized Environmental Notification Message* (DENM)[36] - mensagem que indica uma ocorrência na estrada, podendo estar relacionada com colisões, obras na estrada, condições climáticas adversas, etc. Uma DENM também é enviada para notificar o fim da ocorrência. Esta mensagem é endereçada para *GeoBroadcast*.
- *Cooperative Awareness Message* (CAM)[37] - mensagem enviada de forma periódica (pelo menos a cada 1000 ms e no máximo a cada 100 ms) para informar os outros nós, de qual a posição geográfica atual do nó remetente e do tipo de veículo que é. Esta mensagem é endereçada para todos os nós a um salto de distância.

Existem também redes para comunicações V2X baseadas em redes celulares, apelidadas de *Cellular V2X* (C-V2X). Os *standards* destas redes são definidos pela organização *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), sendo um baseado na rede celular *Long-Term Evolution* (LTE), que é apelidado de LTE-V2X, e o outro é baseado na *5th Generation New Radio air interface* (5G-NR) apelidado por sua vez de NR-V2X[23].

Cada uma destas duas tecnologias utiliza dois tipos de comunicação[23][25]:

- *Device-to-Network* (D2N) - realizada de forma infraestruturada, na qual o nó transmite por um canal de *uplink* para uma torre de comunicação e esta entrega a mensagem ao destino utilizando um canal de *downlink*. Este tipo de ligação é utilizada para V2N, fazendo uso de canais de frequências licenciadas para serviço móvel;
- *Device-to-Device* (D2D) - realizada diretamente entre veículos. Utilizada para comunicações V2V, V2I e V2P, fazendo uso dos mesmos canais que o ITS-G5, na banda de 5,9 GHz, utilizando a interface *Protocol Control* (PC)5.

No *standard* LTE-V2X, as comunicações D2D foram introduzidas na *Release* 14 passando a permitir comunicação direta entre veículos com recurso a um novo canal chamado de *Side Link* (SL)[23][38].

O *standard* NR-V2X na *Release* 16 continuou a permitir uma comunicação direta entre veículos, também utilizando um SL, mas com melhorias funcionais como maior fiabilidade, maiores taxas de transmissão e menores atrasos na entrega[23][39].

## 2.3. CONTROLO DE TRÁFEGO

Grande parte do deslocamento de seres humanos e/ou de bens materiais, é efetuado com recurso a veículos de transporte de vários tipos, como navios, carros, carroças, comboios, aeronaves, etc. Estes veículos proporcionam vantagens em relação ao que é possível um ser humano alcançar, conseguindo proporcionar o transporte de objetos com grande massa, com uma rapidez significativamente maior, durante longas distâncias e em locais de difícil acesso, sendo que grande parte dos veículos também fornecem proteção por forma de um ambiente mais ou menos isolado do exterior.

Devido ao número crescente de veículos a serem utilizados em certas zonas, surgiu a necessidade de se estabelecerem rotas que definam a direção e sentido dos veículos, para que o movimento seja mais organizado e conseqüentemente evitar que ocorram colisões

quer entre veículos quer com pessoas. Desta forma, passou a existir coexistência de tráfego em sentidos diferentes, apenas em pequenas secções do caminho onde os problemas de possibilidade de colisão continuam a existir. Este é o caso em caminhos para automóveis devido ao elevado volume de tráfego que geram principalmente em ambientes citadinos; por exemplo para navios e barcos o volume de tráfego que geram é tão reduzido, que quase não há necessidade de implementar qualquer tipo de controlo.

Nas zonas de interceção de vias públicas podem ocorrer colisões classificadas nos seguintes tipos:

- Colisões frontais – Ocorrem quando os veículos chocam ambos com a sua parte frontal, sendo os danos causados elevados por se estarem a deslocar na mesma direção mas em sentidos opostos. Este tipo de colisão pode ocorrer nos caminhos com trânsito em sentidos opostos e conseqüentemente também em interseções com vias públicas deste tipo;
- Colisões de traseira – Quando os dois veículos seguem na mesma direção e no mesmo sentido, e o veículo mais atrasado se desloca a uma velocidade superior ao da frente. Como o sentido do movimento dos veículos é o mesmo, o impacto destas colisões é menor em comparação com as colisões frontais. Estes ocorrem entre dois veículos consecutivos de uma via de trânsito e assim são também possíveis em qualquer zona de interseção. A ocorrência deste tipo de colisões depende da diferença de velocidade entre os veículos, da distância que os separa, da capacidade de travagem e da rapidez de reação do condutor do veículo perseguidor, sendo completamente evitáveis se o condutor do veículo seguidor tiver esses dados em conta;
- Colisões laterais – Resultam do choque entre dois veículos que seguem direções perpendiculares de tal forma a passarem num mesmo ponto no mesmo instante. Em estradas é um tipo de colisão limitado às zonas de interceção;
- Colisões com ângulo – São colisões com características entre as colisões de traseira e colisões laterais, porque os veículos nem seguem direções perpendiculares nem paralelas. Ocorrem quando um dos veículos está numa via de trânsito e o outro efetua um movimento para entrar nessa mesma via de trânsito, como numa troca de via de trânsito e zonas de interseção tais como entroncamentos.

As zonas de interseção requerem especial atenção por serem propícias a mais tipos de colisões que as vias públicas, como ilustra a figura 3, e por isso, são aplicadas medidas de controlo para reduzir a possibilidade de ocorrerem colisões.

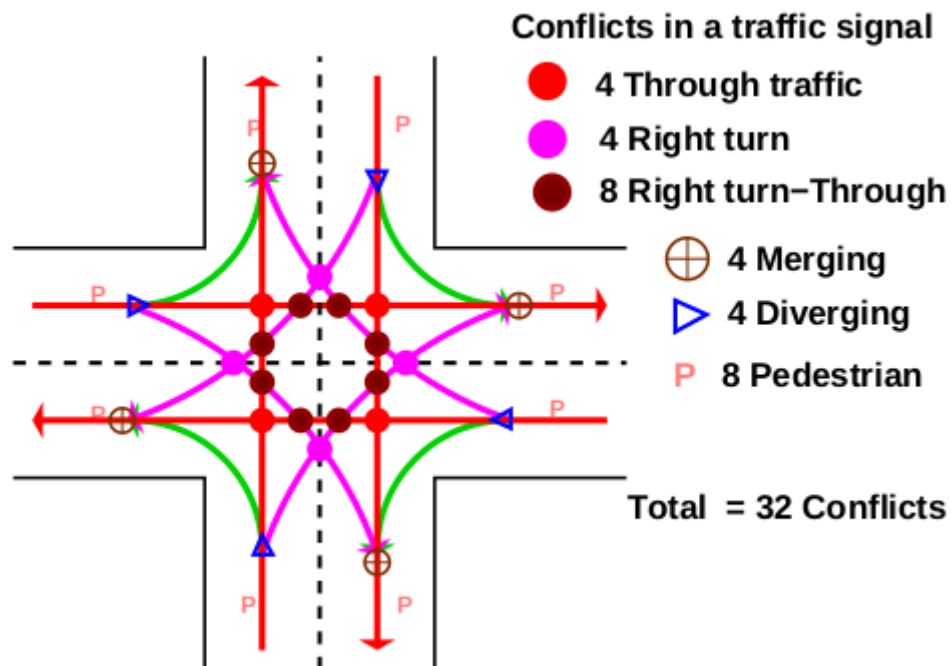


Figura 3 Ilustração de pontos de possível colisão em zona de interseção[40].

Cada condutor é informado de alguma forma, enquanto se aproxima destas zonas de interseção ou já está informado previamente, de quando tem direito a efetuar a travessia e de quando deve ceder a passagem a outros condutores. Se todos os condutores cumprirem estas regras predeterminadas é previsto, que a fluidez do tráfego não seja diminuída em demasia e mais importante ainda, que a probabilidade de ocorrerem colisões entre veículos seja muito baixa.

Hoje em dia as regras que regem as estradas destinadas a tráfego automóvel, nomeadamente as regras referentes a zonas de interseção são determinadas pelos condutores em duas partes. A cada condutor é exigida uma formação, para que possa conduzir em vias públicas e durante essa formação são-lhe transmitidas todas as regras aplicáveis à condução, e fica encarregue o condutor de interpretar constantemente cada situação com que se depara na estrada, determinar que regras se aplicam em cada situação e cumpri-las. As regras são tornadas mais específicas aos condutores por forma de sinais visuais, que podem estar presentes ao lado das vias públicas, por cima ou

pintados nelas próprias, ou podem também ser providenciados por um agente da autoridade, normalmente presente na interseção. Estes sinais visuais apresentam vários tipos de importância, sendo alguns apenas de indicação[41] no sentido de auxiliarem, por exemplo a tomada de decisão sobre o percurso a seguir, enquanto que outros são de regulamentação e podem inclusive retirar o efeito de outros sinais anteriores[41]. Ao interpretar estes sinais com que se depara ao longo do seu percurso, o condutor determina que regras estão em vigor para as várias secções do caminho.

O seguimento das regras definidas para as zonas de interseção em estradas públicas apresenta para os condutores uma importância elevada, porque estas regras foram desenhadas com base no princípio imperativo de assegurar a segurança de todos os utentes das vias públicas, e a sua implementação por parte de todos proporciona um ambiente seguro, algo que é do melhor interesse de todos os condutores. Por outro lado o não cumprimento dessas regras, por parte dos condutores consiste numa infração penal punível por lei, dependente do tipo de infração cometido, mesmo que não tenha resultado dessa infração nenhuma colisão com outro veículo ou pedestre, sendo isto também ensinado durante a formação dos condutores.

### 2.3.1. SOBREPOSIÇÃO DE CAMINHOS

Em telecomunicações utiliza-se o Acesso Múltiplo por Divisão nas Frequências (FDMA), para que possam ser efetuadas várias transmissões ao mesmo tempo em paralelo, de forma a permanecerem distinguíveis umas das outras. É apenas essencial, que não existam duas transmissões em simultâneas à mesma frequência, para que seja possível o isolamento de cada transmissão com recurso a filtragem.

Nesta metodologia de partilha de meio são definidos conjuntos ou intervalos de frequências para serem utilizadas. É também arbitrado de alguma forma que frequência é utilizada por qual emissor e desde que todos apenas utilizem a frequência que lhes foi atribuída, todos poderão transmitir ao mesmo tempo, o que não seria possível se alguns utilizassem a mesma frequência, pois as suas transmissões iriam sobrepor-se e ficariam indistinguíveis para os recetores.

Exemplificando com o caso das transmissões de rádio *Frequency Modulation* (FM), cada

estação utiliza uma frequência portadora diferente para a sua transmissão, sendo por isso possível estarem constantemente a transmitir. Os recetores recebem, todos os sinais das estações, mas fazendo filtragem à frequência portadora da transmissão de rádio que pretendem ouvir, conseguem isola-la das outras transmissões. Esta é uma forma de separar o tráfego em telecomunicações permitindo transmissões paralelas no mesmo meio de comunicação.

Existe também uma técnica para controlo de tráfego de veículos, em que vários veículos utilizam a mesma área ao mesmo tempo, mas cada veículo utiliza um percurso que o separa dos outros. Da mesma forma que a separação em FDMA não é relativa às mensagens transmitidas, mas sim em relação à frequência sobre a qual são transportadas, esta separação de tráfego de veículos não é feita em relação a cada veículo, mas sim em relação aos caminhos sobre os quais estes se deslocam.

Uma das soluções para reduzir as áreas onde possam ocorrer colisões de veículos em sentidos diferentes, consiste em criar um dos caminhos cruzantes a uma elevação diferente do outro[40], e da mesma forma que uma ponte sobre um rio permite que a travessia seja feita sem se entrar em contacto com a água, o tráfego dos dois caminhos é separado no espaço e a probabilidade de colisão entre veículos dos dois caminhos passa a ser nula.

Este tipo de controlo é facilmente implementado em caminhos definidos para veículos que se desloquem livremente num meio como são exemplo as aeronaves. Outros tipos de veículos não usufruem desta facilidade em implementar este tipo de controlo, por não se deslocam livremente num meio, veículos como por exemplo os automóveis e os navios necessitam de uma superfície, tendo de um lado um meio e do outro lado um outro meio diferente. Nestes casos este tipo de controlo só é possível, com a existência de pelo menos duas superfícies a alturas diferentes, como está na figura 4 exemplificado o caso da sobreposição de dois caminhos para uso por automóveis.



**Figura 4** Interseção folha de trevo, com sobreposição de caminhos destinados a automóveis[42].

No entanto a construção deste tipo de infraestrutura em estradas destinadas a veículos automóveis, é por vezes inconveniente dadas as condições do local, o custo monetário que origina ou até pelo fato de tornar inutilizáveis os caminhos durante o tempo de construção[40].

Este tipo de controlo elimina a possibilidade de colisões laterais entre as duas vias principais, mas não elimina por completo os conflitos em interseções mais completas, que permitam mudança de uma via para a outra na zona de interseção, como serve de exemplo a interseção do tipo folha de trevo mostrada na figura 4, que apresenta 4 vias de trânsito circulares para mudança de direção e causa conflito no local de entroncamento com a via principal.

#### 2.3.2. CONTROLO COM DISTRIBUIÇÃO NO TEMPO

Em sistemas de telecomunicações um Acesso Múltiplo por Divisão nos Tempos (TDMA) é aplicável em situações nas quais o meio de comunicação é partilhado por vários dispositivos que comunicam utilizando a mesma frequência. Neste tipo de configuração, a transmissão é feita apenas por um dispositivo de cada vez, pois se ocorrerem transmissões ao mesmo tempo estas irão sobrepor-se, resultando em interferência que não irá permitir a sua posterior total separação aquando da receção. Sendo como exemplo da implementação deste tipo de acesso ao meio o caso da rede celular *Global System for Mobile communications* (GSM), cuja trama está representada na figura 5.

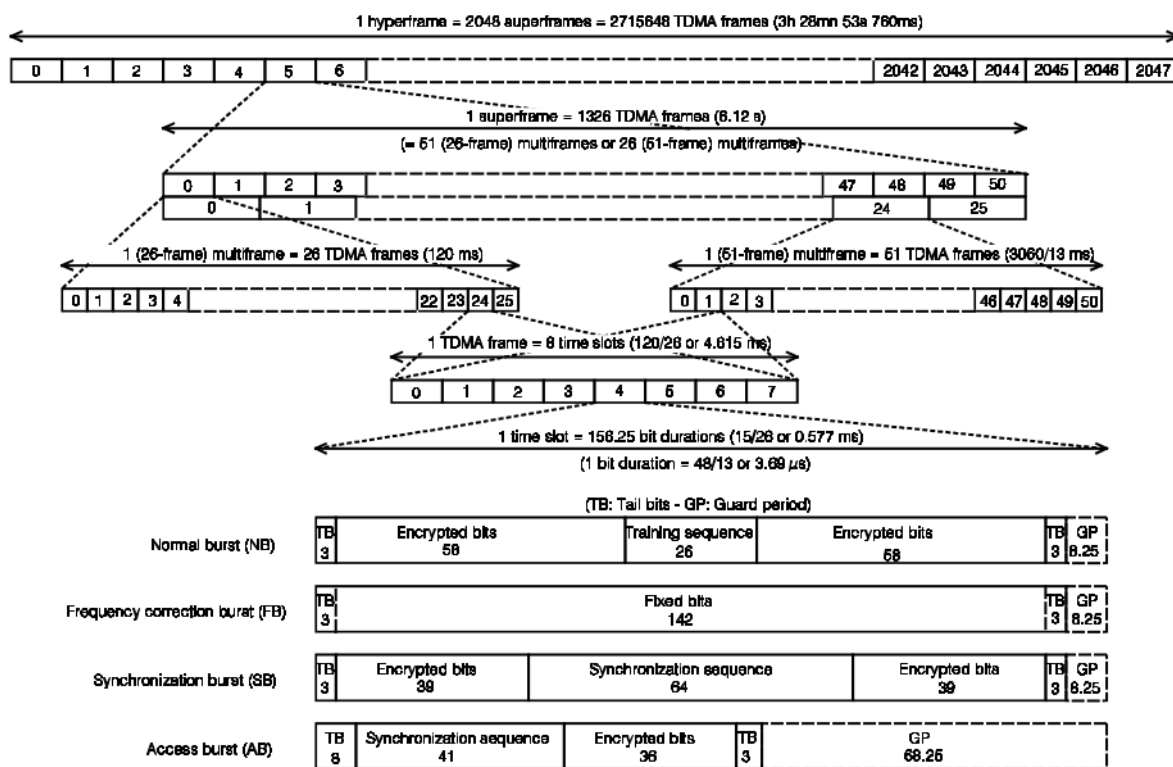
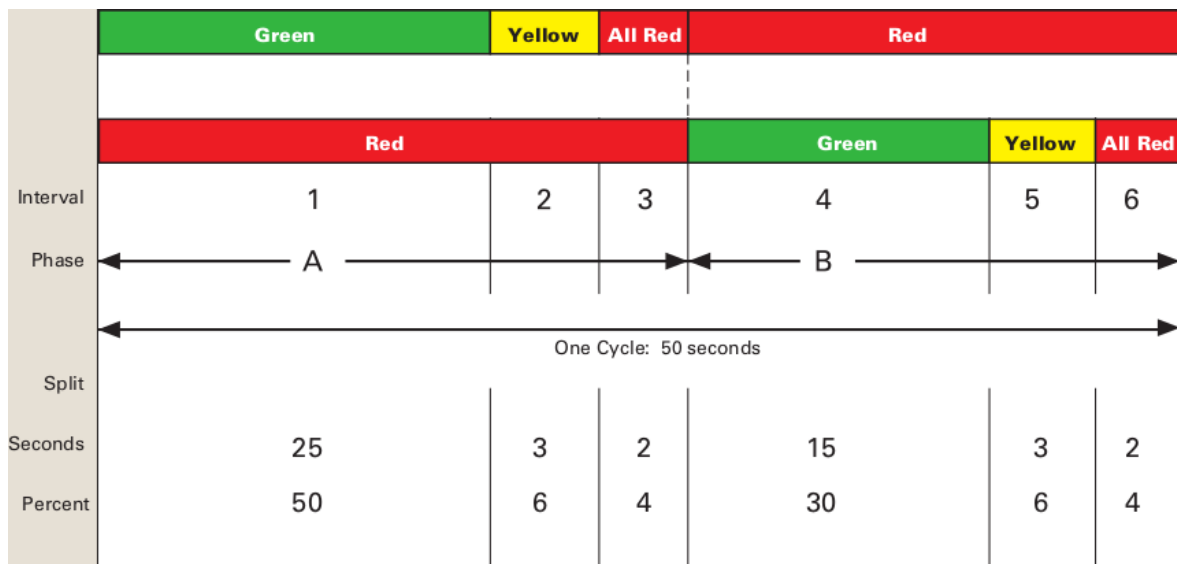


Figura 5 Trama TDMA do protocolo de comunicação sem fios GSM[43].

Neste tipo de divisão é definida uma trama de tamanho fixo que se repete ao longo do tempo e que é constituída por vários intervalos de tempo de igual dimensão temporal. Cada um destes intervalos é atribuído a um dos equipamentos comunicantes via parametrização nos próprios equipamentos ou com recurso a uma comunicação que interliga os equipamentos, podendo esta parametrização ser feita utilizando, de entre de os vários intervalos de tempo que constituem a trama, algum em específico já definido *à priori* para tal ou utilizando até um outro meio de comunicação distinto. Um dispositivo pode comunicar livremente durante o intervalo de tempo que lhe for atribuído e é por essa razão que é essencial para o funcionamento com sucesso deste tipo de controlo de acesso ao meio, que cada intervalo de tempo seja atribuído apenas a um equipamento. Se a duração do intervalo não for suficiente para o dispositivo terminar a comunicação que pretende fazer, terá de esperar pelo intervalo de tempo que lhe for atribuído da trama seguinte. Se o dispositivo não tiver dados para transmitir durante o intervalo de tempo que lhe foi atribuído para uma dada trama, o meio de comunicação não será utilizado durante esse tempo e mesmo que existam outros dispositivos que queiram comunicar precisarão de esperar pelo seu intervalo de tempo para o fazer.

De modo a não ser necessária uma alteração estrutural a nenhum dos caminhos, o problema das possíveis colisões pode ser resolvido com a implementação de controlo da passagem nestas secções de conflito, sendo para isso impedida a passagem de tráfego com trajetos sobrepostos ao mesmo tempo. Zonas de interseção com controlo com distribuição no tempo “[...] operam sob o fundamento de que períodos temporais separados são alocados a movimentos de trânsito conflituosos para que cada um possa fazer uso seguro e eficiente do espaço disponível da via.”[44]. Para esse efeito está definido um ciclo temporal (equivalente à trama em TDMA), durante o qual vai sendo dada permissão de travessia a cada uma das vias de transito em períodos de tempo diferentes, de maneira a todas poderem utilizar a zona de interseção sem hipótese de conflitos, como é exemplo a representação da figura 6.



**Figura 6** Ciclo de luzes de semáforos, pré-temporizado, numa interseção com duas fases[45].

Para impedir o uso simultâneo de uma zona de interseção podem ser utilizadas barreiras físicas controláveis que possam impedir a passagem de veículos. Estas barreiras são controladas para cada via da interseção, estando desativadas para permitir a passagem de veículos, durante o tempo de utilização atribuído à via a que são afetas e durante o resto do tempo estão ativas impedindo a passagem de veículos na interseção.

O tipo de controlo mais vulgar, em zonas de interseção de vias de trânsito é a utilização de semáforos luminosos, que “[...] periodicamente interrompem o fluxo de trânsito de cada faixa ou conjunto de faixas. O trânsito num dado conjunto de faixas é possível apenas para

uma porção do tempo total, por o sinal proibir trânsito durante alguns períodos. Apenas o tempo durante o qual o sinal é efetivamente verde está disponível para trânsito.”[46]. Os semáforos consistem num conjunto de luzes instaladas por cima e/ou ao lado das vias de trânsito, imediatamente antes da zona da interseção e de modo a emitirem luz no sentido oposto ao do movimento dos veículos, para estarem visíveis pelos condutores antes de entrarem na interseção. As luzes dos semáforos são de três cores, vermelho, amarelo e verde, que podem cada uma representar uma forma, como por exemplo uma seta, para especificar quais as faixas de trânsito que são afetadas por elas. Em qualquer instante apenas uma cor está ligada e comunica aos condutores o estado de movimento que devem implementar. A luz vermelha indica que os veículos não podem entrar na interseção e em oposição a luz verde indica que os veículos podem entrar na zona de interseção. A implementação da luz amarela é necessária para colmatar o fato de no caso um condutor estar a prosseguir para a entrada da zona de interseção, e a luz verde se desligar e se ligar a vermelha a rapidez a que o veículo vai pode causar, que mesmo tentando travar o movimento, o veículo apenas pare dentro da zona de interseção e o condutor acaba por entrar na zona de interseção sem permissão. E mesmo que o movimento seja terminado ainda antes da zona de interseção a diminuição de velocidade será tão repentina, que todos os presentes no veículo incluindo mercadorias iriam experimentar uma elevada força por causa da sua diferença de momento em relação ao momento cada vez menor do veículo, o que pode causar danos físicos e/ou materiais ou no mínimo torna-se desconfortável para os passageiros. A luz amarela é então ligada durante alguns segundos antes da luz vermelha indicando aos condutores de veículos mais afastados da zona de interseção, para pararem antes da entrada da zona de interseção e não ficarem na situação acima descrita. Indica também aos condutores que estejam demasiado próximos da zona de interseção e que possam não conseguir parar antes da entrada da mesma, que devem prosseguir pela zona de interseção.

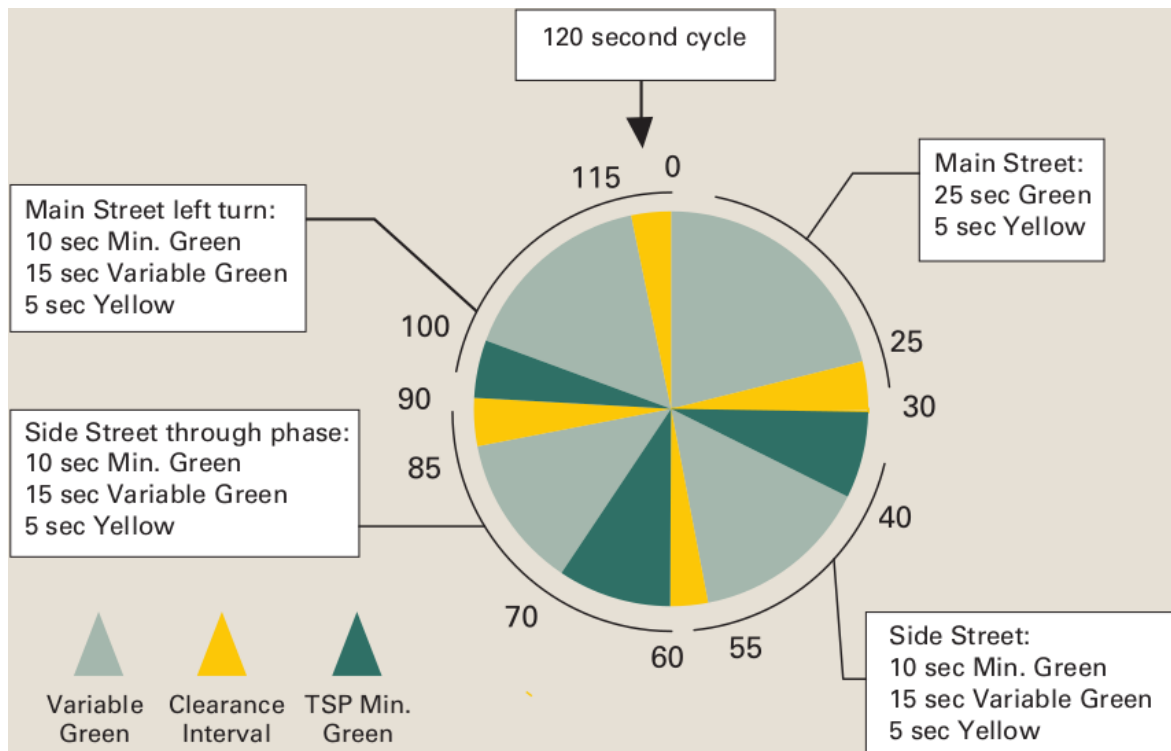
Este tipo de controlo exige funcionalidades eletrónicas de temporização, contagem e comutação de saídas de forma cíclica, sendo funções suficientemente simples para serem utilizados circuitos lógicos e são utilizados controladores lógicos programáveis ou micro-controladores para o controlo destas luzes.

### 2.3.2.1. CONTROLO COM DISTRIBUIÇÃO NO TEMPO DINÂMICO

Em telecomunicações existe uma variante de TDMA, no qual a atribuição dos intervalos de tempo da trama é pressuposta de pedidos por parte dos equipamentos comunicantes, chamado de TDMA dinâmico. Os equipamentos enviam intenções de transmissão, para o controlador e este atribuí os intervalos de tempo da trama para utilização, de forma aos equipamentos com mais transmissões por fazer poderem utilizar maior número de intervalos de tempo, nomeadamente usufruindo dos intervalos de tempo de equipamentos sem dados para transmitir.

Para controlo de trânsito, existem três tipos de controladores com distribuição no tempo[46], com respetiva ilustração nas figuras 6 e 7:

- Pré-temporizado - no qual uma sequência de fases é apresentada em ordem repetitiva. Cada fase tem tempos de verde, amarelo e vermelho fixos que se repetem em cada ciclo para produzir uma duração de ciclo constante;
- Completamente atuado - no qual a temporização de todas as entradas para a interseção são influenciadas por detetores de veículos. Cada fase está sujeita a um tempo mínimo e máximo de verde, e algumas fases podem ser saltadas à frente se não houver procura detetada. A duração do ciclo para um controlador completamente atuado varia de ciclo para ciclo;
- Semi-atuado - no qual algumas entradas (tipicamente de estradas secundárias) têm detetores e algumas das entradas (tipicamente de estradas principais) não têm detetores.



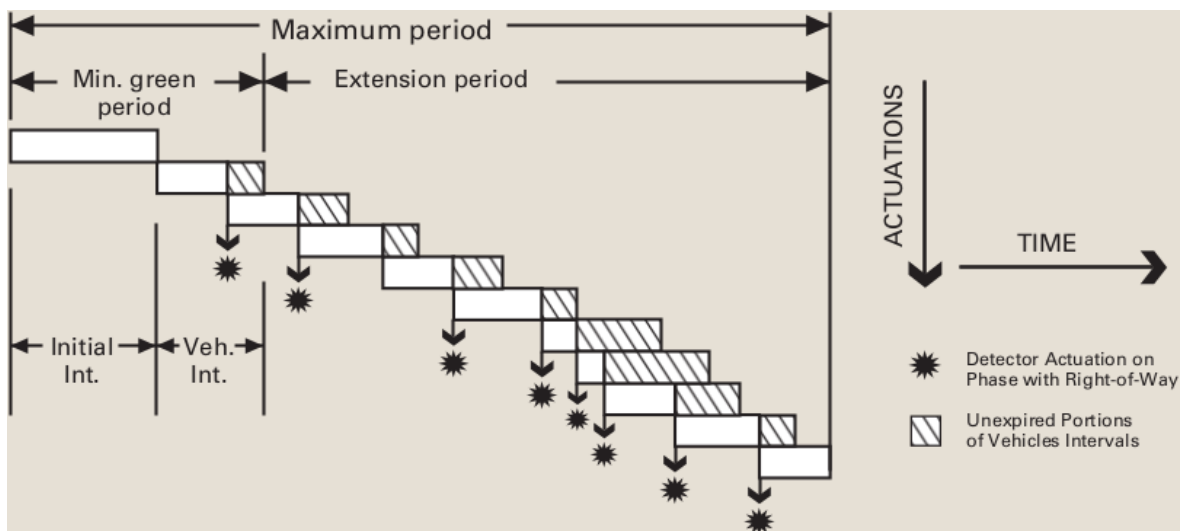
**Figura 7** Ciclo de duração variável entre 45 s e 120 s por os tempos de verde serem variáveis em sistemas atuados[45].

Um problema da utilização dos semáforos pré-temporizados, que são a maioria[47], é que para condições de muito baixo volume de trânsito, aumenta significativamente a probabilidade de existirem proibições de movimento a vias com veículos em fila de espera, enquanto que vias sem trânsito recebem permissão de uso da interseção. "[...] a vasta maioria dos semáforos não consegue adaptar-se a variações das condições de trânsito e pode resultar em paragens desnecessárias de veículos sob luzes vermelhas."[48].

Os sistemas de controlo de tráfego com semáforos que são atuados, utilizam dados de entrada para ser implementado um controlo mais ajustado às condições de trânsito na entrada da interseção[47][49]. Os controladores atuados utilizam sensores, que podem utilizar diversas grandezas físicas, como câmaras que recebem luz, bobines que detetam campo magnético[47] ou radares que transmitem e recebem ondas eletromagnéticas com um comprimento de onda específico. Estes sensores permitem medir a presença de veículos numa dada faixa de trânsito, e assim quantificar o comprimento da fila de veículos em espera, e o sistema gestor consegue com esses dados ajustar a duração da luz

verde de cada via de trânsito, para tentar melhorar o volume de transito a utilizar a interceção por unidade de tempo e a diminuição do comprimento das filas de veículos que ainda esperam por permissão para utilizar a interseção. Servindo para colmatar o problemas dos sistemas controladores pré-temporizados descrito no parágrafo anterior. “Não há necessidade de um motorista esperar pela sequência completa de uma interseção quando for o único à espera, o radar irá assim deteta-lo e alterar a sequência para prioriza-lo.”[50].

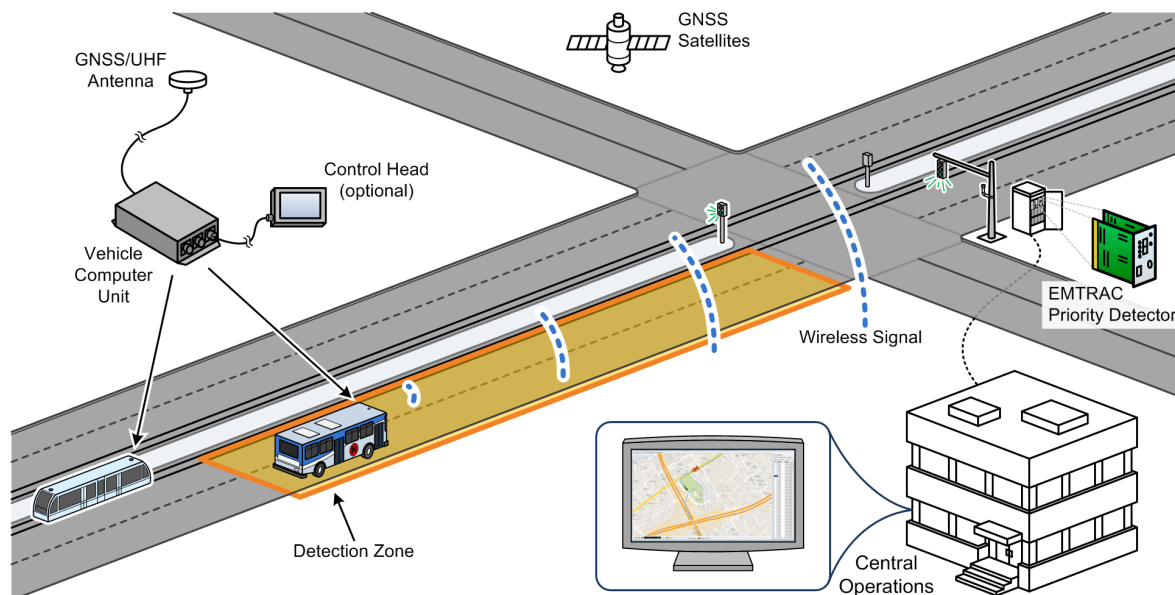
Na figura 8 está ilustrado como a detecção de veículos por parte dos sensores é utilizada para determinar a duração do tempo de verde de uma fase, num sistema atuado. Começa por ser dado um tempo de verde mínimo, que está presente independentemente das condições de trânsito, se antes do tempo mínimo se esgotar for detetado um veículo é feita uma extensão ao tempo de verde, que começa quando no instante da detecção, e sucessivamente vai sendo adicionada sempre que um veículo for detetado a não ser que se atinja o tempo máximo de verde para essa fase. Se não houver detecção de nenhum veículo na entrada, o sistema termina o tempo de verde e vai passar a permissão de uso da interseção a outra fase.



**Figura 8** Determinação do tempo de verde com detecções de veículos[45].

Para além disto, alguns semáforos favorecem a passagem de certos tipos de veículos, nomeadamente veículos de emergência ou de transportes públicos, que dadas as suas funções não devem ficar retidos no trânsito. Para a detecção destes veículos especiais, por parte do sistema de controlo dos semáforos, são utilizados dispositivos que implementam

comunicações sem fios[51]. Os veículos transportam um dispositivo que transmite dados e o sistema de controlo dos semáforos também tem um dispositivo, que serve para receber esses mesmos dados de presença, como se ilustra na figura 9. Após interpretação dos dados transmitidos pelo veículo, o sistema pode efetuar medidas corretivas aos semáforos para que o veículo se depare com a luz verde ligada para a sua via de trânsito, aquando da sua chegada à zona de interseção, possibilitando que prossiga o movimento sem interrupções.



**Figura 9 Sistema de controlo com deteção sem fios de veículos prioritários[51].**

### 2.3.3. CONTROLO ORIENTADO AO VEÍCULO

No controlo de tráfego por sobreposição de caminhos as vias de trânsito são separadas no espaço, pelo que o controlo é orientado às vias de trânsito e é independente do número de veículos que as percorrem. No controlo por distribuição no tempo o controlo é também orientado às vias de trânsito, pois estas recebem permissão de utilização da zona de interseção independentemente do fato de terem veículos que queiram utilizar a zona de interseção. Os tipos de semáforos que utilizam dados de entrada, apesar de detetarem a presença de veículos, mesmo em alguns casos individualmente, continuam a atribuir permissão de utilização da zona de interseção às vias de trânsito, sendo na mesma um controlo orientado às vias de trânsito por intervalos de tempo. Neste sub-capítulo são apresentados tipos de controlo orientados ao veículo, nos quais a decisão de permissão de passagem é determinada pela presença ou não de outros veículos à entrada da

interseção e a permissão por sua vez é dada aos veículos individualmente.

Na ausência de sinais visuais, que especifiquem aos condutores o tipo de regras que se aplicam para a estrada em que estão, estes seguem um conjunto de regras, ensinadas durante a formação dos condutores, que por exemplo, definem a velocidade máxima a que o veículo pode seguir em cada tipo de estrada ou definem a prioridade de passagem numa interseção.

Numa dada zona de interseção sem sinais visuais, para a determinação do direito de utilização, os condutores seguem a regra geral de prioridade, que lhes foi ensinada durante a sua formação. Os vários automóveis que chegarem à zona de interseção, devem utilizá-la por ordem de chegada sempre que possível. Mas quando dois ou mais automóveis chegam ao mesmo tempo à entrada da mesma zona de interseção em vias de trânsito concorrentes, esta regra dita que qualquer automóvel deve dar prioridade de passagem ao automóvel que se encontra à sua direita[52]. Aquele sem automóveis em espera na entrada imediatamente à sua direita, deve prosseguir para a zona de interseção e ao fazê-lo possibilita ao que estava à sua esquerda, que não tenha de esperar mais, sendo criada uma sequência de entradas consecutivas na zona de interseção no sentido dos ponteiros do relógio. No caso excepcional de todas as entradas estarem ocupadas, é necessário um dos condutores tomar iniciativa no uso da zona de interseção e depois prossegue-se normalmente à sequência de utilização predefinida. Utilizando a figura 10 para ilustração de um exemplo, veículos que sigam o percurso 4 têm de dar permissão de passagem aos veículos dos percursos 2 e 3 por estes estarem à sua direita durante a travessia da interseção.

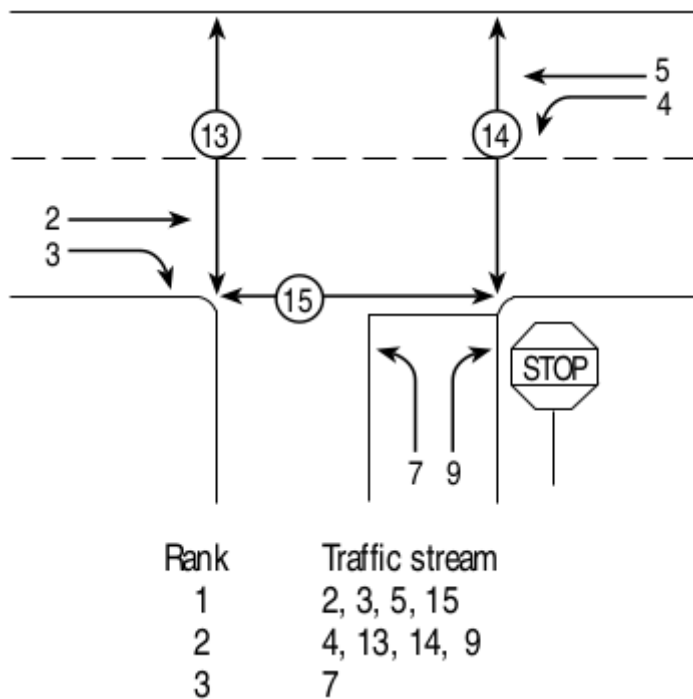


Figura 10 Interseção em T com a ordem de passagem das 3 fases de movimento[46].

Nos outros casos encontram-se sinais aquando da aproximação das interseções, que definem em que condições devem os condutores ceder a passagem aos outros automóveis[41]. Estão definidos sinais deste tipo que indicam, quando o condutor deve ceder passagem a outros automóveis, em aproximação da zona de interseção em causa e quando a via de trânsito em que se encontra tem prioridade de passagem em relação a outras, como são exemplo os sinais de stop e de cedência de passagem.

Quer a interseção tenha sinais ou não a tomada de decisão é feita pelos condutores, tendo cada um de procurar veículos nas várias entradas da interseção e determinar quais têm prioridade em relação a si. Ainda é necessário que todos os condutores à entrada da interseção determinem corretamente a ordem de passagem, pois apenas é preciso um não o fazer para passar a existir uma situação de colisão. Falhas na tomada de decisão podem ser causadas por o condutor não ficar alertado para algum veículo, por insuficiência de visão ou por algum bloqueio na linha de vista, ou também por o condutor falhar na interpretação da direção do movimento do outro veículo.

Os tipos de controlo mencionados neste capítulo até ao momento são destinados a veículos conduzidos por seres humanos, que são os agentes que controlam o veículo e o

fazem alterar o movimento a seu entender, sendo por isso a transmissão de dados feita usualmente em semáforos por sinais de luz na gama de comprimentos de onda visível. Apesar de ainda não ser muito evidente nas estradas já existem alguns veículos que não são controlados por seres humanos, os denominados veículos autónomos são controlados por equipamentos eletrónicos, que por sua vez tiram vantagem de vários tipos de sensores, que são instalados no veículo, para determinarem o tipo de movimento que o veículo deve ter. Os veículos autónomos seguem o mesmo tipo de regras que os veículos tripulados, quando coexistem nas mesmas vias públicas e com o recurso a câmaras e processamento das imagens que obtêm delas, interpretam os sinais visuais presentes nas estradas, incluindo as luzes dos semáforos, da mesma forma que os condutores humanos utilizam os seus olhos para fazerem o mesmo.

No entanto os veículos autónomos conseguem comunicar com outros veículos autónomos ou outros sistemas alcançáveis por comunicações sem fios e agrupar por esse meio ainda mais dados para auxiliar nas tomadas de decisão.

Nas zonas de interceção com semáforos, mesmo que atuados, os veículos autónomos podem interpretar qual o estado das entradas da interseção, em relação à presença de veículos e determinar se podem avançar, mesmo que o semáforo não esteja a ceder permissão de passagem à entrada onde se encontra o veículo autónomo.

Em zonas de interseção estas capacidades podem permitir aos veículos autónomos, que ultrapassem as limitações dos condutores humanos a nível de interpretação da situação relativa a trânsito na interseção, nomeadamente numa interceção sem sinais visuais, e possam ter uma melhor tomada de decisão.

Uma possível melhoria passa por, um veículo autónomo que se encontre parado antes da zona de interceção, por o semáforo da sua via de trânsito estar a vermelho, e na via de trânsito concorrente, cujo semáforo se encontra com a luz verde, estarem presentes poucos veículos em passagem. Se um dos veículos dessa via de trânsito também for autónomo, pode ao passar na zona de interceção comunicar ao veículo autónomo parado no semáforo, por exemplo qual a distância que o separa do veículo que o segue. O veículo parado pode utilizar essa informação e determinar por exemplo, se consegue utilizar a zona de interseção, depois do outro veículo autónomo passar e antes de chegar o veículo

que lhe segue, por forma a não criar risco de colisão. Se determinar que consegue atravessar em segurança e se o fizer, reduz o seu tempo de espera, diminui a fila de veículos em espera na sua via de trânsito e a zona de interseção é ocupada durante mais tempo levando a uma maior da eficiência do seu uso. Para este exemplo hipotético, quantos mais veículos autónomos se encontrassem em zonas de interseção de vias públicas, mais se conseguiria aumentar a eficiência dessa zona, ficando a eficiência limitada pela falta de cooperação entre os veículos tripulados e os veículos autónomos por não comunicarem.

Em cenários em que pelo menos certas zonas de interseção apenas são frequentadas por veículos autónomos capazes de comunicarem, é possível rejeitar as medidas de controlo de tráfego como os semáforos luminosos, por não haver necessidade dessas luzes visíveis para informar o condutor (não humano) se tem permissão de passagem ou não, e em seu lugar utilizar telecomunicações para os veículos receberem as informações relativas à sua permissão de utilizar ou não a zona de interseção.

Se todos os veículos comunicarem, por exemplo a sua posição e a sua velocidade, enquanto se aproximam de uma zona de interseção, ao sistema de controlo, passa a ser possível a determinação da sua posição para vários instantes de tempo, quer antes da sua entrada na zona de interseção quer durante a travessia. Comparando as várias posições dos veículos, que vão estar na zona de interseção ao mesmo tempo, o sistema de controlo consegue prever quais dos veículos irão entrar em risco de colisão e indicar-lhes medidas corretivas, a fim de todos atravessarem em segurança. Para tornar isto possível pode ser atribuído por exemplo, um tempo de utilização da zona de interseção a cada veículo individualmente. Como o sistema de controlo consegue determinar o movimento a seguir por cada veículo, pode calcular o tempo que estes demoram desde a entrada até à saída da zona de interseção, podendo esse tempo de utilização ser ajustado também individualmente a cada veículo, para aumentar ainda mais a eficiência do uso da zona de interseção.

Com um controlo deste tipo é possível, que dois veículos consecutivos com permissão de utilização da zona de interseção, sejam provenientes de vias de trânsito diferentes, o que vai manter as filas de automóveis à entrada da interseção em movimento pela perda

periódica do primeiro automóvel da fila. Em vez de ser atribuída permissão de forma cíclica às várias entradas da interseção, a permissão pode ser atribuída ao primeiro veículo de cada fila de trânsito à entrada. Este tipo de controlo pode reduzir o tempo de espera e consumo de energia, por os veículos não necessitarem de iniciar o movimento a partir de uma posição estacionária.

O tipo de controlo de tráfego mencionado neste sub-capítulo 2.3.3., em oposição aos descritos anteriormente, não é orientado às vias de trânsito onde se deslocam os veículos, ou seja a permissão de utilização não é dada a toda a via de trânsito, levando a que os veículos provenientes destas vias possam utilizar a zona de interseção, mas é sim dada permissão de uso a cada veículo de forma individual, consoante as suas características de movimento e as dos outros veículos nas proximidades da zona de interseção.

Para determinar qual dos veículos tem permissão para utilizar a zona de interseção e durante quanto tempo, pode existir uma infraestrutura perto da zona de interseção, que comunica com todos os veículos e faz esta mesma determinação com base nos dados aglomerados, caso similar à infraestrutura dos sistemas de semáforos com deteção de prioridade já ilustrado na figura 9, ou a determinação pode ser feita por cooperação entre os veículos presentes nas imediações da zona de interseção, tendo neste último caso os veículos de comunicar diretamente entre eles[53].

Se os veículos comunicarem entre si ou todos os veículos efetuam os mesmos cálculos, com os seus dados e os dados de todos os outros veículos, para determinarem qual utiliza a zona de interseção e durante quanto tempo, ou tem de ser designado de alguma forma um veículo autoritário, que irá efetuar o processamento dos dados e transmitir para todos os outros veículos as permissões de passagem de cada um. Se todos os veículos efetuarem os cálculos, os resultados por sua vez são enviados a todos os veículos e passam a haver várias transmissões a enviar e mesma informação para o mesmo destinatário. Sendo estas transmissões por um lado boas por se aumentar a redundância e se fazer com que, dificilmente os dados não cheguem ao destinatário, e no eventual caso de os dados de uma transmissão estarem errados, o destinatário pode ignorá-los por serem diferentes da maioria dos dados das outras transmissões. Por outro lado a quantidade de transmissões efetuadas e o processamento dos dados levam a um maior

consumo de energia e o método de tomada de decisão, tem de ser de tal forma, que a maioria dos diferentes veículos, cheguem aos mesmos resultados independentemente das suas diferenças.

Se os cálculos forem efetuados por um equipamento independente, como numa infraestrutura próxima da zona de interseção, os veículos transmitem os seus dados para o sistema de controlo, que efetua os cálculos apenas uma vez e transmite aos veículos como resposta as permissões de passagem de cada um. Assim o número de transmissões é menor e como o processamento é centralizado os resultados são sempre coerentes.

#### 2.3.3.1. *AUTONOMOUS INTERSECTION MANAGEMENT (AIM)*

Este tipo de controlo é proposto e implementado em linguagem de programação Java no simulador AIM, onde o controlador da interseção, que é um sistema eletrónico presente nas imediações da interseção, troca mensagens com os veículos autónomos que se encontrem até a uma distância máxima de 250 metros do centro da zona de interseção. O controlo proposto foi apenas aplicado em cruzamentos de duas faixas de rodagem com trânsito em ambos os sentidos, podendo haver até 16 vias de trânsito em cada via pública[54]. Mostrando-se na figura 11 um exemplo de uma imagem de uma simulação.

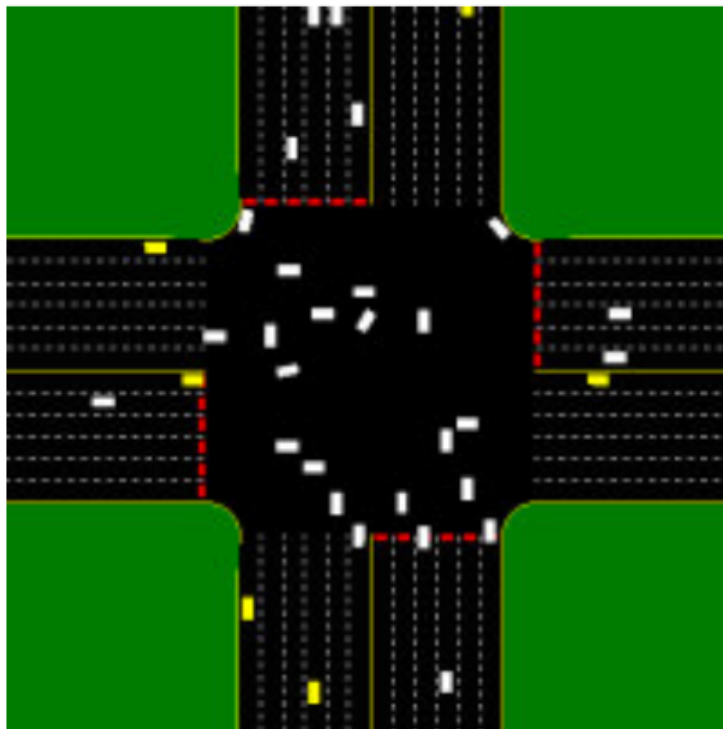


Figura 11 Imagem do simulador AIM em funcionamento[54].

Nesta proposta, a zona do cruzamento é dividida em sub-áreas e o controlo da passagem dos automóveis é feita, ao apenas ser permitido um veículo ocupar cada uma dessas áreas da zona do cruzamento em qualquer instante, o que assegura que não ocorrem colisões durante a travessia dos vários veículos.

Toda a troca de mensagens entre os veículos e o sistema de controlo e vice-versa, é feita através de comunicações digitais sem fios diretamente entre os intervenientes, o controlador do cruzamento e os veículos, sem ser proposto nenhum tipo de ligação física específica para esse efeito. No simulador as mensagens são trocadas com recurso a objetos do tipo *Queue*, cada objeto que simula um veículo tal como o objeto que simula o controlador do cruzamento tem dois, um para envio de mensagens e um para receção. As mensagens são transladadas por execução de métodos de um outro objeto, que pode aceder tanto aos objetos que simulam os veículos como ao objeto que simula o controlador do cruzamento, e por sua vez retira as mensagens do *Queue* de envio dos vários veículos para o *Queue* de receção do controlador e vice-versa. Desta forma cada veículo apenas tem acesso às mensagens destinadas a si, não sendo possível o acesso às suas mensagens por parte dos outros veículos.

Todas as mensagens trocadas apresentam sempre três campos de cabeçalho: um de 8 bits a indicar o tipo de mensagem, um de 32 bits indicando o número identificativo do veículo e um de 32 bits com o número identificativo do controlador do cruzamento. Dependendo do tipo de mensagem, os dados do corpo da mensagem, que estão presentes a seguir ao cabeçalho, podem variar em número e tamanho.

Quando este tipo de controlo está em funcionamento, cada veículo em aproximação do cruzamento, tem de tomar a iniciativa de comunicar ao sistema de controlo do cruzamento a sua chegada. Nesta mensagem do tipo *Request*, enviada do veículo para o sistema de controlo, cujos campos do corpo da mensagem estão especificados na tabela 1, contém dados referentes às características do veículo, necessários para o sistema controlador do cruzamento poder simular o deslocamento do veículo, com o objetivo de prever o seu posicionamento dentro do cruzamento ao longo do tempo, e são também enviados dados de uma ou mais nomeadas propostas. As propostas indicam entre outros dados, possíveis instantes de entrada na zona do cruzamento. Este instante de entrada é

necessário ser enviado, porque sem a velocidade atual do veículo e a distância à qual este se encontra do cruzamento, que são dados não fornecidos em nenhum dos outros campos da mensagem, seria impossível ao controlador saber quando é que o veículo vai entrar, ou pode entrar no cruzamento. Com este dado é fornecido pelo menos um ponto de partida ao controlador, para poder efetuar a simulação.

**Tabela 1** Corpo das mensagens do tipo *Request*, enviadas do veículo para o controlador da interseção.

Tamanho (bits)	Tipo de dado	Função
32	Número único, identificativo da mensagem de pedido	Distinguir diferentes mensagens deste tipo do mesmo veículo para o mesmo controlador
9*64	Caraterísticas do veículo	Permitem que o controlador preveja o movimento do veículo
(2*32+3*64) por proposta	Propostas de entrada	O veículo indica possíveis condições de entrada no cruzamento

As 9 caraterísticas do veículo enviadas nas mensagens do tipo *Request* são as seguintes:

- aceleração máxima no sentido do movimento ( $m/s^2$ ) – 64 bits;
- aceleração máxima no sentido inverso ao movimento ( $m/s^2$ ) – 64 bits;
- velocidade máxima em marcha-atrás ( $m/s$ ) – 64 bits;
- comprimento do veículo (m) – 64 bits;
- largura do veículo (m) – 64 bits;
- distância da frente do veículo até ao eixo da frente (m) – 64 bits;
- distância da frente do veículo até ao eixo da trás (m) – 64 bits;
- ângulo máximo, alcançável pelas rodas da frente (rad) – 64 bits;
- variação máxima do ângulo das rodas da frente (rad/s) - 64 bits.

Cada proposta de entrada enviada pelo veículo nas mensagens do tipo *Request* contém os seguintes dados:

- via de trânsito da qual sai para a zona do cruzamento – 32 bits;
- via de trânsito na qual entra, depois de sair da zona do cruzamento – 32 bits;

- instante de entrada prevista na zona do cruzamento – 64 bits;
- velocidade prevista de entrada na zona do cruzamento (m/s) – 64 bits;
- velocidade máxima alcançável dado o percurso dentro da zona do cruzamento (m/s) – 64 bits.

Se os resultados da simulação efetuada por parte do sistema controlador do cruzamento não mostrarem concorrência com as reservas já efetuadas para outros veículos, o veículo irá receber uma mensagem do tipo *Confirm*, que indica a aceitação do seu pedido, o número indicativo da sua reserva e dados a definirem condições de movimento a exercer, como se indica na tabela 2.

O último campo nas mensagens do tipo *Confirm*, com o perfil de aceleração contém um conjunto de pares de instante de tempo e aceleração em  $m/s^2$ , ambos dados de 64 bits. O instante de tempo indica ao veículo quando deve começar a aplicar a aceleração indicada, sendo que esta aceleração deve ser terminada aquando do instante de tempo seguinte.

O pedido efetuado por um veículo pode ser rejeitado, com o envio de uma mensagem do tipo *Reject*, cujos campos de corpo da mensagem são os indicados na tabela 3. Esta mensagem é enviada para o veículo se:

- os resultados da simulação preverem conflitos com alguma reserva já feita numa das sub-áreas do cruzamento;
- um outro pedido do mesmo veículo já tiver sido aceite e conseqüentemente já estar feita uma reserva para ele;
- o tempo de chegada proposto pelo veículo for demasiado no futuro, porque o controlador apenas aceita pedidos cujo instante de entrada no cruzamento seja no máximo 10 segundos depois do pedido ser recebido;
- o tempo de entrada no cruzamento proposto, corresponder a um instante já passado;
- um pedido anterior tiver sido recusado, e um novo for feito antes de ter passado o tempo de espera, indicado na resposta de rejeição anterior.

No caso de ter sido aceite um pedido com uma mensagem do tipo *Confirm* a ser enviada para o veículo, este pode por qualquer razão, anular a reserva com o envio de uma

mensagem do tipo *Cancel*, a ser enviada para o controlador do cruzamento. Esta mensagem apenas contém um campo de 32 bits no corpo, especificando o número identificativo da reserva que se pretende cancelar, não estando no entanto definida nenhuma mensagem de resposta por parte do controlador do cruzamento para confirmar o anulamento da reserva.

**Tabela 2** Corpo das mensagens do tipo *Confirm*, enviadas do controlador para o veículo.

<b>Tamanho (bits)</b>	<b>Tipo de dado</b>	<b>Função</b>
32 bits	Número da reserva atribuída ao veículo	Permite a distinção de entre as outras reservas
32 bits	Número único, identificativo da mensagem de pedido	Para o veículo distinguir qual dos seus pedidos foi aceite
64 bits	Instante no qual o veículo deve entrar no cruzamento	Valor que o veículo deve respeitar ao exercer o movimento
64 bits	Erro permitido em segundos antes do tempo de chegada	Indica quanto tempo antes do instante de entrada o veículo pode chegar em segurança
64 bits	Erro permitido em segundos depois do tempo de chegada	Indica quanto tempo depois do instante de entrada o veículo pode chegar em segurança
64 bits	Velocidade de entrada em metros por segundo	Indica ao veículo qual a velocidade com que deve entrar na zona do cruzamento
32 bits	Via de trânsito para entrada na zona do cruzamento	Indica ao veículo qual a via de trânsito na qual o veículo deve estar quando entra no cruzamento
32 bits	Via de trânsito para saída da zona do cruzamento	Indica ao veículo qual a via de trânsito na qual o veículo deve estar quando sair do cruzamento
64 bits	Distância em metros ainda regulada após a saída do cruzamento	O veículo deve reportar ao controlador quando passar esta zona
(2*64) por par	Perfil de aceleração	Indica ao veículo o tipo de aceleração a exercer durante a travessia do cruzamento. Se este campo for nulo, indica que o veículo deve prosseguir à sua velocidade máxima ou ao limite de velocidade, a que for menor das duas.

**Tabela 3** Corpo das mensagens do tipo *Reject*, enviadas do controlador para o veículo.

<b>Tamanho (bits)</b>	<b>Tipo de dado</b>	<b>Função</b>
32 bits	Número único, identificativo da mensagem de pedido	Para o veículo distinguir qual dos seus pedidos foi rejeitado
64 bits	Próximo instante de comunicação	Indica ao veículo a partir de que instante é que pode efetuar um novo pedido
8 bits	Razão de rejeição	Indica ao veículo porque é que o seu pedido foi rejeitado

Os veículos neste tipo de controlo, não recebem permissões por forma de tempos de utilização para as sub-áreas, apesar de o sistema controlador definir um tempo de utilização para cada uma das várias sub-áreas e ser assim que assegura a não colisão durante as travessias dos vários veículos. Em vez disso os veículos recebem valores de aceleração e o instante a partir do qual devem começar a aplicar essa aceleração, que de acordo com a simulação efetuada por parte do controlador, irão fazer com que o veículo ocupe cada sub-área do cruzamento durante o tempo reservado pelo controlador.

Assim que o veículo cumprir o movimento definido pelo perfil de aceleração e tiver saído da zona do cruzamento, envia uma mensagem ao controlador do cruzamento a confirmar que a travessia pelo cruzamento foi feita. Esta mensagem é do tipo *Done* e contém um campo de 32 bits no seu corpo com o número da sua reserva.

Depois de sair da zona de cruzamento, o veículo entra na denominada *Admission Control Zone*. Existe uma para cada via de trânsito após saída do cruzamento e a sua finalidade é assegurar que as condições de trânsito, após a saída da zona do cruzamento, permitem a entrada em segurança do veículo na via de trânsito depois de terminar a travessia. Caso se encontrassem veículos em marcha lenta ou parados à entrada da via de trânsito, o veículo seria obrigado a atrasar ou a parar o movimento para evitar colisão, o que levaria este a ficar mais tempo dentro da zona de cruzamento, e em consequência exceder o tempo de utilização reservado para pelo menos uma das sub-áreas da zona do cruzamento, o que poderia levar a colisões com outros veículos ainda em travessia dentro do cruzamento. De igual forma se o veículo saísse da zona de cruzamento, para não exceder o tempo de

utilização a si reservado, entraria em colisão com o veículo à sua frente na via de trânsito.

Com a existência desta zona e tendo em conta que todos os veículos que ingressem nela serão sempre provenientes do cruzamento, o controlador consegue saber o espaço livre na zona e calcular se cada veículo tem espaço para lá entrar, após a saída programada do cruzamento. Para o controlador obter os dados de ocupação na *Admission Control Zone*, é necessário os veículos lhe transmitirem informação, por forma de uma mensagem do tipo *Away*, que contém no corpo um campo de 32 bits com o número de reserva. A mensagem indica ao sistema controlador, que o veículo que a enviou, já abandonou a *Admission Control Zone*. Tendo esta zona um comprimento fixo e sabendo o controlador quais os veículos que ainda se encontram nela, calcula o espaço disponível subtraindo ao comprimento da zona, os comprimentos dos veículos nela presentes e assim pode confirmar se um novo veículo cabe ou não.

Para interligação do veículo autónomo denominado “*Marvin*” e o simulador[55], as mensagens são trocadas utilizando o protocolo de camada de transporte UDP. Para além dos cabeçalhos inerentes a este protocolo de transporte, foram depois acrescentados alguns campos. Foram antes do cabeçalho das mensagens, introduzidos três campos adicionais, consistindo estes de: o instante de envio da mensagem, o tipo de mensagem e um campo para verificação de erros. O instante de envio da mensagem é um campo com 32 bits, a indicar quando a mensagem foi enviada de acordo com o relógio interno do remetente, que tem como intuito permitir à entidade recetora determinar se recebe as mensagens de acordo com a ordem de envio. Devido à sua função de ordenamento, o tempo de envio pode ser um valor relativo e assim não requer sincronismo dos relógios. O segundo campo acrescentado, com 8 bits de dimensão, indica o tipo de mensagem por existirem outros tipos de mensagem a trocar entre o veículo real e o simulador, para além dos definidos no protocolo, como por exemplo quando o veículo real precisa de saber a que distância se encontra do veículo virtual à sua frente. O último campo é um campo de verificação de erro de 32 bits, introduzido para o recetor poder verificar se o pacote contém erros introduzidos durante a transmissão. De acordo com o indicado no código do simulador, este campo foi necessário por os pacotes UDP não implementarem mecanismos de deteção de erros, o que não está de acordo com a especificação do protocolo[56], que de fato possui um campo de 16 bits para deteção de erros nos pacotes.

Para além desta discrepância técnica não foi implementado nem o método para cálculo nem o método para a verificação deste último campo.

Nas mensagens trocadas entre o simulador e o veículo real, que contém no corpo campos com um instante de tempo, o instante de tempo é substituído por a diferença entre esse instante futuro e o instante de tempo atual, indicando portanto quantos segundos no futuro se encontra esse instante de tempo. Esta alteração do instante de tempo absoluto, para um instante de tempo relativo, permite que o recetor consiga precisar o instante de tempo, indicado pela entidade emissora independentemente do desfasamento entre os relógios dos dois e eliminando assim a necessidade de sincronismo entre os mesmos.

Para validação da adequação da metodologia de controlo proposta, foi definido como fator principal para medição da qualidade do controlo de tráfego, o tempo de atraso médio cumprido pelos veículos no simulador, sendo este tempo de atraso definido como a quantidade de tempo acrescido, que o veículo demora a efetuar a travessia pelo cruzamento, em relação ao tempo que demoraria se atravessasse o cruzamento sempre à velocidade máxima permitida.

O tempo de travessia é medido para cada veículo, sendo posteriormente calculado o atraso acrescido que sofreu e no final da simulação é obtido o atraso médio para todos os veículos. De todos os atrasos é determinado o maior atraso medido e é também tido em conta como fator de qualidade.

Em simulação foram implementadas as técnicas de controlo de tráfego, com sinais de stop e com semáforos, testadas para volumes de tráfego entre 0 veículos por segundo e 1 veículos por segundo, e os seus resultados foram comparados com os obtidos para as mesmas condições de simulação, mas com o novo tipo de controlo proposto.

Utilizando semáforos luminosos foram efetuadas três simulações para tempos de ciclo diferentes, tendo o ciclo uma duração de 10 segundos para uma simulação, noutra 30 segundos e noutra 50 segundos. Efetuando comparação gráfica para os vários tempos de ciclo simulados, chega-se à conclusão de que o atraso médio é menor para volumes de tráfego pequenos, quando o tempo de ciclo tem uma duração de 10 segundos e o atraso médio é mais pequeno para volumes de tráfego maiores, quando o tempo de ciclo é de 50

segundos; o que pode indicar que para ser obtido um atraso pequeno, este deverá ser diretamente proporcional ao volume de tráfego. Foi também testado o tipo de controlo proposto para as mesmas condições de volume de tráfego, com a zona de cruzamento dividida em uma e em duas sub-áreas. Em representação simultânea dos gráficos das simulações com semáforos luminosos e com o tipo de controlo proposto, com o volume de tráfego de 0 veículos por segundo a 1 veículos por segundo no eixo das abcissas, e o tempo de atraso médio de 0 segundos a 100 segundos no eixo das ordenadas, é praticamente indistinguível o gráfico da simulação com duas sub-áreas do eixo das abcissas, por o atraso ser de tal ordem reduzido (com máximo menor que 0,1 segundos para 1 veículos por segundo) e mesmo para a simulação com apenas uma sub-área, o gráfico é apenas distinguível para volumes de tráfego maiores que 0,7 veículos por segundo. Tanto para volumes de tráfego baixo como para volumes de tráfego elevado, o tipo de controlo proposto introduz atrasos muito mais reduzidos, em comparação com o controlo com semáforos luminosos com tempo de ciclo fixo.

Efetuada mais simulações com o tipo de controlo proposto, mas para diferentes números de sub-áreas, pelas quais a zona de cruzamento é dividido, foi também provado que com o aumento do número de sub-áreas, o atraso reduz gradualmente apesar de, ao incrementar de um número par para um número ímpar, tanto o atraso médio como o atraso máximo aumentem.

Em simulação foi testado, para um cruzamento de duas vias públicas cada uma com três vias de trânsito em cada sentido, um controlo de tráfego baseado no controlo implementado quando um cruzamento apenas possui sinais de stop, havendo no entanto para o caso simulado, também um sistema de controlo com o qual os veículos comunicam e que lhes indica quando podem iniciar a travessia. Tal como no controlo com sinais de stop, os veículos são forçados a parar o movimento antes de entrarem na zona de interceção, mas depois disso podem iniciar a travessia se a zona estiver livre. Os resultados foram comparados com os resultados para o mesmo cruzamento, mas implementando o tipo de controlo proposto com um total de 24 sub-áreas. Na simulação com sinais de stop os resultados não foram tão bons, e por ambos os tipos de controlo requererem o mesmo tipo de tecnologia provou ser de pouca utilidade.

### 2.3.3.2. VIRTUAL TRAFFIC LIGHTS (VTL)

Existe uma proposta de controlador, que é chamado de VTL[48], que pretende poder ser utilizado para melhorar a eficiência das interseções com semáforos pré-temporizados, com semáforos atuados e principalmente das interseções sem controlo. É um tipo de controlo implementado unicamente pelos veículos, sem recurso a infraestrutura de comunicações nas mediações da interseção, sendo por isso um sistema de controlo de trânsito auto-organizado, no qual são os próprios veículo em fila de espera à entrada da interseção que fazem as tomadas de decisão quanto ao direito de passagem pela interseção. Todos os veículos têm as mesmas capacidades para determinar a ordem de passagem, mas apenas um é que a determina e transmite a sua decisão aos outros. Eventualmente esse veículo abandona a interseção e passa a ser outro veículo a controlar a zona de interseção[48][57].

Os veículos possuem todos um recetor de *Global Positioning System* (GPS) que permita determinar a posição do veículo, necessariamente com precisão a nível de faixas, e uma unidade de dados, que guarde essa informação de forma atualizada. A unidade de dados do veículo, tem acesso a informações acerca das condições de trânsito perto da sua localização, nomeadamente sobre os veículos presentes na sua periferia, que é necessária para o encaminhamento de mensagens, e também informações sobre quando se está a aproximar de interseções. Quando numa interseção sob controlo VTL, um monitor, interligado à unidade de dados, irá apresentar ao condutor qual o estado atual do semáforo virtual para a sua fase.

Os veículos comunicam entre si formando uma rede *ad hoc* e utilizando equipamentos que baseados no *standard* norte-americano DSRC[58]. Dentro de países da União Europeia os veículos poderão comunicar de forma quase idêntica utilizando o *standard* ITS-G5, que utiliza canais numa gama de frequências quase igual.

Um dos aspetos das interseções com semáforos atuados é que, os sensores de deteção de veículos nas várias entradas têm um alcance limitado, por estarem instalados de forma estacionária e/ou só poderem detetar veículos dentro de uma certa área na sua periferia, sendo também alguns sensores só capazes de medir em linha de vista, como câmaras de vídeo, que falham se houverem veículos tapados por outros à sua frente ficando

incógnitos para o sistema de controlo. No caso de VTL, os veículos anunciam a sua presença, ao sistema de controlo, quando se aproximam da interseção, por comunicação sem fios, melhorando a sua própria deteção não só pela perspectiva de maior alcance como, se estiverem fora de alcance, a sua mensagem de presença como vai ser retransmitida por veículos consecutivos até ao destino, permite a sua deteção mesmo fora da linha de vista[59]. Conseguem também introduzir dados auxiliares como a sua velocidade, aceleração e dimensões do veículo, que podem ser utilizadas pelo sistema de controlo, para um melhor cálculo da duração do tempo de verde de cada fase.

Todos os veículos necessitam de possuir um mapa digital das estradas por onde circulam, presente na unidade de dados, para identificação de onde se encontram as interseções, necessariamente sem sistema de controlo, onde os veículo possam implementar VTL. Uma vez chegado à entrada da interseção, a unidade de dados procura a presença de um controlador VTL já em funcionamento na interseção à sua frente. Se esse existir, o veículo limita-se a interpretar qual das fases tem a permissão para uso da interseção, ao ler as mensagens transmitidas pelo veículo controlador e a apresentar ao condutor no monitor presente no veículo, que pode estar incorporado no veículo ou pode ser um dispositivo móvel como um *smartphone*[58], qual o estado da sua fase, podendo atravessar a interseção se estiver sinal verde. No caso de não haver nenhum controlador VTL, a unidade de dados procura de entre os veículos presentes nas suas mediações e que vão entrar na interseção, se existe possibilidade de conflitos entre si. Se os veículos forem todos de fases compatíveis, não haverão conflitos eminentes e os veículos prosseguirão todos com luz verde. Se houver algum conflito de trânsito, por existirem veículos a entrar para fases com percursos cruzantes no interior da interseção, como é exemplificado na figura 12, é necessário introduzir um controlador VTL para a interseção.

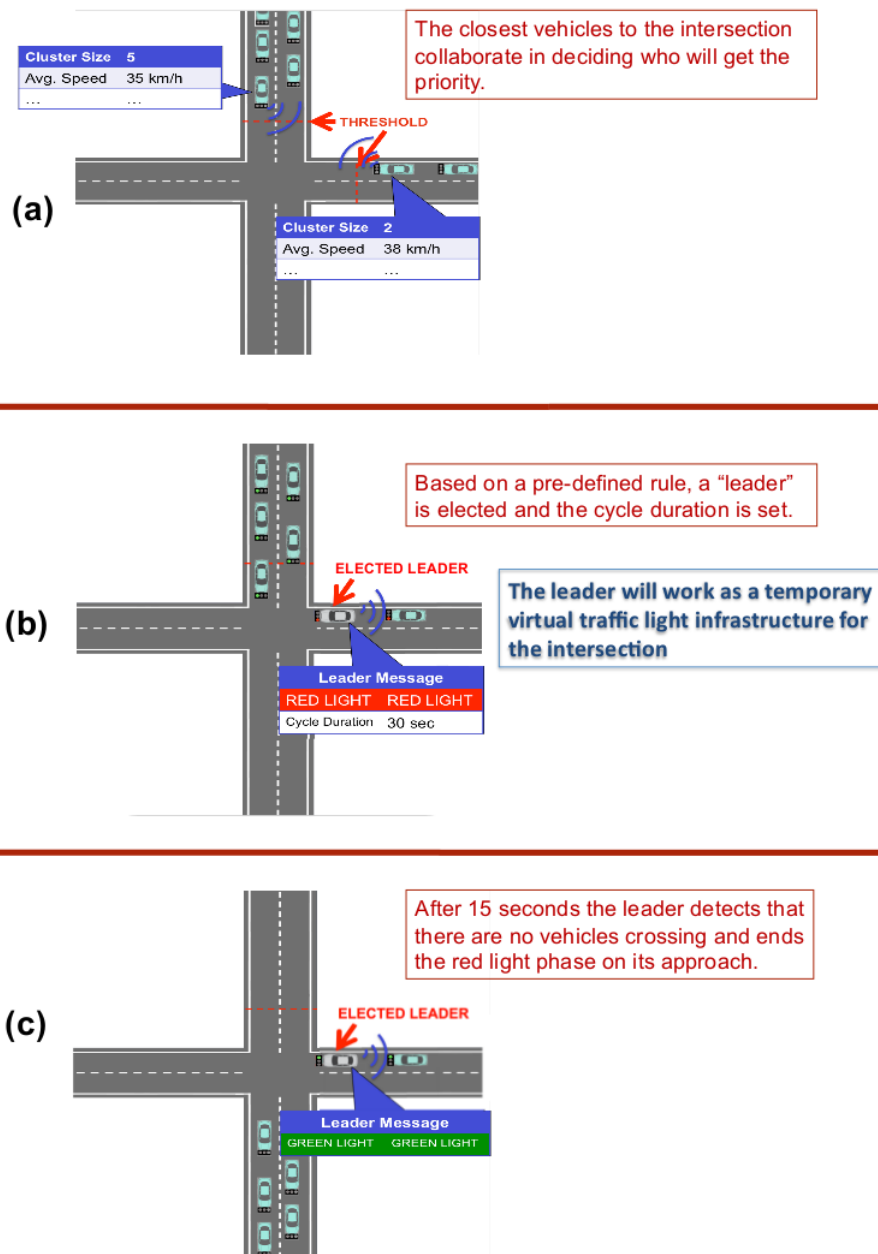


Figura 12 Exemplo ilustrativo do princípio de funcionamento do VTL[48].

O controlador é sempre um dos veículos posicionados mais próximo do centro da interseção e tem de ser eleito de entre todos os outros veículos a quererem entrar na interseção. Uma vez eleito o líder, este irá posicionar-se o mais perto do centro da interseção possível, para melhorar a transmissão omni-direcional das suas mensagens, que irão transmitir as permissões de utilização das diferentes fases aos outros veículos todos. A mensagem enviada aos outros veículos é sempre idêntica, enquanto a fase com permissão de uso da interseção for a mesma, quando deixarem de haver veículos à espera de entrar para essa fase ou ao fim de um tempo de verde definido pelo líder, o líder altera

a mensagem para dar permissão de uso à fase seguinte. Quando a permissão de uso chegar à fase na qual se insere o veículo líder, este antes de avançar pela interseção elege um novo líder, para tomar o seu lugar, de entre os veículos à entrada de uma das outras fases, ainda à espera de permissão. No caso de não haverem veículos em fases incompatíveis o VTL é extinto.

Em simulações feitas para a cidade do Porto, na qual 328 das 2000 interseções possuem semáforos pré-temporizados e as restantes não apresentam sistemas de controlo além de sinais de prioridade, em comparação com uma simulação na qual os semáforos não existiam e permitiriam a implementação de VTL em todas as interseções da cidade, o trânsito a nível da cidade, apresenta benefícios entre cerca de 20%, para condições de trânsito de baixa densidade, não sendo o benefício maior por apenas 16% das interseções utilizarem semáforos, e mais de 60% para elevada densidade de trânsito.

# 3. PROPOSTA DE CONTROLADOR PARA VEÍCULOS AUTÓNOMOS

Neste capítulo apresentam-se em primeiro lugar, as razões que levam os veículos a sofrer tempos de atraso antes e durante a travessia de uma interseção, causadas pelo tipo de funcionamento de sistemas de controlo de trânsito atuais.

Depois é idealizado o sistema de controlo, de forma a serem minimizadas as causas dos tempos de atraso, identificando os requisitos para que o sistema de controlo, possa causar tempos de atraso inferiores e nunca obrigue os veículos a cessarem o seu movimento por completo.

No sub-capítulo 3.3. são desenvolvidas as definições matemáticas, que são imprescindíveis para o funcionamento do sistema de controlo, como por exemplo para prever se dois veículos irão colidir, ao continuarem o seu movimento de forma inalterada, e para cálculo de qual o tempo de atraso mínimo, que permite evitar essa colisão.

No fim deste capítulo ainda se expõe as vantagens e desvantagens teóricas, do sistema que foi proposto.

### 3.1. CAUSAS DE TEMPOS DE ATRASO

Em todos os sistemas de controlo apresentados até agora, o princípio de funcionamento para evitar possíveis colisões, durante a travessia da interseção é, dar apenas permissão de entrada e passagem ao veículo, quando os caminhos concorrentes não estiverem a ser utilizados por nenhum outro. Quando esse não for o caso, o veículo a entrar tem de esperar antes da entrada da interseção até que essa condicionante seja levantada, tendo a velocidade de ser mais reduzida quanto mais próximo o veículo se encontrar da entrada da interseção, tendo mesmo, de forma algo frequente, o veículo de cessar o movimento e ficar parado.

Sendo a zona de interseção a área mais concorrida para utilização pelo trânsito, será importante que quando está a ser utilizada, que o seu uso seja o mais aproveitado possível. Caso contrário será feito um desaproveitamento que irá causar prejuízo a todos os veículos ainda em espera, que têm de esperar, não só devido à concorrência para uso a que a interseção está sujeita, mas também terão de esperar pelo tempo perdido (*Start-up lost time*)[46] durante o qual a interseção pode estar a ser utilizada mas não o é, ou pelo menos está a ser utilizada a uma fração do que podia, afetando diretamente a capacidade da interseção[46]. Será o exemplo, no caso de uma interseção controlada por um semáforo pré-temporizado em que, a fase que tem permissão de uso da interseção, não possui veículos em espera ou os que lá estão fazem a travessia a uma velocidade lenta, atravessando pela interseção por unidade de tempo, menos veículos do que atravessariam se se estivessem a deslocar a uma velocidade regular.

Se um veículo tiver diminuído a sua velocidade antes da entrada da interseção, quando lhe for cedida permissão de entrada, irá atravessar, pelo menos o início da interseção a acelerar, até recuperar a sua velocidade de cruzeiro. Enquanto recupera o momento linear que tinha perdido durante a espera, o veículo demora mais tempo a atravessar a interseção, levando a que menos veículos da sua fase, possam entrar na interseção antes

da permissão de uso ser alterada para outra fase, aumentando o tempo de espera dos outros no processo.

## 3.2. DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA

O sistema de controlo que é proposto deve impedir atrasos, que forcem os veículos à entrada da interseção a efetuar paragens e a consequente arranque de posição estacionária, pelo que neste, nunca podem existir filas de espera à entrada da interseção. Uma vez que todos os tempos de atraso sofridos pelos veículos enquanto em filas de espera, ocorrem quando o número de veículos a querer utilizar a interseção (*Demand*), excede o número máximo capaz de atravessar a interseção (*Capacity*), no mesmo intervalo de tempo[60], passa desde logo, a ser necessário quantificar a capacidade da interseção, para se saber quantos veículos por unidade de tempo esta pode servir. Por isso nas entradas para as vias, que se cruzam na interseção, tem de existir um limite de admissão de volume de trânsito, que garanta uma procura sempre abaixo da capacidade de serviço da interseção. Para além disto o sistema de controlo proposto necessita de servir as entradas de forma a priorizar o veículo mais próximo da interseção, de forma *First In First Out* (FIFO), para garantir que venham de qual entrada vierem os veículos, nunca chegam à entrada da interseção, ainda sem permissão de entrada. Ficando assim também determinado que o controlo necessita de ser orientado ao veículo.

Mesmo com a garantia de não ocorrência de formação de filas de espera, o sistema de controlo terá de introduzir atraso ao instante de entrada de veículos, quando o sistema detetar possíveis colisões. Por exemplo numa situação com apenas dois veículos a quererem utilizar a interseção, estando ambos em vias concorrentes, à mesma distância do ponto de conflito das duas vias e a deslocarem-se à mesma velocidade, irão colidir uma vez chegados ao ponto de colisão. O sistema de controlo terá de transmitir a um dos veículos, instruções de alteração de velocidade, para que as travessias não utilizem o ponto de colisão ao mesmo tempo. Este atraso temporal é necessariamente aplicado antes da chegada ao ponto de colisão, tendo de ser conseguido com uma redução de velocidade, que nunca force o veículo a parar.

É importante que durante a travessia da interseção a velocidade do veículo não esteja reduzida, para não passar tempo desnecessário dentro da interseção, sendo preciso para esse fim, que a velocidade aquando da entrada na interseção, seja igual à velocidade que o veículo praticava antes de aplicar o atraso temporal. Deste modo, posterior à desaceleração que vai causar o atraso temporal, tem de ser aplicada uma aceleração que retorne a velocidade ao valor original, ainda antes da entrada do veículo na interseção, para que a redução de velocidade não se manifeste quando o veículo entrar e atravessar a interseção.

O sistema de controlo proposto não poderá ser implementado por agentes humanos. O fato de os cálculos necessários para determinação do tempo de atraso, a ser implementado pelo veículo antes da sua chegada à interseção, terem de ser feitos em pouco tempo e a precisão matemática do movimento a realizar durante a travagem e posterior aceleração, impossibilitam condutores humanos tanto de decidirem o controlo como de praticarem a deslocação até à interseção. O sistema aqui proposto só poderá ser utilizado por veículos autónomos e o controlo da interseção terá de ser feito com recurso a equipamento computacional.

Neste caso como a interseção está a ser utilizada por veículos autónomos, será possível serem os mesmos a implementar o sistema de controlo ou pode haver um conjunto de equipamentos, parecidos com os que controlam semáforos, a implementar o sistema de controlo proposto. São apresentadas duas listas que identifiquem os requisitos para ambos os casos e que ajudem a decidir qual a adoção a fazer.

Se o sistema de controlo aqui proposto for implementado pelos sistemas computacionais presentes nos veículos autónomos, é necessário que:

- os veículos tenham noção de onde se encontram, nomeadamente a sua distância até à entrada da interseção, para se poder calcular quando vão estar sobre os pontos de colisão. Necessitando de ferramentas para posicionamento, com recurso a sensores de medição de distância, que consigam garantir a medição com a precisão necessária e precisando também de existir algum objeto distinto e identificável à entrada da interseção, que possa servir de alvo durante a medição, independentemente das condições meteorológicas. Em alternativa o veículo pode

recorrer à aquisição de dados de sistemas externos para determinar a sua posição, como um sistema de posicionamento global por satélite, no entanto a localização dos pontos de colisão da interseção terão de estar na posse do veículo, para poder calcular a distância a que se encontra deles;

- os veículos tenham acesso à posição dos outros veículos, de igual forma, para se calcular quando vão estar sobre os pontos de colisão. Esta informação apenas será obtida com recurso a algum sistema externo, por exemplo como é feito em VTL por anúncio transmitido pelos outros veículos, especialmente se houverem bloqueios na linha de vista;
- as decisões de controlo sejam tomadas pelo veículo, tal como em VTL. Não sendo um veículo autónomo um sistema de controlo dedicado, a hipótese de o algoritmo de controlo ser alterado é maior, quer pela complexidade do sistema, quer por ser um sistema móvel, haver maior facilidade de adulteração maliciosa;
- a transmissão da decisão seja entregue a cada veículo individualmente. Requerendo a formação de uma rede para transmissão definida pelos veículos, que provavelmente já estará a ser utilizada para outras funções inerentes às necessidades autónomas dos veículos.

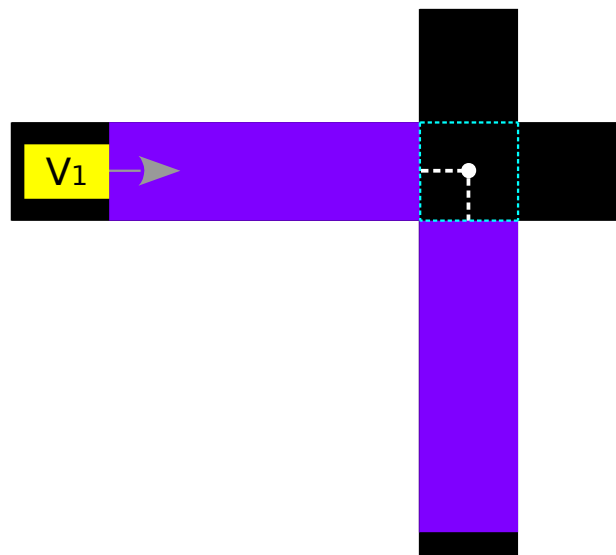
No caso de o sistema de controlo proposto ser implementado por uma infraestrutura, perto da interseção, exige que:

- a infraestrutura detete os veículos quando se aproximam da interseção. Tendo algum sensor que detete a presença de veículos a uma dada distância da interseção, o sistema consegue obter o instante a que o veículo passa pelo sensor e sabendo também a velocidade (possivelmente com o mesmo sensor), consegue calcular quando vai chegar ao ponto de colisão;
- as decisões de controlo sejam tomadas unicamente pela infraestrutura. Sendo o propósito principal do *hardware* da infraestrutura, a aplicação de controlo à interseção, é mais fácil garantir fiabilidade por parte do *hardware* e por ficar instalado *in situ*, também proporciona melhor condição de proteção contra eventual adulteração;
- a transmissão da decisão seja entregue a cada veículo individualmente. Será possível que a transmissão das instruções de alteração de velocidade, seja feita

sem fios e de forma direcional, cobrindo apenas as mediações da zona onde se encontra o sensor de presença, de forma a apenas o veículo a passar nele receber a transmissão.

Após comparação das duas possibilidades, é decidido que o sistema será implementado por uma infraestrutura com: sensores de presença, equipamento de comunicação de curta distância e *hardware* que implemente o algoritmo de controlo, todos instalados *in situ*. Restringindo a deteção de e a comunicação com os veículos a uma área da faixa de trânsito em que se encontram, reduzindo erros de posicionamento e falhas de comunicação. E podendo assegurar *hardware* dedicado à implementação do controlo, com maior proteção física.

Vão existir várias áreas, com características diferentes, por onde um veículo passa antes de poder entrar e atravessar a interseção. No início existe uma secção livre, na qual o veículo ainda não está sujeito a medidas de controlo e apenas é necessário assegurar que o volume de trânsito é inferior ao máximo admissível pela interseção antes das entradas, obrigando uma distância de separação mínima entre os veículos. Esta secção é a zona a preto na qual se encontra o veículo amarelo “V1” na figura 13, enquanto se desloca em direção à interseção.



**Figura 13** Descrição gráfica das diferentes secções da interseção e pontos de interesse quando sujeita ao sistema de controlo proposto.

No fim desta secção inicial, encontra-se um conjunto de equipamentos, posicionados do

lado de fora da via, instalados em suportes acima da via e acima dos veículos e/ou até eventualmente sob a via, por debaixo do pavimento, com objetivos de: detetarem veículos que queiram utilizar a interseção, ainda a uma distância suficiente da interseção para o veículo poder aplicar atraso ao seu movimento, se for necessário evitar uma colisão, sem obrigar a uma desaceleração demasiado acentuada; transmitir ao veículo de forma sem fios qual tem de ser o *modus operandi* da sua travessia, até à interseção. O conjunto destes equipamentos será de agora em diante denominado de posto de controlo e referindo à figura 13 está posicionado perto na linha entre a secção inicial e a secção roxa, de forma a permitir a deteção da presença do veículo “V1”, o processamento da sua travessia de modo a evitar possíveis colisões e o envio da informação necessária ao veículo, antes deste entrar na zona roxa.

A secção roxa será denominada de zona de controlo e um veículo entra nesta zona, assim que a sua extremidade da frente, alcançar o início da zona de controlo, como está ilustrado na figura 13 o instante em que o veículo “V1” entra na zona de controlo. É nesta zona, que o veículo segue as instruções dadas pelo sistema de controlo, primeiro reduzindo a velocidade e depois voltando a acelerar, até atingir a velocidade que tinha quando passou pelo posto de controlo. Uma vez alcançado o fim da zona de controlo, o veículo já está de novo a deslocar-se à velocidade de cruzeiro e está pronto a entrar na zona de interseção.

O fim da zona de controlo não precisa de coincidir com o início da zona de interseção. Pode haver uma secção entre as duas, durante a qual o veículo já atrasou o seu movimento e pode prosseguir até à interseção sem risco de vir a ter colisões, desde que se desloque à velocidade de cruzeiro. No entanto não foram encontradas vantagens na existência deste espaço, entre o fim da zona de controlo e o início da zona de interseção, pelo que será não existente.

Uma vez que a extremidade da frente de um veículo alcance o início da zona de interseção (área delimitada por linhas tracejadas a ciano na figura 13), o veículo passa a estar dentro dela e tem então de prosseguir sempre à velocidade de cruzeiro, por forma a ser calculável a sua posição ao longo do tempo, especificamente quando estiver sobre o ponto de colisão (pequeno círculo branco no centro da zona de interseção na figura 13),

algo essencial para a determinação de colisões, e também para não demorar mais tempo a atravessar a interseção do que é preciso.

Depois de o veículo transpor o fim da zona de interseção, com a sua extremidade traseira, passa a estar fora dela e entra na zona de saída. Devido às restrições de volume de trânsito na via de entrada, o volume de trânsito à saída da interseção está também automaticamente limitado; no entanto se houver algum incidente depois da interseção, corre-se o risco de aparecimento de trânsito lento, que pode não garantir a segurança do veículo após a saída da interseção, uma vez que o sistema de controlo não deteta as condições de trânsito na saída. A única maneira de garantir a saída em segurança será com a existência de faixas de trânsito extra na via de saída, que os veículos possam utilizar quando aquela em que seguiam estiver obstruída.

### 3.3. EQUAÇÕES

Nesta secção são apresentadas definições matemáticas relacionadas com o sistema de controlo e o movimento dos veículos autónomos, que utilizam a interseção controlada pelo sistema de controlo. Para que isso seja possível é criada a seguinte tabela 4 onde são definidas as variáveis utilizadas nas equações e o seu respetivo significado.

**Tabela 4** Definição de variáveis utilizadas.

Variável	Descrição significativa
$D$	Comprimento da zona de controlo
$s_x$	Distância a percorrer, pelo veículo $x$ , desde a entrada da interseção até ao ponto de colisão
$di$	Comprimento da zona de interseção
$MS$	Margem de segurança
$ds_{min}$	Distância de separação mínima entre dois veículos consecutivos na mesma faixa
$v_{i_x}$	Velocidade de cruzeiro ou inicial do veículo $x$

$t_{\phi_x}$	Instante em que o veículo $x$ dá entrada na zona de controlo
$t_x$	Instante em que o veículo $x$ dá entrada na zona de interseção
$l_x$	Comprimento do veículo $x$
$l_{máx}$	Comprimento máximo de veículo permitido na interseção
$t_{a_x}$	Tempo de atraso do veículo $x$
$\tilde{v}_x$	Velocidade média do veículo $x$ durante a travessia da zona de controlo
$v_{min_x}$	Velocidade mínima alcançada pelo veículo $x$ dentro da zona de controlo
$an_x$	Aceleração nominal (valor em módulo), praticada durante as fases de aceleração e desaceleração, pelo veículo $x$ , dentro da zona de interseção.
$a_x(t)$	Função da aceleração instantânea em relação ao tempo do veículo $x$ .
$v_x(t)$	Função da velocidade instantânea em relação ao tempo do veículo $x$ .
$d_x(t)$	Função da distância percorrida, desde o início da zona de controlo, em relação ao tempo do veículo $x$ .

As definições das equações do movimento, dos veículos para as diferentes secções, já podem ser feitas.

Como a entrada para a zona de controlo tem um limite de volume de trânsito, dois veículos consecutivos, na mesma faixa de trânsito, entram na zona de controlo com um desfasamento temporal ( $t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n}$ ) mínimo, inversamente proporcional ao volume de trânsito (expresso em veículos/hora). Este desfasamento temporal mínimo é assegurado pelos veículos, ao permanecerem a uma distância de separação mínima ( $ds_{min}$ ) do

veículo que tem à sua frente, medida desde a parte frontal do veículo seguidor até à extremidade traseira do veículo da frente[60]. No entanto quando esse veículo da frente entrar na zona de controlo e iniciar uma redução de velocidade, por instrução do sistema de controlo para evitar uma colisão, o veículo seguidor terá forçosamente de reduzir também ele a velocidade, para poder assegurar a distância mínima de separação entre os dois veículos. O problema é que sem esta redução de velocidade, por parte do veículo seguidor, o volume de entrada está assegurado com a manutenção da velocidade de cruzeiro. Só não estará assegurado se o veículo seguidor aumentar a sua velocidade até à sua entrada na zona de interseção.

Tendo em conta esta situação, antes da zona de controlo os veículos mantêm uma distância de separação maior ou igual à mínima exigida pelo sistema, até que aquele imediatamente à sua frente entre na zona de controlo. A partir desse momento o veículo seguidor terá de manter a sua velocidade de cruzeiro até chegar ao posto de controlo.

Esta componente funcional implica que o veículo seguidor fique informado de quando aquele imediatamente à sua frente chega à zona de controlo. Requerendo algum tipo de comunicação sem fios, entre o veículo seguidor e o sistema de controlo, ainda antes de chegar ao posto de controlo.

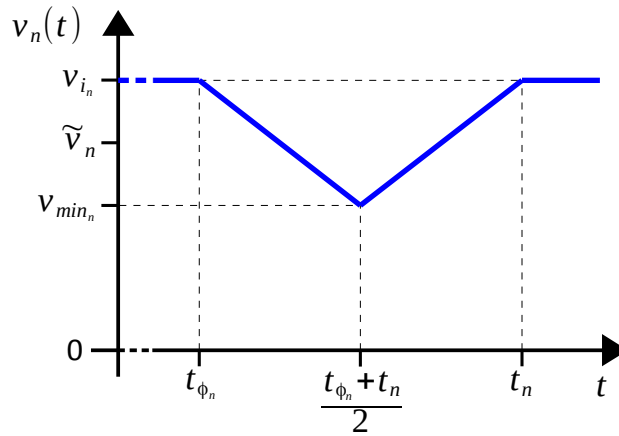
Estando um veículo a seguir outro ou não, no momento em que passa no posto de controlo está a deslocar-se à velocidade de cruzeiro. Quando entra na zona de controlo e não houver nenhuma colisão detetada pelo sistema de controlo, não será necessário atraso e o veículo  $n$  irá prosseguir pela zona de controlo à velocidade de cruzeiro, calculável segundo (3.1) para  $t_{a_n}=0$  segundos. Em caso contrário o veículo  $n$  irá demorar a atravessar a zona de controlo, o tempo que demoraria se o fizesse à velocidade de cruzeiro mais o tempo de atraso imposto pelo sistema de controlo, de acordo com (3.1).

$$t_n - t_{\phi_n} = \frac{D}{v_{i_n}} + t_{a_n} . \quad (3.1)$$

A velocidade média a que o veículo  $n$  se vai deslocar dentro da zona de controlo é dada por (3.2).

$$\tilde{v}_n = \frac{D}{t_n - t_{\phi_n}} \Leftrightarrow \tilde{v}_n = \frac{D}{\frac{D}{v_{i_n}} + t_{a_n}} \quad (3.2)$$

Nesta proposta será assumida uma variação linear da velocidade dentro da zona de controlo, com desaceleração e aceleração simétricas, como ilustrado no gráfico na figura 14. Por causa desta variação linear, a velocidade média corresponde à média da velocidade inicial e da velocidade mínima, segundo (3.3), sendo também idêntica quer durante a fase de travagem quer durante a fase de aceleração.



**Figura 14** Função de velocidade instantânea em função do tempo (a azul) para um veículo  $n$  quando estiver dentro da zona de controlo.

$$\tilde{v}_n = \frac{v_{i_n} + v_{min_n}}{2} \quad (3.3)$$

A velocidade mínima, é atingida quando o veículo  $n$ , estiver exatamente a meio da zona de controlo e é calculável segundo (3.4), após desenvolvimento de (3.3) e substituição com (3.2).

$$v_{min_n} = 2 \times \tilde{v}_n - v_{i_n} \Leftrightarrow v_{min_n} = \frac{2 \times D}{\frac{D}{v_{i_n}} + t_{a_n}} - v_{i_n} \quad (3.4)$$

Ao reduzir gradualmente a sua velocidade até atingir a velocidade  $v_{min_n}$  e posteriormente acelerando com uma amplitude igual até atingir a velocidade  $v_{i_n}$ , a função  $v_n(t)$ , enquanto o veículo  $n$  estiver dentro da zona de controlo, é uma função paramétrica formada por duas equações de reta, uma para a travagem e uma para a aceleração, consequência de a função  $a_n(t)$  também ser paramétrica como mostrado em (3.5), para o

mesmo intervalo de tempo.

$$a_n(t) = \begin{cases} -an_n, & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ an_n, & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases} . \quad (3.5)$$

Para a determinação de uma equação de reta são precisos pelo menos dois pontos que esta intersete. Nas tabelas 5 e 6 são apresentados dois pontos intersetados pela equação de travagem e pela equação de aceleração, respetivamente.

**Tabela 5** Dois pontos intersetados pela função  $v_n(t)$ , durante a fase de travagem.

Instante	Velocidade instantânea
$t_{\phi_n}$	$v_{i_n}$
$\frac{t_{\phi_n} + t_n}{2}$	$v_{min_n}$

Para a equação de travagem o declive é igual a  $-an_n$  por a derivada da velocidade ser a aceleração, que nesta fase do movimento é negativa e é também dada por (3.6).

$$-an_n = \frac{v_{min_n} - v_{i_n}}{\frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} - t_{\phi_n}} = \frac{2 \times (v_{min_n} - v_{i_n})}{t_n - t_{\phi_n}} . \quad (3.6)$$

Para a equação da reta é agora necessária a ordenada nas abcissas que é dada por (3.7).

$$v_{i_n} - (-an_n \times t_{\phi_n}) = v_{i_n} + an_n \times t_{\phi_n} . \quad (3.7)$$

**Tabela 6** Dois pontos intersetados pela função  $v_n(t)$ , durante a fase de aceleração.

Instante	Velocidade instantânea
$\frac{t_{\phi_n} + t_n}{2}$	$v_{min_n}$
$t_n$	$v_{i_n}$

Para a equação de aceleração o declive é igual a  $an_n$  e é também dado por (3.8), o valor é simétrico de (3.6), como era esperado.

$$an_n = \frac{v_{i_n} - v_{min_n}}{t_n - \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2}} = \frac{2 \times (v_{i_n} - v_{min_n})}{t_n - t_{\phi_n}}. \quad (3.8)$$

Para a equação da aceleração a ordenada nas abcissas é dada por (3.9).

$$v_{i_n} - an_n \times t_n. \quad (3.9)$$

Aplicando as duas equações de reta, obtém-se em (3.10) a função  $v_n(t)$ .

$$\begin{aligned} v_n(t) &= \begin{cases} -an_n \times t + (v_{i_n} + an_n \times t_{\phi_n}), & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ an_n \times t + (v_{i_n} - an_n \times t_n), & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases} = \\ &= \begin{cases} v_{i_n} - an_n \times (t - t_{\phi_n}), & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ v_{i_n} + an_n \times (t - t_n), & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Para que a equação de reta da fase de aceleração fique em formato  $an_n \times (t - t_{\phi_n})$ , é adicionado e subtraído  $an_n \times t_{\phi_n}$  e ao termo  $t_n - t_{\phi_n}$ , obtido no processo, é aplicada a substituição pela dedução de (3.8) e fica em (3.11) a função  $v_n(t)$  no formato resultante.

$$\begin{aligned} v_n(t) &= \begin{cases} v_{i_n} - an_n \times (t - t_{\phi_n}), & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ v_{i_n} + an_n \times (t - (t_n - t_{\phi_n}) - t_{\phi_n}), & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases} = \\ &= \begin{cases} v_{i_n} - an_n \times (t - t_{\phi_n}), & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ v_{i_n} + an_n \times \left( t - \frac{2 \times (v_{i_n} - v_{min_n})}{an_n} - t_{\phi_n} \right), & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases} = \\ &= \begin{cases} v_{i_n} - an_n \times (t - t_{\phi_n}), & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ 2 \times v_{min_n} - v_{i_n} + an_n \times (t - t_{\phi_n}), & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases}. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Com a função  $v_n(t)$  definida para  $t \in [t_{\phi_n}, t_n]$  é agora possível obter a função  $d_n(t)$ , para o mesmo intervalo de tempo, executando a integração de  $v_n(t)$  como é mostrado em (3.12).

$$\begin{aligned}
d_n(t) &= \int v_n(t) dt = \\
&= \begin{cases} \int (v_{i_n} - an_n \times (t - t_{\phi_n})) dt, & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ \int (2 \times v_{min_n} - v_{i_n} + an_n \times (t - t_{\phi_n})) dt, & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases} = \\
&= \begin{cases} (v_{i_n} + an_n \times t_{\phi_n}) \times t - \frac{an_n}{2} \times t^2 + C_1, & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ (2 \times v_{min_n} - v_{i_n} - an_n \times t_{\phi_n}) \times t + \frac{an_n}{2} \times t^2 + C_2, & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases} .
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Para o cálculo das constantes  $C_1$  e  $C_2$ , em (3.13) e (3.15) respetivamente, é utilizado um ponto conhecido e intersetado pela função, respetivamente  $(t_{\phi_n}, 0)$  para a fase de desaceleração e  $(t_n, D)$  para a fase de aceleração.

$$\begin{aligned}
d_n(t_{\phi_n}) = 0 &\Leftrightarrow (v_{i_n} + an_n \times t_{\phi_n}) \times t_{\phi_n} - \frac{an_n}{2} \times t_{\phi_n}^2 + C_1 = 0 \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow C_1 = \frac{an_n}{2} \times t_{\phi_n}^2 - v_{i_n} \times t_{\phi_n} - an_n \times t_{\phi_n}^2 \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow C_1 = -\frac{an_n}{2} \times t_{\phi_n}^2 - v_{i_n} \times t_{\phi_n}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Em (3.14) obtém-se  $d_n(t)$  para  $t \in \left[ t_{\phi_n}, \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \right]$  aplicando a substituição de (3.13) em (3.12), colocando-se em evidência  $v_{i_n}$  e  $-\frac{an_n}{2}$ , com esta segunda a evidenciar um caso notável da matemática, o quadrado da diferença, na sua forma expandida.

$$\begin{aligned}
d_n(t) &= (v_{i_n} + an_n \times t_{\phi_n}) \times t - \frac{an_n}{2} \times t^2 + \left( -\frac{an_n}{2} \times t_{\phi_n}^2 - v_{i_n} \times t_{\phi_n} \right) = \\
&= v_{i_n} \times (t - t_{\phi_n}) - \frac{an_n}{2} \times (t^2 - 2 \times t \times t_{\phi_n} + t_{\phi_n}^2) = v_{i_n} \times (t - t_{\phi_n}) - \frac{an_n}{2} \times (t - t_{\phi_n})^2 .
\end{aligned} \tag{3.14}$$

Em (3.15) é feito o cálculo da constante  $C_2$ , partindo da expressão  $d_n(t)$  para  $t \in \left[ \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2}, t_n \right]$ , presente em (3.12), aplicada para o cálculo do ponto  $(t_n, D)$ , substituindo  $t_n$  de acordo com (3.8), desenvolvendo todos os quadrados e por fim simplificando.

$$\begin{aligned}
d_n(t_n) = D &\Leftrightarrow (2 \times v_{\min_n} - v_{i_n} - an_n \times t_{\phi_n}) \times t_n + \frac{an_n}{2} \times t_n^2 + C_2 = D \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow C_2 = D - \frac{an_n}{2} \times t_n^2 - (2 \times v_{\min_n} - v_{i_n} - an_n \times t_{\phi_n}) \times t_n \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow C_2 = D - \frac{an_n}{2} \times \left( \frac{2 \times (v_{i_n} - v_{\min_n})}{an_n} + t_{\phi_n} \right)^2 - (2 \times v_{\min_n} - v_{i_n} - an_n \times t_{\phi_n}) \times \\
&\left( \frac{2 \times (v_{i_n} - v_{\min_n})}{an_n} + t_{\phi_n} \right) \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow C_2 = D - \frac{an_n}{2} \times \left( \frac{4 \times (v_{i_n} - v_{\min_n})^2}{an_n^2} + \frac{4 \times (v_{i_n} - v_{\min_n})}{an_n} \times t_{\phi_n} + t_{\phi_n}^2 \right) - \\
&\left( \frac{4 \times (v_{i_n} \times v_{\min_n} - v_{\min_n}^2)}{an_n} + 2 \times v_{\min_n} \times t_{\phi_n} - \frac{2 \times (v_{i_n}^2 - v_{i_n} \times v_{\min_n})}{an_n} - v_{i_n} \times t_{\phi_n} \right. \\
&\quad \left. - 2 \times (v_{i_n} - v_{\min_n}) \times t_{\phi_n} - an_n \times t_{\phi_n}^2 \right) \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow C_2 = D - \frac{2 \times (v_{i_n} - v_{\min_n})^2}{an_n} - 2 \times (v_{i_n} - v_{\min_n}) \times t_{\phi_n} - \frac{an_n}{2} \times t_{\phi_n}^2 + \\
&\frac{2 \times v_{i_n}^2 - 6 \times v_{i_n} \times v_{\min_n} + 4 \times v_{\min_n}^2}{an_n} + 3 \times v_{i_n} \times t_{\phi_n} + an_n \times t_{\phi_n}^2 \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow C_2 = D + \frac{-2 \times v_{i_n} \times v_{\min_n} + 2 \times v_{\min_n}^2}{an_n} - (2 \times v_{\min_n} - v_{i_n}) \times t_{\phi_n} + \frac{an_n}{2} \times t_{\phi_n}^2
\end{aligned} \quad (3.15)$$

Para substituir  $D$  na expressão de  $C_2$ , é feita uma dedução, em (3.16), partindo das duas expressões para  $\tilde{v}_x$ , a inicial em (3.2) e a (3.3), com  $t_n - t_{\phi_n}$  a ser substituído de acordo com (3.8), resolvendo em ordem a  $D$ , simplificando e por fim contraindo o caso notável da matemática, diferença de quadrados.

$$\frac{D}{t_n - t_{\phi_n}} = \frac{v_{i_n} + v_{\min_n}}{2} \Leftrightarrow \frac{D}{2 \times (v_{i_n} - v_{\min_n})} = \frac{v_{i_n} + v_{\min_n}}{2} \Leftrightarrow D = \frac{v_{i_n}^2 - v_{\min_n}^2}{an_n} \quad (3.16)$$

Aplicando em (3.15) a substituição deduzida em (3.16), passa a ser possível obter um caso notável da matemática, quadrado da diferença, na sua forma contraída após simplificação, como se mostra em (3.17).

$$C_2 = \frac{(v_{i_n} - v_{\min_n})^2}{an_n} - (2 \times v_{\min_n} - v_{i_n}) \times t_{\phi_n} + \frac{an_n}{2} \times t_{\phi_n}^2 \quad (3.17)$$

É apresentada em (3.18),  $d_n(t)$  para  $t \in [t_{\phi_n}, t_n]$ , com a expressão (3.14), durante a fase de travagem e para a fase de aceleração é substituída  $C_2$ , de acordo com (3.17), na

expressão  $d_n(t)$  para  $t \in \left[ \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2}, t_n \right]$ , presente em (3.12), depois são colocados em evidência os termos  $(2 \times v_{min_n} - v_{i_n})$  e  $\frac{an_n}{2}$ , com este segundo a evidenciar um caso notável da matemática, o quadrado da diferença, na sua forma expandida.

$$d_n(t) = \begin{cases} v_{i_n} \times (t - t_{\phi_n}) - \frac{an_n}{2} \times (t - t_{\phi_n})^2, & t_{\phi_n} \leq t < \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \\ \frac{(v_{i_n} - v_{min_n})^2}{an_n} + (2 \times v_{min_n} - v_{i_n}) \times (t - t_{\phi_n}) + \frac{an_n}{2} \times (t - t_{\phi_n})^2, & \frac{t_{\phi_n} + t_n}{2} \leq t \leq t_n \end{cases} \quad (3.18)$$

### 3.3.1. VERIFICAÇÃO DE COLISÃO

Quando um veículo passa pelo posto de controlo, dá entrada no sistema e têm de ser verificadas todas as possibilidades de colisão com os outros veículos, que também já deram entrada no sistema e ainda não saíram totalmente da zona de interseção. Em princípio o sistema tenta que o veículo prossiga, desde o início da zona de controlo até à sua saída da zona de interseção, à velocidade de cruzeiro. Só se o sistema determinar, baseado nos movimentos futuros previstos que definiu para todos os veículo, que o novo veículo ao manter a velocidade, iria causar alguma colisão com um dos outros, é que vai ser necessário um atraso temporal, que o levará a atravessar a zona de controlo a uma velocidade média inferior à velocidade de cruzeiro. Depois de calculado o atraso necessário para a colisão ser evitada, têm de ser repetidas as verificações de possibilidade de colisão, pois com o novo instante de entrada na interseção, podem passar a existir outros conflitos, que antes não se verificavam.

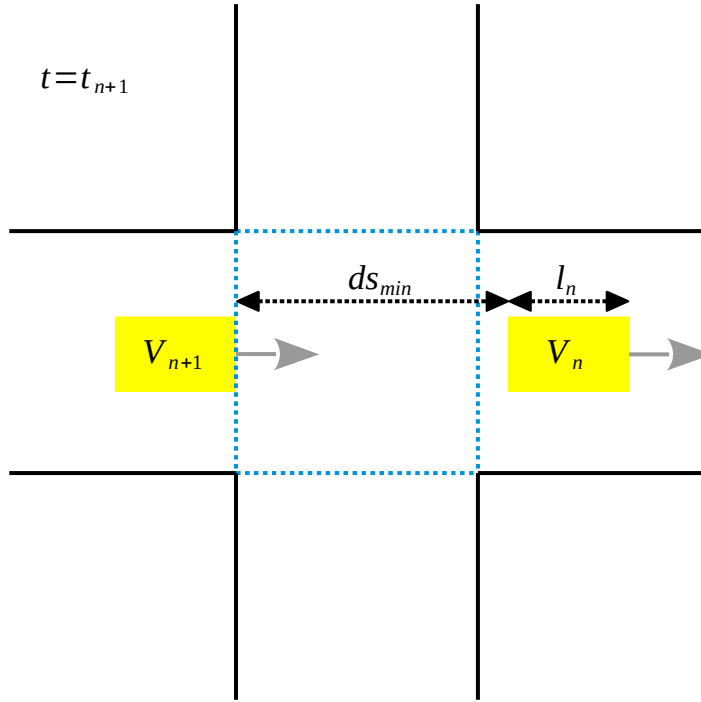
Se existir um veículo à frente, do veículo a passar no posto de controlo, é necessário verificar que, até à saída da interseção não haja nenhuma colisão de traseira entre os dois. Para este tipo de verificação, como os veículos viajam na mesma direção, basta serem considerados como segmentos de reta, por a sua largura não ser relevante para este tipo de colisão. Para que não haja colisão de traseira, a distância desde a traseira do veículo da frente até à frente do veículo seguidor, necessita de ser sempre superior a zero. Como a distância percorrida dentro da zona de interseção é diretamente proporcional à velocidade de cruzeiro de cada veículo, é então necessário avaliar a velocidade de cruzeiro dos dois veículos.

Se a velocidade de cruzeiro do veículo seguidor for menor, que a do veículo da frente, vai haver um aumento da distância entre os dois, conforme vão progredindo dentro da zona de interseção. Significa isto que, se aquando de o veículo seguidor entrar na zona de interseção, existir uma distância de separação entre os dois superior a zero, daí para a frente a distância de separação vai aumentar e não haverá a possibilidade de colidirem. Matematicamente para garantir que não haja colisão, é necessário que quando o veículo seguidor,  $n+1$ , entrar na zona de interseção, no instante  $t_{n+1}$ , o veículo à sua frente,  $n$ , já tenha percorrido pelo menos uma distância igual ao seu comprimento ( $l_n$ ), como exposto em (3.19).

$$d_n(t_{n+1}) - d_{n+1}(t_{n+1}) \geq l_n. \quad (3.19)$$

Ao mesmo tempo existe a obrigação de, à saída da interseção, assegurar um desfasamento temporal ( $t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n}$ ) mínimo, que existe na secção de entrada para limitar o volume de trânsito. Na secção de saída como o veículo comporta-se como quando está na secção de entrada, vai ter de manter pelo menos  $ds_{min}$  para o veículo à sua frente. Ora, para uma situação em que  $d_n(t_{n+1}) - d_{n+1}(t_{n+1})$  seja igual a  $l_n$ , satisfazendo a condição (3.19) e não exigindo introduzir atraso por parte do veículo  $n+1$ , quando este sair da interseção os veículos estarão demasiado próximos e não será cumprida a distância de separação mínima para a secção de saída. Para evitar esta situação, a condição para que não seja necessário introduzir atraso ao veículo  $n+1$ , estando a viajar a uma velocidade de cruzeiro não superior à do veículo imediatamente à sua frente, tem de ser (3.20), sendo a disposição espacial no instante  $t_{n+1}$  a ilustrada na figura 15.

$$d_n(t_{n+1}) - d_{n+1}(t_{n+1}) \geq ds_{min} + l_n, \quad v_{i_{n+1}} \leq v_{i_n}. \quad (3.20)$$



**Figura 15** Situação limite, à entrada da interseção, para não ser necessário introduzir atraso ao veículo  $n+1$ , para evitar colisão de traseira.

Em (3.21) é modificado (3.20) para estar relacionada com os instantes de entrada na zona de controlo  $t_{\phi_n}$  e  $t_{\phi_{n+1}}$  e com as velocidades de cruzeiro e mínimas. Em  $t_n$  o veículo  $n$  entra na zona de interseção, após ter percorrido  $D$  metros desde que passou pelo posto de controlo e depois de entrar, qualquer distância percorrida para um instante  $i$  é obtida ao multiplicar a velocidade de cruzeiro por  $(i - t_n)$ .  $t_n$  e  $t_{n+1}$  são substituídos de acordo com (3.2) e depois as velocidades médias são substituídas de acordo com (3.3).

$$\begin{aligned}
 & d_n(t_{n+1}) - d_{n+1}(t_{n+1}) \geq ds_{min} + l_n \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow d_n(t_{n+1} - t_n + t_n) - d_{n+1}(t_{n+1}) \geq ds_{min} + l_n \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow v_{i_n} \times (t_{n+1} - t_n) + d_n(t_n) - d_{n+1}(t_{n+1}) \geq ds_{min} + l_n \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow v_{i_n} \times \left( \left( \frac{D}{\tilde{v}_{n+1}} + t_{\phi_{n+1}} \right) - \left( \frac{D}{\tilde{v}_n} + t_{\phi_n} \right) \right) + D - D \geq ds_{min} + l_n \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow \frac{D}{\frac{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}}{2}} + t_{\phi_{n+1}} - \frac{D}{\frac{v_{i_n} + v_{min_n}}{2}} - t_{\phi_n} \geq \frac{ds_{min} + l_n}{v_{i_n}} \Leftrightarrow \quad (3.21) \\
 & \Leftrightarrow \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} + t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} \geq \frac{ds_{min} + l_n}{v_{i_n}} \Leftrightarrow \\
 & \Leftrightarrow t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} \geq \frac{ds_{min} + l_n}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}}, \quad v_{i_{n+1}} \leq v_{i_n}
 \end{aligned}$$

Note-se que para a primeira verificação de colisão do veículo seguidor  $n+1$ , é testada a

hipótese de não haver atraso nenhum e por isso a velocidade mínima é igual à velocidade inicial, podendo (3.21) ser simplificada para (3.22).

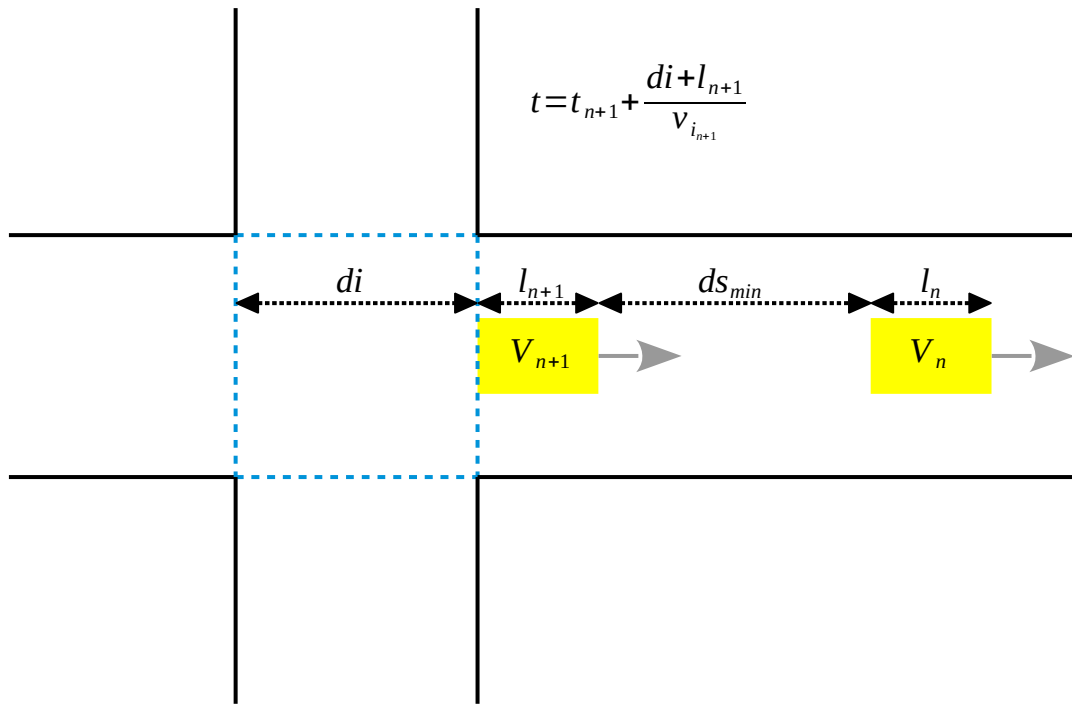
$$t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} \geq \frac{ds_{min} + l_n - D}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}}, \quad v_{i_{n+1}} \leq v_{i_n}. \quad (3.22)$$

Nas situações em que a condição (3.21) não seja verificada, o tempo de atraso necessário tem de ser calculado. O tempo de atraso necessário corresponde ao tempo que falta para a condição passar a ser cumprida, ou seja a diferença entre o segundo termo e o primeiro, como mostrado em (3.23).

$$t_{a_{n+1}} = \frac{ds_{min} + l_n}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - (t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n}). \quad (3.23)$$

Depois do cálculo do tempo de atraso, a velocidade mínima a atingir pelo veículo é calculada com recurso a (3.4) e o valor nominal da aceleração pode ser calculado por (3.8) ou de acordo com (3.16).

Se o veículo seguidor tiver uma velocidade de cruzeiro superior à do veículo da frente, a distância entre os dois irá diminuir conforme se deslocam dentro da zona de interseção. Neste caso a distância de separação mínima terá de ser aplicada no instante de saída da interseção por parte do veículo seguidor  $n+1$ , tal como mostra a ilustração da figura 16.



**Figura 16** Situação limite, à saída da interseção, para não ser necessário introduzir atraso ao veículo  $n+1$ , para evitar colisão de traseira.

No entanto, imediatamente depois de o veículo seguidor sair da interseção, este está a deslocar-se à sua velocidade de cruzeiro e tem de permanecer a uma distância superior ou igual a  $ds_{min}$  por estar na secção de saída e estando o veículo  $n$  a deslocar-se à sua velocidade de cruzeiro, que é inferior, o veículo seguidor irá ver-se inevitavelmente forçado a abrandar para tentar não incumprir a distância mínima. Por esta razão a situação ilustrada na figura 16 não é satisfatória e iria requerer um atraso temporal. Este problema pode ser resolvido, só se o sistema de controlo souber a distância que o veículo seguidor irá necessitar para fazer a aproximação ao veículo da frente, inicialmente à sua velocidade de cruzeiro e diminuindo até atingir a velocidade de cruzeiro, do veículo da frente e estiver nessa altura a  $ds_{min}$  dele. Isto requer conhecer o modelo matemático cumprido pelo veículo, quando segue outro e iria complicar o funcionamento do sistema de controlo, pelo que não será admitida a entrada de veículos com velocidade de cruzeiro superior à de outro. Significando isto, que todos os veículos terão de praticar a mesma velocidade de cruzeiro e que para avaliação de possíveis colisões de traseira, apenas será necessário recorrer à condição em (3.21) e ao eventual cálculo do tempo de atraso necessário com (3.23).

Estando um veículo  $n+1$  à distância mínima ( $ds_{min}$ ) do veículo  $n$ , que está à sua frente, quando esse der entrada na zona de controlo e se o veículo  $n+1$  não tiver outras colisões a evitar, irá ter de implementar um tempo de atraso idêntico ao do veículo  $n$ . Tal como se comprova em (3.24), partindo de (3.23), com um desfasamento de instantes de entrada ( $t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n}$ ) de  $\frac{ds_{min}+l_n}{v_{i_{n+1}}}$  e a velocidade mínima do veículo  $n+1$  igual à sua velocidade inicial, por aquando da verificação ainda não ter nenhum atraso a aplicar, sendo as velocidades de cruzeiro de ambos os veículos idênticas e aplicando-se substituições de acordo com (3.3), (3.2) e (3.1).

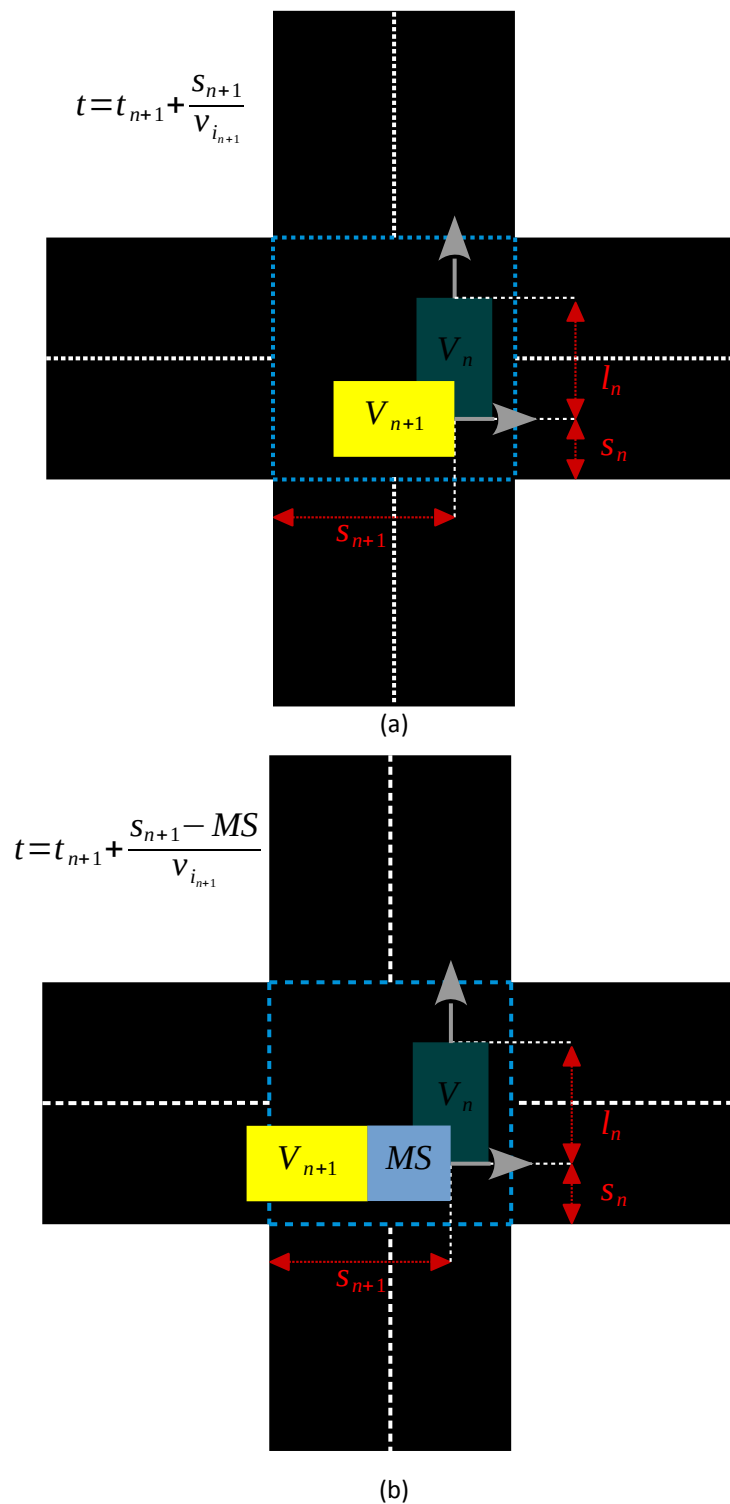
$$\begin{aligned}
 t_{a_{n+1}} &= \frac{ds_{min}+l_n}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - (t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n}) = \\
 &= \frac{ds_{min}+l_n}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{i_{n+1}}} - \frac{ds_{min}+l_n}{v_{i_{n+1}}} = \\
 &= \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{D}{v_{i_{n+1}}} = \frac{D}{\tilde{v}_n} - \frac{D}{v_{i_n}} = (t_n - t_{\phi_n}) - \frac{D}{v_{i_n}} = t_{a_n}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Isto significa, que para uma sequência de veículos,  $n$ ,  $n+1$  até  $n+k$  separados entre eles pela distância mínima, em que apenas o veículo  $n$  tenha de evitar uma colisão com um outro veículo de uma outra faixa de trânsito, todos os  $k+1$  veículos terão de implementar de forma sistémica o mesmo tempo de atraso, mesmo com todas as outras faixas de trânsito vagas, até que haja um veículo que esteja mais afastado daquele imediatamente à sua frente.

Em relação a colisões laterais, como os veículos seguem trajetórias perpendiculares, vão existir duas condições para não ser necessário introduzir atraso, porque o veículo  $n+1$  pode passar pelo ponto de colisão antes ou pode passar depois, do veículo  $n$  sem haver colisão para evitar.

Não será necessário atraso se, quando o veículo  $n+1$  chegar com a frente ao ponto de colisão, que será no instante  $t_{n+1} + \frac{S_{n+1}}{v_{i_{n+1}}}$ , o veículo  $n$  já tenha saído com a traseira do mesmo ponto de colisão, ou seja tenha-se deslocado pelo menos  $S_n + l_n$  depois de ter entrado na interseção. Nesta situação o veículo  $n+1$  passa atrás do veículo  $n$ , como se ilustra na figura 17a. Realisticamente assim a colisão ainda não está evitada pois ao contrário da colisão de traseira, na colisão lateral a largura do veículo tem de ser tida em

conta e não é suficiente considerar os veículos como segmentos de reta.



**Figura 17** Ilustração da condição limite para o veículo  $n+1$ , passar atrás do veículo  $n$  e evitar colisão lateral sem requerer tempo de atraso adicional.

Como salvaguarda é adicionada uma distância extraordinária, denominada de margem de segurança ( $MS$ ), durante os cálculos, servindo como uma extensão imaginária à frente

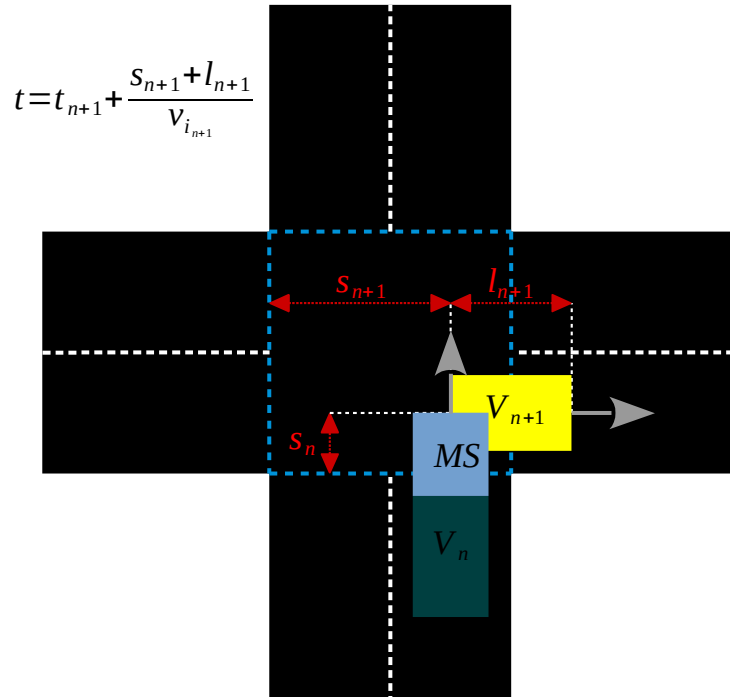
do veículo mais atrasado em relação ao ponto de colisão, ou seja o que passa atrás do outro, garantindo que para o instante em que os cálculos são feitos, o veículo que passa atrás está suficientemente afastado do ponto de colisão e da extremidade lateral traseira do outro veículo, como se pode ver na figura 17b. Para simplificar o funcionamento do sistema, esta distância de segurança é introduzida, pelo sistema de controlo, de forma indiscriminada para todos os veículos, não sendo assim diretamente proporcional à largura dos veículos intervenientes na possível colisão a ser verificada, mas sendo calculada com base na largura máxima que um veículo possa ter para utilizar a interseção.

A condição para que um veículo  $n+1$  consiga passar no ponto de colisão depois de um veículo  $n$  é a deduzida em (3.25). Sabendo-se que, quando o veículo  $n+1$  chegar com a frente ao ponto de colisão, que tendo em consideração a margem de segurança é no instante  $t_{n+1} + \frac{s_{n+1} - MS}{v_{i_{n+1}}}$ , o veículo  $n$  terá de já ter abandonado o mesmo ponto de colisão, matematicamente tendo-se deslocado pelo menos o comprimento da zona de controlo, a distância ao ponto de colisão e mais o seu próprio comprimento. A dedução é conduzida de forma similar à feita em (3.21), sendo só de realçar que as velocidades de cruzeiro dos dois veículos são idênticas.

$$\begin{aligned}
& d_n \left( t_{n+1} + \frac{s_{n+1} - MS}{v_{i_{n+1}}} \right) \geq D + s_n + l_n \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow d_n \left( t_{n+1} - t_n + t_n + \frac{s_{n+1} - MS}{v_{i_{n+1}}} \right) \geq D + s_n + l_n \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow v_{i_n} \times \left( t_{n+1} - t_n + \frac{s_{n+1} - MS}{v_{i_{n+1}}} \right) - d_{n+1}(t_{n+1}) \geq D + s_n + l_n \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow v_{i_n} \times \left( \left( \frac{D}{\tilde{v}_{n+1}} + t_{\phi_{n+1}} \right) - \left( \frac{D}{\tilde{v}_n} + t_{\phi_n} \right) \right) + (s_{n+1} - MS) + D \geq D + s_n + l_n \Leftrightarrow \quad (3.25) \\
& \Leftrightarrow v_{i_n} \times \left( \frac{D}{\frac{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}}{2}} + t_{\phi_{n+1}} - \frac{D}{\frac{v_{i_n} + v_{min_n}}{2}} - t_{\phi_n} \right) \geq s_n - s_{n+1} + l_n + MS \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} + t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} \geq \frac{s_n - s_{n+1} + l_n + MS}{v_{i_n}} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} \geq \frac{s_n - s_{n+1} + l_n + MS}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}}
\end{aligned}$$

A condição para que um veículo  $n+1$  passe à frente dum veículo  $n$  de forma a não haver

colisão, é calculada para o instante  $t_{n+1} + \frac{S_{n+1} + l_{n+1}}{V_{i_{n+1}}}$  em que, a traseira do veículo  $n+1$  está a sair do ponto de colisão e para esse instante o veículo  $n$  terá de estar ainda a pelo menos  $MS$  do ponto de colisão, como ilustrado na figura 18.



**Figura 18** Ilustração da condição limite para o veículo  $n+1$ , passar à frente do veículo  $n$  e evitar colisão lateral sem requerer tempo de atraso adicional.

A dedução da condição, para que um veículo  $n+1$  consiga passar no ponto de colisão antes dum veículo  $n$ , é conduzida matematicamente de forma similar à feita em (3.25) e está presente em (3.26).

$$\begin{aligned}
& d_n \left( t_{n+1} + \frac{s_{n+1} + l_{n+1}}{v_{i_{n+1}}} \right) \leq D + s_n - MS \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow d_n \left( t_{n+1} - t_n + t_n + \frac{s_{n+1} + l_{n+1}}{v_{i_{n+1}}} \right) \leq D + s_n - MS \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow v_{i_n} \times \left( t_{n+1} - t_n + \frac{s_{n+1} + l_{n+1}}{v_{i_{n+1}}} \right) + d_n(t_n) \leq D + s_n - MS \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow v_{i_n} \times \left( \left( \frac{D}{\tilde{v}_{n+1}} + t_{\phi_{n+1}} \right) - \left( \frac{D}{\tilde{v}_n} + t_{\phi_n} \right) \right) + (s_{n+1} + l_{n+1}) + D \leq D + s_n - MS \Leftrightarrow \quad (3.26) \\
& \Leftrightarrow v_{i_n} \times \left( \frac{D}{\frac{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}}{2}} + t_{\phi_{n+1}} - \frac{D}{\frac{v_{i_n} + v_{min_n}}{2}} - t_{\phi_n} \right) \leq s_n - s_{n+1} - l_{n+1} - MS \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} + t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} \leq \frac{s_n - s_{n+1} - l_{n+1} - MS}{v_{i_n}} \Leftrightarrow \\
& \Leftrightarrow t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} \leq \frac{s_n - s_{n+1} - l_{n+1} - MS}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}}
\end{aligned}$$

Se  $MS$  for maior que  $s_n$ , como no caso ilustrado na figura 18, o veículo  $n$  poderá fisicamente estar a menos de  $MS$  do ponto de colisão, porque ainda está na zona de controlo e não se vai estar a deslocar à velocidade de cruzeiro se tiver implementado algum atraso. Apesar de este fato o veículo não vai chegar ao ponto de colisão antes do esperado, pois como o ponto de colisão está no interior da interseção quando o veículo lá chegar já estará à velocidade de cruzeiro. Apenas haverá diferença entre a margem de segurança utilizada nos cálculos e a margem de segurança real, que será menor. Não são apresentadas medidas corretivas para esta discrepância, neste trabalho, por no mínimo haver uma margem de segurança real igual a  $s_n$ , e ser considerada suficiente.

Quando nenhuma das condições (3.25) ou (3.26) se verificar, o veículo  $n+1$  necessita de atrasar a sua entrada na zona de interseção para eludir a colisão lateral. O atraso temporal é calculado pela diferença entre o segundo e o primeiro termos de (3.25), de acordo com (3.27).

$$t_{a_{n+1}} = \frac{s_n - s_{n+1} + l_n + MS}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - (t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n}). \quad (3.27)$$

É também de notar que a colisão lateral poderia ser evitada adiantando o instante de entrada na interseção. Calculando-se um adiantamento temporal pela diferença entre o primeiro e o segundo termos de (3.26) e aumentando-se a velocidade média que o veículo pratica na zona de controlo, sendo atingida uma velocidade máxima a meio da

zona de controlo e não uma velocidade mínima. No entanto a viabilidade desta maneira de evitar colisão não foi estudada neste trabalho, incluindo pelo fato de fisicamente vir a causar um maior gasto de energia, por parte do veículo para um igual deslocamento temporal de avanço e de recuo.

É importante frisar que neste trabalho não são feitas verificações de colisões com ângulo, quer em pontos de colisão de entroncamento (circunferências com cruz castanhas na figura 3), quer em pontos de colisão de viragem a atravessar a interseção (círculos a rosa e a castanho na figura 3).

Assumindo uma interseção de duas vias como a ilustrada na figura 13 e partindo de uma situação sem veículos a utilizarem o sistema de controlo, em que o sistema de controlo acolhe dois novos veículos,  $n$  e  $n+1$ , nas duas zonas de controlo de forma a ser causada uma colisão lateral entre os dois, o tempo de atraso, que é dado por (3.27), a ser implementado pelo veículo  $n+1$  será máximo para  $(t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n})$  igual a zero, ou seja, quando os dois veículos entrarem nas respectivas zonas de controlo ao mesmo tempo,

resultando num tempo de atraso de  $\frac{l_n + MS}{v_{i_n}}$ , considerando que as velocidades de

cruzeiro são idênticas, que as velocidades mínimas são iguais às velocidades de cruzeiro, por não existirem atrasos anteriores, e que as distâncias para o ponto de colisão também são iguais. Se atrás destes veículos vierem outros dois, nomeadamente o veículo  $n+2$  atrás do veículo  $n$ , e o veículo  $n+3$  atrás do veículo  $n+1$ , e ambos entrarem nas zonas de controlo respetivas no mesmo instante, a situação descrita para os veículos  $n$  e  $n+1$ , será também verdade para estes dois em termos de tempos de atraso, se o veículo  $n+2$  não tiver de implementar nenhum atraso para evitar colisão lateral com o veículo  $n+1$ . No caso de o veículo  $n+2$  ter de aplicar dito atraso, o veículo  $n+3$  terá de aplicar um atraso maior, que o veículo à sua frente o  $n+1$  e se mais novos veículos vierem atrás ainda maiores serão os seus tempos de atraso, levando a uma situação insuportável em que eventualmente um veículo terá um atraso tão elevado, que terá de alcançar uma velocidade mínima na zona de controlo nula. É então necessário assegurar que no cenário descrito o veículo  $n+2$  não tem de evitar nenhuma colisão lateral com o veículo  $n+1$ , que matematicamente corresponde a avaliar a condição (3.25) de forma a ser verdadeira, como é feito em (3.28), considerando que, a velocidade mínima do veículo  $n+2$  é igual à

de cruzeiro, por não ter atrasos anteriores, e considerando também que o instante de entrada na zona de controlo dos veículos  $n+1$  e  $n$  e os seus comprimentos são idênticos.

$$\begin{aligned}
t_{\phi_{n+2}} - t_{\phi_{n+1}} &\geq \frac{s_{n+1} - s_{n+2} + l_{n+1} + MS}{v_{i_{n+1}}} + \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+2}} + v_{min_{n+2}}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow t_{\phi_{n+2}} - t_{\phi_{n+1}} &\geq \frac{l_{n+1} + MS}{v_{i_{n+1}}} + \frac{D}{\frac{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}}{2}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+2}} + v_{i_{n+2}}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow t_{\phi_{n+2}} - t_{\phi_n} &\geq \frac{l_{n+1} + MS}{v_{i_{n+1}}} + \frac{D}{\tilde{v}_{n+1}} - \frac{D}{v_{i_{n+2}}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow t_{\phi_{n+2}} - t_{\phi_n} &\geq \frac{l_{n+1} + MS}{v_{i_{n+1}}} + t_{a_{n+1}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow t_{\phi_{n+2}} - t_{\phi_n} &\geq \frac{l_{n+1} + MS}{v_{i_{n+1}}} + \frac{l_n + MS}{v_{i_n}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow t_{\phi_{n+2}} - t_{\phi_n} &\geq \frac{2 \times (l_n + MS)}{v_{i_n}}
\end{aligned} \tag{3.28}$$

Sabendo-se que a velocidade de cruzeiro tem de ser a mesma para todos os veículos e que a margem de segurança, utilizada pelo sistema de controlo, é fixa, o comprimento do veículo vai fazer variar o desfasamento temporal mínimo entre dois veículos seguidos. O desfasamento mínimo ao ser diretamente proporcional ao comprimento dos veículos, será mais restritivo para a condição (3.28), quanto maior for o comprimento dos veículos  $n+1$  e  $n$ . Como o desfasamento temporal mínimo entre veículos terá de ser suficiente para qualquer que seja o comprimento dos veículos, no seu cálculo, que assegure que a expressão (3.28) seja verdadeira,  $l_{máx}$  será utilizado como o comprimento dos veículos, visto que se houverem veículos de menor comprimento, o atraso a que irão obrigar os outros será menor e por isso menos restritivo. Depois deste cálculo a distância mínima de separação entre veículos, nas secções de entrada e de saída, é calculada, sabendo-se que para alcançar a mesma posição em que o veículo da frente está, um veículo vai ter de percorrer a distância de separação mais o comprimento do veículo à sua frente[60]. Sendo o desfasamento temporal fixo, a distância de separação mínima será menor, quanto mais comprido for o veículo da frente. Isto irá requerer que cada veículo saiba qual o comprimento do veículo à sua frente e que calcule a distância de separação mínima seguindo a fórmula (3.29) ou que seja informado da distância de separação a aplicar.

$$\begin{aligned}
t_{\phi_{n+2}} - t_{\phi_n} &= \frac{2 \times (l_{m\acute{a}x} + MS)}{v_{i_n}} \Leftrightarrow \\
\Leftrightarrow \frac{ds_{min} + l_n}{v_{i_n}} &= \frac{2 \times (l_{m\acute{a}x} + MS)}{v_{i_n}} \Leftrightarrow \cdot \\
\Leftrightarrow ds_{min} &= 2 \times (l_{m\acute{a}x} + MS) - l_n
\end{aligned} \tag{3.29}$$

### 3.3.2. ATRASO MÁXIMO ABSOLUTO

Para se calcular o tempo de atraso máximo que um veículo pode ser obrigado a implementar, é necessário perceber que se o desfasamento temporal entre veículos à entrada for cumprido, todos os atrasos serão consequência de uma colisão lateral. Depois considera-se a condiao (3.26) e que um veículo que a falhe, de forma infinitesimal em situaao quase idêntica à ilustrada na figura 18, terá de implementar um atraso maior do que se falhar a condiao (3.25). Igualando os termos da condiao (3.26) consegue-se o desfasamento entre os instantes de entrada dos veículos, para o qual é obtido o atraso máximo possível. É então o cálculo feito aplicando o desfasamento de instantes de entrada obtido, no cálculo, do tempo de atraso para uma colisão lateral, (3.27), sendo o comprimento dos veículos igualado ao comprimento máximo permitido para se obter o máximo atraso possível, como se mostra em (3.30).

$$\begin{aligned}
t_{a_{n+1}} &= \frac{s_n - s_{n+1} + l_n + MS}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - (t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n}) = \\
&= \frac{s_n - s_{n+1} + l_n + MS}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} - \left( \frac{s_n - s_{n+1} - l_{n+1} - MS}{v_{i_n}} \right. \\
&\quad \left. + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} \right) = \frac{2 \times (l_{m\acute{a}x} + MS)}{v_{i_n}}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

O desfasamento entre os instantes de entrada dos veículos utilizado em (3.30), pode ser calculado, sendo a velocidade mínima do veículo  $n+1$  igual a sua velocidade de cruzeiro por não haverem atrasos anteriores, e o comprimento dos veículos é igual ao comprimento máximo aceite, como se demonstra em (3.31).

$$\begin{aligned}
t_{\phi_{n+1}} - t_{\phi_n} &= \frac{s_n - s_{n+1} - l_{n+1} - MS}{v_{i_n}} + \frac{2 \times D}{v_{i_n} + v_{min_n}} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{min_{n+1}}} = \\
&= \frac{-l_{m\acute{a}x} - MS}{v_{i_n}} + \frac{D}{\widetilde{v}_n} - \frac{2 \times D}{v_{i_{n+1}} + v_{i_{n+1}}} = \frac{-l_{m\acute{a}x} - MS}{v_{i_n}} + \frac{D}{v_{i_n}} + t_{a_n} - \frac{D}{v_{i_{n+1}}} = \\
&= \frac{-l_{m\acute{a}x} - MS}{v_{i_n}} + t_{a_n}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

O desfasamento terá, como para todas as outras situações, de ser maior que ou igual a zero, pois se fosse menor isso significaria que o primeiro veículo a entrar no sistema de controlo, seria o  $n+1$  e só depois entraria o  $n$ , o que seria ilógico. Assumindo o valor mínimo possível, que é zero, o tempo de atraso que o veículo  $n$  já tem de aplicar é de  $\frac{l_{m\acute{a}x} + MS}{v_{i_n}}$ , que corresponde à situação descrita no último parágrafo da página 72, do segundo veículo a entrar no sistema. No entanto como nestas duas colisões o desfasamento temporal entre os veículos é zero, impossibilita o cálculo feito em (3.31), pois significaria que dois veículos ( $n-1$  e  $n$ ) entrariam na mesma zona de controlo em instantes consecutivos, não cumprindo claramente a condição (3.28). A única maneira de o cálculo permanecer verdadeiro é se se introduzir uma sequência de veículos, desde o veículo  $n$  até ao veículo  $j$ , todos separados entre si pela distância mínima e tendo por isso exatamente o mesmo tempo de atraso que o veículo  $n$ , como já provado em (3.24). Na outra secção de entrada, o veículo  $n-1$  não é imediatamente seguido e só volta a entrar um veículo, ao fim de um tempo suficiente, para não puder ter de se atrasar por influência do veículo  $n-1$ . No instante seguinte ao do veículo  $j$  entrar na zona de controlo, surge um veículo  $j+1$  na outra entrada, que tem de evitar a colisão lateral com o veículo  $j$ . Desta forma o que se estava a tentar provar com os veículos  $n$  e  $n+1$  e se provou impossível, é possível provar com os veículos  $j$  e  $j+1$ , sendo este último aquele que aplica o maior atraso temporal possível.

Para fins de dimensionamento da interseção, o atraso temporal máximo absoluto servirá para ser calculada a velocidade mínima absoluta, alcançada a meio da zona de controlo, com recurso à expressão (3.4) e servirá esta por sua vez para que se calcule a maior aceleração em módulo, que um veículo pode ter de aplicar de acordo com a expressão (3.16). Se o valor da aceleração calculado for demasiado elevado, uma maneira de se limitar a exposição dos veículos e dos seus conteúdos a forças  $G$  elevadas, tendo como fim o conforto dos passageiros, a segurança dos bens materiais a serem transportados ou assegurar que a aderência do veículo ao piso não falha, é aumentar o comprimento da zona de controlo, o que irá aumentar a velocidade mínima e diminuir a aceleração máxima.

### 3.3.3. CÁLCULO DA CAPACIDADE DA INTERSEÇÃO

Sabendo-se o desfasamento temporal mínimo entre dois veículos, nas secções de entrada e saída, é possível calcular as restrições de volume de trânsito nessas mesmas secções. Usando o desfasamento temporal mínimo, conseguido em (3.28), um veículo dá entrada na zona de controlo a cada  $\frac{2 \times (l_{m\grave{a}x} + MS)}{v_{i_n}}$  segundos e o volume máximo de trânsito, em veículos por hora, para cada entrada é obtido segundo (3.32).

$$\frac{2 \times (l_{m\grave{a}x} + MS)}{v_{i_n}} [s/ve\acute{i}] = \frac{1}{\frac{2 \times (l_{m\grave{a}x} + MS)}{v_{i_n}}} [ve\acute{i}/s] = \frac{3600}{\frac{2 \times (l_{m\grave{a}x} + MS)}{v_{i_n}}} [ve\acute{i}/h] \quad (3.32)$$

A capacidade da interseção é dada pelo fluxo máximo de veículos que podem atravessar a interseção por hora[46], que no caso do sistema de controlo proposto vai corresponder à soma do volume máximo admitido para todas as entradas da interseção. Tendo uma interseção duas entradas, a sua capacidade será o dobro do valor do calculado com recurso a (3.32).

## 3.4. VANTAGENS

O tipo de sistema de controlo proposto apresenta, a nível teórico, vantagens notáveis em relação a outros sistemas de controlo.

Em situações de muito pouco trânsito, os veículos receberão permissão de passagem, da mesma forma que um sistema com distribuição no tempo dinâmico completamente atuado, não havendo tempo de atraso nenhum. No entanto também não é introduzido tempo de atraso se os veículos aparecerem de forma a não serem causadas colisões, podendo isto acontecer até, com o volume máximo de trânsito permitido em todas as entradas, ou seja à capacidade máxima da interseção, se os veículos que iniciam cada pelotão surgirem desfasados entre si, a mesma quantidade de tempo, que aplicariam se entrassem ao mesmo tempo, não sendo desta maneira aplicados atrasos a nenhum dos veículos.

O sistema de controlo proposto garante também que não se dá formação de filas e as variações de velocidade experimentadas pelos veículos são minimizadas, reduzindo as acelerações e conseqüentemente: sendo menor a energia gasta pelos veículos, em comparação com outros sistemas de controlo e sendo também mais confortável para os passageiros e reduzindo a possibilidade de falhas de aderência ao pavimento em que os veículos se deslocam.

### 3.5. DESVANTAGENS

Também existem, em comparação com outros sistemas de controlo, desvantagens a considerar.

Como provado pela equação (3.24), é possível que uma interseção apenas com trânsito proveniente de uma via obrigue todos os veículos a implementar um atraso temporal, algo que não aconteceria num sistema com distribuição no tempo dinâmico completamente atuado.

Esta proposta não está dimensionada para interseções que permitam viragens. Se tais viragens fossem consideradas seria desde já necessário reduzir o limite de volume de trânsito nas entradas. Exemplificando para uma interseção de duas entradas, se os veículos convergirem todos para a mesma saída, o volume de trânsito nessa saída será a soma do volume de ambas as entradas, sendo assim na saída que se presencia o volume máximo, que será exatamente igual à capacidade da interseção. Em cada entrada o limite de volume terá de ser igual à capacidade da interseção dividida pelo número de entradas, que se podem concentrar na saída, ou seja metade dela e em comparação metade do que seria se não fossem permitidas viragens. Para além disto os veículos ao virarem dentro da interseção, possivelmente terão de reduzir a sua velocidade para não correrem o risco de perderem tração, se assim for, isso irá aumentar os tempos de atraso dos veículos que evitem colisões com eles, obrigando à redução da capacidade da interseção e por sua vez a reduzir ainda mais o volume máximo aceite em cada entrada.

Para o sistema aqui proposto não estão contempladas situações de incidentes. Tais

situações iriam forçosamente obrigar à paragem do funcionamento do sistema para evitar possíveis acidentes em cadeia, por os veículos estarem a seguir os movimentos pré-definidos pelo sistema e não estarem a avaliar aquilo em seu redor. A interseção teria de passar a ser controlada por outro tipo de controlo, podendo eventualmente o sistema proposto retomar funcionalidade, quando as condições de trânsito forem favoráveis, nomeadamente com um baixo volume de trânsito.

Os tipos de movimento que os veículos têm de produzir, são muito restritivos, especialmente durante a travessia da zona de controlo, a implementar um tempo de atraso, pelo que é muito fácil serem feitos incumprimentos, podendo resultar em tempos de atraso efetivos diferentes dos exigidos pelo sistema, o que será muito problemático. Nenhum veículo pode tentar resolver algum incumprimento, por exemplo de distância de separação, reduzindo a velocidade de forma a andar a menos que a velocidade de cruzeiro, o que levará todos os veículos atrás de si a abrandarem e acabando todos em incumprimento da velocidade mínima de circulação. Poderá talvez ser solução as posições dos veículos estarem sincronizadas em pelotão e não só em relação ao veículo à sua frente, sendo eles informados de forma a, se um veículo  $F$  estiver a aproximar-se demasiado daquele à sua frente, o  $D$ , o que estiver atrás de si, o  $G$ , seja informado para ceder maior distância de separação, de forma a mais tarde o veículo em incumprimento  $F$ , poder afastar-se lentamente do veículo  $D$  e não por em causa o correto posicionamento do veículo atrás de si, o  $G$ .

Por último o sistema aqui proposto não foi dimensionado para permitir a cedência de passagem a peões nem ciclistas em passadeiras, nas imediações da interseção. Essas passagens teriam de ser feitas por caminhos subterrâneos e/ou viadutos.

## 4. RESULTADOS

Este capítulo tem como função expor resultados numéricos, que permitam uma avaliação do sistema de controlo proposto no capítulo anterior. Para isso, é em primeiro lugar, explicado o programa de *software* desenvolvido. Este é utilizado para simular o sistema de controlo proposto, para diferentes condições de trânsito e permite após a simulação, a obtenção de resultados, como por exemplo o tempo de atraso médio dos veículos simulados. O programa de simulação, também permite serem feitas simulações, utilizando semáforos para controlo da interseção, sendo também explicadas as diferenças quando o programa simula cada um dos sistemas de controlo.

Apresentam-se também, as características dimensionais do ambiente de simulação.

Por fim, são explicadas quais as simulações realizadas e são tabelados os resultados delas, sendo comparados os resultados obtidos quando se simula o sistema proposto, com os resultados obtidos quando se simula o sistema com semáforos.

## 4.1. SIMULADOR

Para que fosse feita uma avaliação comparativa entre o sistema de controlo proposto no capítulo 3. e um sistema de controlo com recurso a semáforos, foi desenvolvido um programa de *software* de simulação. O *software* executa as seguintes tarefas:

- parametrização - ler argumentos introduzidos pelo utilizador e alterar o valor de variáveis em conformidade, para que seja simulado o que o utilizador pretende;
- representação gráfica - começando por ser feitas inicializações com recurso a chamadas a funções das bibliotecas utilizadas, para depois ser possível representar o estado do ambiente de simulação, para todos os instantes de simulação;
- receber e processar eventos - são esperados eventos de teclado para: início e término da simulação, início e paragem da representação de uma simulação já feita e terminação do programa;
- simulação do movimento dos veículos - as características de aceleração, velocidade e posição dos veículos, são atualizadas a cada passo de simulação, dependendo da secção onde se encontram, do tipo de controlo a reger a interseção e do veículo à sua frente;
- simulação do sistema de controlo - é simulado o tipo de controlo proposto no capítulo 3, tal como um sistema de controlo com semáforos pré-temporizado;
- exporta dados dos veículos depois de cada simulação - são guardados em ficheiros, os dados de todos os veículos presentes em cada passo de simulação;
- exporta gráficos com variações de aceleração e velocidade - depois de um veículo sair do ambiente de simulação, é gerado um gráfico que mostra a variação da sua aceleração ao longo do tempo e um gráfico para a variação da sua velocidade, contendo ainda o gráfico de aceleração a quantidade de energia consumida pelo veículo.

Algumas destas tarefas são feitas por processamento em paralelo, com recurso a *threads*, com objetivo de acelerar a finalização das tarefas. O programa está para isso, dividido em três funções, a função principal `main`, a função de temporização `timing` e a função de zona `thzone`.

#### 4.1.1. FUNÇÃO PRINCIPAL

A função principal faz a parametrização quando o programa se inicia, começando por identificar e quantificar os parâmetros indicados pelo utilizador, que irão definir características: do trânsito, nomeadamente o trânsito a entrar; individuais dos veículos que se vão integrar no ambiente de simulação; das vias que se intersejam e do sistema de controlo a regular a interseção. Os parâmetros são introduzidos por argumentos na linha de comandos, sendo os valores numéricos indicados no argumento seguinte e na sua ausência são utilizados valores por defeito, que estão indicados na tabela 7.

**Tabela 7 Argumentos aceites na linha de comandos, pelo programa de simulação.**

<b>Argumento(s)</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor por defeito</b>
--control	Quando é utilizado o sistema de controlo proposto, os veículos são introduzidos diretamente no posto de controlo	falso
-c		
--semaphore	A interseção vai ser controlada por semáforos.	falso
--man	Quando é utilizado o sistema de controlo proposto, é introduzida uma sequência de veículos que demonstre o tempo de atraso máximo e o veículo nº 5 a atravessar na interseção à frente do veículo nº 4.	falso
--no-graphics	Quando indicado, no final da simulação não serão gerados gráficos de velocidade e aceleração para os veículos que saíram do ambiente de simulação.	falso
--pred	Quando um veículo segue outro, fá-lo à distância mínima.	falso
--entrys <u>E</u>	Define que a interseção vai ter <u>E</u> entradas, pode ter 2 ou 4.	2
--entime[ <u>E</u> ] <u>I</u>	Define que pelo menos a cada <u>I</u> milissegundos (se houver uma distância de separação suficiente) se dá a entrada de um novo veículo em cada entrada. O intervalo de tempo fica definido apenas para a entrada <u>E</u> se for especificada.	0 ms (os veículos entram assim que tiverem uma distância de separação suficiente)

--dmin-cm <u>M</u>	Define que a distância de separação mínima entre veículos é de <u>M</u> centímetros.	1450 cm
--d-cm <u>D</u>	Quando é utilizado o sistema de controlo proposto, o comprimento da zona de controlo fica definido para <u>D</u> centímetros.	4000 cm
--dbreak-cm <u>B</u>	Quando são utilizados semáforos, os veículos em fila de espera param a <u>B</u> centímetros da traseira do veículo à sua frente.	150 cm
--lmax-cm <u>L</u>	Estabelece o comprimento máximo, em centímetros, dos veículos utilizados em simulação.	402 cm
--vn-kmph <u>V</u>	A velocidade de cruzeiro dos veículos será de <u>V</u> quilómetros por hora.	54 km/h
--amax-mmpss <u>A</u>	A aceleração máxima que um veículo pode praticar fica limitada a <u>A</u> milímetros por segundo quadrado.	4908 mm/s <sup>2</sup>
--amin-mmpss <u>D</u>	A desaceleração máxima que um veículo pode praticar fica limitada a <u>D</u> milímetros por segundo quadrado.	-9816 mm/s <sup>2</sup>
--safe-cm <u>S</u>	Quando é utilizado o sistema de controlo proposto, a margem de segurança utilizada durante a verificação de colisões é de <u>S</u> centímetros.	500 cm
--red <u>R</u>	Quando são utilizados semáforos, as fases ficam sem permissão de passagem durante <u>R</u> segundos por ciclo.	30 s
--yellow <u>Y</u>	Quando são utilizados semáforos, é ativa a luz amarela <u>Y</u> segundos antes do início da luz vermelha.	3 s

A função `main` também processa eventos vindos do teclado. Esses são tratados com recurso a um servidor *Wayland*[61], sendo para isso necessário estabelecer-se, em primeiro lugar, uma ligação ao *socket* do servidor *Wayland*, que vai permitir que sejam enviadas e recebidas mensagens protocolares, entre o programa de simulação e o servidor *Wayland*, feita com a obtenção de uma referência para o objeto global `wl_display*` com uma chamada da função `wl_display_connect`. De seguida é necessária uma referência ao objeto global de registos, `wl_registry*`, para que se possa obter a lista e usufruir dos objetos globais, aos quais o servidor tem acesso e que

representam dispositivos de *hardware*, que é obtida com uma chamada da função `wl_display_get_registry`. Depois de o programa ter uma referência ao objeto global de registos, este reporta um evento para cada objeto global a que o servidor *Wayland* tenha acesso e de entre estes eventos é procurado um objeto global do tipo `wl_seat*`, que serve de interface a dispositivos de entrada, como é o caso do teclado. A referência ao objeto `wl_seat*`, é obtida com a chamada da função `wl_registry_bind`, que indica ao servidor que o programa vai utilizar o objeto `wl_seat*`, de seguida são reportados os tipos de dispositivos de entrada que são suportados por este e se for identificado um teclado é obtida uma referência com uma chamada da função `wl_seat_get_keyboard`, podendo-se por fim definir funções a serem chamadas quando forem detetados eventos no teclado.

Quando uma tecla do teclado for pressionada um evento é emitido e na função chamada em sua resposta, é identificada a tecla que despoleta o evento e com essa informação são procuradas as seguintes teclas e são feitas as respetivas alterações ao programa:

- S - inicia uma nova simulação e a sua representação ou termina a simulação em curso e também a sua representação. Se estiver só uma representação em curso esta é terminada e apresentado o passo de simulação inicial;
- R - se a representação estiver parada ela é resumida a partir do passo de simulação atual, se a representação estiver a correr ela fica em pausa, permanecendo no último passo de simulação representado. Quando houver uma simulação a decorrer nada se altera;
- I - altera o estado de representação dos números identificativos dos veículos, ativando se desativo e desativando quando ativo, quer com a representação a correr como com a representação em pausa;
- ← - seleciona para edição, o dígito à esquerda do atual, de entre os que representam o passo de simulação;
- → - seleciona para edição, o dígito à direita do atual, de entre os que representam o passo de simulação;
- ↓ - se não houver simulação nem representação a decorrer, diminui o valor do dígito em edição, dos que representam o passo de simulação;
- ↑ - se não houver simulação nem representação a decorrer, aumenta o valor do

dígito em edição, dos que representam o passo de simulação;

- Esc - esta tecla ao ser pressionada termina qualquer simulação ou representação em curso e posteriormente fecha o programa em si.

A função principal é também aquela que efetua a representação, numa janela no monitor, do ambiente de simulação. É feito para isso recurso de dois objetos globais reportados pelo objeto global de registos do servidor *Wayland*, aos quais é obtida referência, tal como feito para o `wl_seat*`, por chamada da função `wl_registry_bind`. Um deles é o `wl_compositor*`, responsável pela aglomeração dos *pixeis* das várias janelas do servidor gráfico no(s) monitor(es) do computador. O compositor vai permitir criar uma superfície de desenho que é preenchida, ao ser associada a um conjunto de *pixeis*, reservando a quantidade de memória necessária, à qual os clientes têm acesso direto para “pintarem” os *pixeis*. A referência à superfície de desenho é gerada com chamada da função `wl_compositor_create_surface`. É também utilizado o objeto `wl_shell*`, que vai permitir criar janelas do tipo *desktop*, no monitor, às quais pode ser associada uma superfície de desenho. Isso é feito no programa para se associar a superfície obtida pelo compositor a uma janela deste tipo, com chamada da função `wl_shell_get_shell_surface`. Passando o compositor a saber que, os valores de *pixeis* introduzidos na superfície de desenho, têm de ser apresentados no monitor dentro desta janela. Para o preenchimento efetivo dos *pixeis* é utilizada a *Khronos Native Platform Graphics Interface* (EGL)[62], que estabelece uma ligação entre bibliotecas de desenho e servidores gráficos, sendo neste programa feita uma associação entre a biblioteca de desenho, com recurso a *hardware* gráfico, OpenGL ES[63] e a superfície de desenho obtida do compositor *Wayland*. Obtém-se uma janela EGL com uma chamada da função `wl_egl_window_create`, sendo especificada a superfície de desenho *Wayland* e as dimensões pretendidas de largura e de altura em *pixeis*, com a qual vai ser depois feita a associação entre o espaço de memória com os valores dos *pixeis*, proveniente do compositor *Wayland* e as instruções de desenho OpenGL ES. É ainda necessário associar o *socket* do servidor *Wayland* a um `EGLDisplay`, para o servidor receber informação da implementação EGL, por exemplo de quando o desenho de um *frame* estiver terminado para o compositor poder atualizar os *pixeis* no monitor. As instruções de desenho são aplicadas numa superfície de desenho EGL (`EGLSurface`), a qual tem associados

parâmetros de configuração (`EGLConfig`) sobre os *buffers*, que contém os valores dos *pixeis*, nomeadamente o número de bits por cor. De entre os `EGLConfig` disponibilizados pela implementação EGL é escolhido um que tenha especificamente, um tamanho dos *pixeis* com oito bits por cor sem transparência e que o seu parâmetro `EGL_SURFACE_TYPE`, tenha o bit `EGL_WINDOW_BIT` a 1, identificando que pode ser utilizado numa superfície de desenho, que corresponda a uma janela. As configurações são associadas à janela EGL chamando-se a função `eglCreateWindowSurface`, que retorna uma superfície EGL, pronta para desenho. O mesmo `EGLConfig` é utilizado para gerar um contexto de desenho OpenGL ES e por fim, para se poder executar instruções de desenho, tem de ser feita uma chamada à função `eglMakeCurrent`, que vai associar, a `EGLSurface` e o contexto de desenho OpenGL ES, à *thread* que executa a função `main`. Passando todas as chamadas, de dentro da *main*, a funções da biblioteca OpenGL ES, a fazer efeito e quando estiver terminado um *frame* e se pretenda apresentá-lo na janela, faz-se uma chamada à função `eglSwapBuffers`, que indica ao compositor para atualizar o conteúdo da janela.

Durante as representações são desenhadas as duas vias por onde os veículos se deslocam, a cor preta, com uma reta de *pixeis* cinzentos a separar as duas faixas de trânsito da mesma via e mais um no centro da interseção no caso de haverem 4 entradas, como mostrado na figura 19. Do lado direito e ao longo de cada faixa de trânsito, é desenhado um retângulo, para se diferenciarem as várias secções, por onde o veículo passa, estando a azul o retângulo ao lado de uma secção inicial, a violeta o retângulo ao lado de uma zona de controlo e a ciano o retângulo ao lado de uma secção de saída, como também visível na figura 19.



**Figura 19** Representação de um ambiente de simulação, com 4 entradas e 10 veículos em simulação.

No canto superior direito é mostrado a cor verde, em segundos, qual o passo de simulação representado na janela, havendo ainda um pequeno retângulo vermelho, a servir de indicativo por debaixo do dígito a ser editado, quando não houver nenhuma simulação nem representação em curso, visível na figura 19. O passo de simulação representado é atualizado de forma contínua, quando estiver a ser feita uma simulação ou uma representação e é também atualizado assim que for feita uma edição do passo de simulação, utilizando as teclas do teclado ↓ ou ↑.

Enquanto um veículo estiver presente no ambiente de simulação será representado na

janela, estando os veículos desenhados como um retângulo e sendo coloridos de vermelho quando estiverem a acelerar, de verde quando estiverem a desacelerar e de amarelo se tiverem aceleração igual a zero, para uma melhor percepção do seu comportamento. Ao lado dos veículos, do lado de onde está o retângulo colorido, identificador da secção da faixa de trânsito sobre a qual se deslocam, será mostrado o seu número identificativo, na mesma cor que o veículo, quando essa opção estiver ativa com o pressionar da tecla I.

No caso de estarem a ser utilizados semáforos, é feita ainda a representação de um, imediatamente antes de cada uma das entradas para a interseção, com cada uma das suas três luzes desenhada como um quadrado, na ordem verde, amarela e vermelha no sentido para a interseção, ficando de cor cinzenta escura cada luz que esteja apagada.

Sempre que for emitida ordem para uma nova representação ou simulação, a função principal lança uma *thread* a executar a função `timming`, com dois *pipes* em argumento, para comunicação bidirecional entre as duas funções.

#### 4.1.2. FUNÇÃO DE TEMPORIZAÇÃO

A função de temporização efetua, o sincronismo dos passos de simulação. Quando só for pretendida uma representação, esta função espera apenas o tempo de um passo de simulação, com recurso ao *timeout* da função `pselect`, enviando informação por um dos *pipes*, para despoletar a representação do próximo passo de simulação por parte da `main`. Nas situações em que esteja a ser feita uma nova simulação, a função de temporização vai lançar *threads* a executarem a função `thzone`, dependendo do número de entradas que hajam para a interseção, partilhando todas um conjunto de *pipes* para sincronização e comunicação com a função de temporização. A estas *threads* de zona, é indicado, por parte da função de temporização, para efetuarem as atualizações do estado dos veículos, que estão numa secção específica de uma faixa de trânsito. Depois de todas essas *threads* terem completado as atualizações e terem utilizado os *pipes* de comunicação para informar a função de temporização, esta vai verificar, com as novas posições dos veículos, se algum precisa de ser removido do ambiente de simulação, mudou de secção, ou tem de ser adicionado. Só depois disto é que é enviada a

informação necessária para a função principal efetuar a representação, do passo de simulação recentemente terminado.

A função de temporização é também aquela que implementa o controlo do acesso à interseção, depois de as *threads*, a executarem a função de zona, atualizarem a posição de cada veículo. No caso de a interseção estar a ser controlada por semáforos, é no fim de cada passo de simulação, decrementado um contador de tempo e quando o valor deste for igual a zero, indica que o estado de pelo menos um dos semáforos precisa de ser atualizado. Para controlar as duas vias, são utilizados dois ou quatro semáforos, dependendo do número de entradas para a interseção, mas em ambas as situações só existem duas fases, levando a que no programa só exista necessidade de dois semáforos a serem simulados, identificando cada um deles o estado dos dois em entradas opostas da interseção, quando estiverem a ser simuladas quatro entradas.

Se estiver a ser simulado o tipo de controlador proposto neste trabalho, este é decidido para cada veículo, quando a frente deste atravessar o início da zona de controlo, o que simula o veículo a passar pelo posto de controlo. É em primeiro lugar avaliada uma possível colisão com o veículo imediatamente à sua frente, pois não se justifica começar por avaliar e evitar outras colisões, às quais o veículo se possa vir a esquivar quando for evitada a colisão com o veículo à sua frente. Começa por ser calculado o tempo que o veículo, a entrar na zona de controlo, demorará a chegar à entrada da interseção, assumindo uma velocidade média igual à velocidade de cruzeiro. Os veículos estão todos indexados em vetores distintos, consoante a secção e a faixa de trânsito em que se encontram, sendo presentes os veículos dentro da zona de controlo e os dentro da zona da interseção, num mesmo vetor. É então de seguida, procurado o veículo da frente, que será o último veículo a ser introduzido no vetor dos veículos na zona de controlo e na zona da interseção onde vai ingressar o veículo a ser testado. Se nenhum veículo estiver presente não há colisão de traseira a ser evitada e o programa prossegue para verificações de colisões laterais, sem adicionar nenhum tempo de atraso. Havendo um veículo presente, é calculado o quanto esse está adiantado, em relação ao veículo a ser controlado. O cálculo é feito para quando o veículo, a passar no posto de controlo, chegar com a sua frente ao início da zona de interseção, podendo isto ser feito porque há sempre o valor atualizado de quanto falta, em tempo, para cada veículo chegar à entrada da

interseção. Se se verificar que o veículo da frente ainda está fora da interseção quando o veículo de trás estiver a entrar na interseção, o programa avança para o cálculo do tempo de atraso necessário implementar. Caso contrário é calculado em distância a quanto corresponde o seu adiantamento ( $d_n(t_{n+1}) - d_{n+1}(t_{n+1})$ ), ao se multiplicar a diferença dos tempos de entrada na interseção, dos dois veículos, pela velocidade de cruzeiro e comparando com a soma do comprimento do veículo da frente, com a distância de separação mínima, sendo desta forma o teste da existência de colisão de traseira feito de acordo com a forma inicial da condição (3.21). Se o teste for verdadeiro, o programa avança para verificações de colisões laterais, sem ser adicionado nenhum tempo de atraso. Se o teste for falso é feito o cálculo do tempo de atraso necessário implementar pelo veículo, que é calculado pela equação (4.1) e que é adicionado ao tempo que falta para o veículo chegar à entrada da interseção.

$$t_{a_{n+1}} = \frac{(ds_{min} + l_n) - (d_n(t_{n+1}) - d_{n+1}(t_{n+1}))}{v_{i_{n+1}}} . \quad (4.1)$$

Uma vez evitada a colisão de traseira com o veículo da frente, são iniciadas as verificações de colisão lateral, com veículos das outras faixas de trânsito. Procede-se para o próximo vetor, que indica os veículos na zona de controlo e na zona da interseção e é verificado se contém algum veículo, avançando-se no caso de estar vazio para a verificação do vetor seguinte. Havendo algum veículo no vetor, verifica-se se o vetor se refere a veículos movimentando-se na mesma via e no sentido oposto, caso no qual não é possível colisão e o programa segue para a verificação do próximo vetor. Se for um dos outros, é feito o cálculo da distância até ao ponto de colisão, para ambos os veículos ( $S_n$  e  $S_{n+1}$ ), consoante o número de entradas para a interseção e as entradas em causa, sendo no caso de duas entradas ambas as distâncias iguais a metade da largura da faixa de trânsito e no caso de quatro entradas, caso correspondente ao ilustrado na figura 17, uma das distâncias igual a metade da largura da faixa de trânsito e a outra igual a 1,5 vezes metade da largura da faixa de trânsito, dependendo da entrada por onde vai surgir o outro veículo. A verificação de colisão lateral é feita de forma análoga à de colisão de traseira, sendo calculado o adiantamento do último veículo a ingressar no vetor, em relação ao veículo a passar no posto de controlo. Se o veículo a passar no posto de controlo estiver atrasado em relação ao outro, é verificado se consegue passar atrás dele, tendo em conta

as distâncias ao ponto de colisão, a margem de segurança e o comprimento do veículo mais adiantado. Se conseguir passar por trás prossegue-se para o próximo vetor de veículos. Senão é calculado o tempo de atraso necessário, para evitar a colisão passando por trás, segundo a equação (4.2).

$$t_{a_{n+1}} = \frac{(s_n + l_n + MS - s_{n+1}) - (d_n(t_{n+1}) - d_{n+1}(t_{n+1}))}{v_{i_{n+1}}} . \quad (4.2)$$

No caso de o veículo a passar no posto de controlo, estar adiantado em relação ao outro, é verificado se consegue passar à frente dele, tendo em conta as distâncias ao ponto de colisão, a margem de segurança e o comprimento do veículo, a passar no posto de controlo. Nas situações em que isso não é possível, a colisão tem de ser evitada de forma ao veículo passar por trás, com um tempo de atraso dado por (4.2). Havendo a possibilidade de passar, em segurança, à frente do outro veículo, surge a necessidade de se verificar se há colisão lateral com o penúltimo veículo presente no vetor. Não estando presente mais nenhum veículo neste vetor, não há risco de colisão e procede-se para o vetor seguinte. Sendo encontrado outro veículo, o programa obtém o valor de quanto tempo este demora a chegar à entrada da interseção e reinicia a verificação de colisão lateral para o mesmo vetor, como se este veículo fosse o último.

Sempre que for adicionado um tempo de atraso ao tempo que o veículo a ser testado demora a chegar à entrada da interseção, a verificação de colisão lateral recomeça para o primeiro vetor de veículos, para se assegurar que se este novo atraso fizer com que, uma colisão anteriormente eludida, passe a precisar de ser evitada, esta não passe despercebida. Quando o próximo vetor a ser verificado, for o mesmo onde vai ingressar o veículo a ser testado, está concluída a verificação de colisões laterais e ao mesmo tempo todas as possíveis colisões, sendo nesta altura calculada a velocidade média a que o veículo vai atravessar a zona de controlo e de seguida a velocidade mínima que vai alcançar dentro da zona de controlo.

A função de temporização verifica, depois de todos os veículos estarem atualizados, se algum precisa de ser removido do ambiente de simulação, por ter alcançado o fim deste. Cada faixa de trânsito simulada possui um comprimento de 300,5 metros, e um veículo é considerado fora de simulação assim que a sua extremidade traseira, passar a saída, ou

seja, quando a sua posição for superior ou igual a 300,5 metros mais o comprimento do veículo.

É também nesta função que os veículos são introduzidos no ambiente de simulação. No caso de ter sido especificado o argumento "--man" numa simulação do sistema de controlo proposto, os cinco veículos a simular são introduzidos logo antes de ser feito o primeiro passo de simulação, e não será adicionado mais nenhum para o resto da simulação. Nas outras situações, sendo especificado com o argumento "--entime", um tempo máximo sem adição de um novo veículo, é calculado, uma vez no início da simulação e imediatamente depois da adição de um novo veículo, o próximo passo de simulação no qual vai ser introduzido o veículo seguinte, recorrendo-se a um valor aleatório. Quando o passo de simulação calculado estiver processado, vai-se verificar se a distância, que vai desde o início do ambiente de simulação (0 m) até à extremidade traseira do último veículo da faixa de trânsito, é suficiente para permitir a introdução do novo veículo em segurança. Se assim for o veículo é introduzido e é calculado o passo de simulação no qual vai ser introduzido o próximo veículo. Senão a adição do veículo tem de ser inevitavelmente adiada, para quando a distância requerida estiver disponível atrás do último veículo da secção de entrada. Desta maneira é possível fazer a introdução de veículos a um volume compreendido entre dois valores, maior que o valor imposto pelo tempo indicado com o argumento "--entime" e menor que o limite superior estabelecido pela distância mínima de separação.

Não sendo indicado nenhum argumento "--entime", o próximo veículo é introduzido quando o último veículo da faixa se tiver afastado a distância mínima.

Quando não for indicado o argumento "--no-graphics", a função de temporização vai exportar gráficos com as variações de aceleração e de velocidade, ao longo do tempo, dos veículos que saírem do ambiente de simulação. No gráfico de variação da aceleração é também apresentada a quantidade de energia consumida pelo veículo, sendo utilizadas para o seu cálculo, todas as acelerações positivas efetuadas. Note-se que não são simuladas perdas no movimento dos veículos, sendo por exemplo, o consumo de energia de 0 Joules, quando um veículo mantiver sempre a mesma velocidade, durante todos os passos de simulação até à sua saída de simulação. Como também não é simulada a massa

dos veículos, o resultado é apresentado em Joules por Kilograma. Os gráficos são gerados só no fim da simulação, antes de ser comunicado à função principal, que a *thread* a executar a função de temporização, concluiu.

#### 4.1.3. FUNÇÃO DE ZONA

A função de zona faz a simulação do movimento dos veículos de uma ou mais secções da mesma faixa de trânsito. Cada *thread* recebe por um *pipe*, indicação de por qual conjunto de veículos fica responsável de processar e fá-lo quando a função de temporização lhe indicar, recebendo essa indicação também por *pipe*. Por sua vez a função de zona reporta à função de temporização, cada veículo que já processou e também quando já não tem mais para processar, ficando nessa altura à espera de nova ordem para processamento.

O processamento dos veículos é feito desde o último a entrar na secção, a ser processada, até ao veículo que está na secção à mais tempo. Cada veículo possui uma referência para a distância percorrida pelo veículo à sua frente, tal como o comprimento deste, que utiliza para calcular a distância de separação[60] e comparando com a distância a que deve estar, determinar se e como deve alterar o seu movimento.

No caso de estarem a ser simulados semáforos os veículos tentam alcançar a velocidade de cruzeiro a não ser que tenham um veículo à sua frente, situação na qual vão procurar manter uma distância de separação, que lhes permita alcançar a velocidade de 0 m/s, travando à sua capacidade de travagem máxima, sem alcançarem a posição onde está a extremidade traseira do veículo à sua frente. Quando se dá a mudança da luz do semáforo, de verde para amarela, é testado se o último veículo da secção de entrada, aquele mais próximo do semáforo, consegue parar antes de entrar na zona de intersecção, utilizando apenas metade da sua capacidade de travagem máxima. Não sendo possível, o veículo vai prosseguir como os outros antes de si, para dentro da intersecção e é feito o mesmo teste, para o veículo que o está a seguir. Se conseguir travar a tempo, é adicionado na referência para a distância percorrida pelo veículo à sua frente, um valor, que simula um veículo imaginário, parado no início da zona de intersecção, e na referência para o seu comprimento é guardado o valor de 3 cm, vindo a forçar o veículo a travar e cessar o movimento antes de alcançar a zona de intersecção. Quando a luz do semáforo passa de vermelha para verde, as referências para o veículo imaginário são removidas e o veículo,

que estava parado, volta a comportar-se como antes. Sempre que um veículo alcançar a velocidade de 0 m/s vai, à exceção do primeiro veículo parado no semáforo e que segue um veículo imaginário, formar pelotão com o veículo à sua frente, significando isto que vai imitar, de aí em diante, todas as variações de aceleração que o veículo à sua frente fizer, com o intuito de fazer os veículos demorar menos tempo a arrancarem e a alcançarem a velocidade de cruzeiro. É de salientar que quando um veículo está a movimentar-se a uma velocidade menor ou igual a um quarto da velocidade de cruzeiro, é adicionada à distância necessária para alcançar a velocidade de 0 m/s, a distância definida pelo argumento "--dbreak-cm", para que no caso de o veículo parar, não estar "colado" àquele à sua frente. Quando um veículo estiver dentro da interseção e até sair do ambiente de simulação, vai comportar-se da mesma maneira como fazia quando estava na secção de entrada.

Nas simulações com o tipo de controlo proposto, o movimento dos veículos é significativamente diferente, se comparado com aquele implementado com semáforos. O ponto da faixa de trânsito, onde os veículos começam a cumprir a distância de separação mínima e a velocidade de cruzeiro obrigatória, é assumido estar em posição anterior à entrada para o ambiente de simulação, pelo que não é simulada a passagem de trânsito nesse ponto. Por causa disto, quando os veículos entram no ambiente de simulação, já estão separados por uma distância suficiente e deslocam-se à velocidade de cruzeiro, não havendo necessidade de alterarem as suas posições em relação aos veículos à sua frente. Quando o veículo da frente der entrada na zona de controlo, a referência para a sua posição atual e comprimento são removidas pela função `timming`, comportando-se o veículo seguidor como se não tivesse nenhum veículo à sua frente, fazendo desta forma com que não abrande para tentar manter a distância de separação mínima, no caso de o veículo na zona de controlo estar a implementar algum atraso. Enquanto um veículo estiver dentro da zona de controlo ou dentro da zona de interseção, o seu movimento é diferente do praticado nas outras secções da faixa de trânsito. Quando dentro da zona de controlo a posição do veículo varia obedecendo unicamente ao tipo de movimento instruído para si, pelo sistema de controlo, ignorando a posição de todos os outros veículos, quer da mesma faixa de trânsito quer de outras, sendo a velocidade reduzida até ser alcançada a velocidade mínima (se esta for menor que a velocidade de cruzeiro),

quando a frente do veículo estiver a meio da zona de controlo e posteriormente acelerando até ser alcançada a velocidade de cruzeiro aquando da entrada para a zona de interseção. Uma vez dentro da interseção, a velocidade de cruzeiro é mantida até que a extremidade traseira do veículo saia da interseção, mais uma vez sendo sempre ignorada a posição dos outros veículos. Ingressando na secção de saída o veículo vai, tal como na secção de entrada, estar separado por uma distância suficiente em relação àquele à sua frente, não precisando de implementar variações de velocidade.

## 4.2. AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Em todos os ambientes de simulação, o comprimento das faixas de trânsito, desde a entrada até à saída é de 300,5 m e a largura das faixas de trânsito é de 4,5 m, levando a que o comprimento da zona de interseção seja de 4,5 m, quando só houverem duas entradas para a interseção e de 9,5 m, quando houverem quatro entradas, este último por haverem duas faixas de trânsito em cada via, e uma linha de separação com meio metro entre elas. Em consequência disto as distâncias aos pontos de colisão da interseção são de 2,25 m, quando estiverem a ser simuladas duas entradas e quando estiverem a ser simuladas quatro entradas, os pontos de colisão estão a 2,25 m ou a 7,25 m da entrada da interseção.

A largura dos veículos é sempre fixada para ser 2,5 m.

## 4.3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA DO SISTEMA PROPOSTO

Antes de serem feitas simulações, é necessário definir quais as medidas de avaliação que são úteis para avaliar o sistema de controlo e ao mesmo tempo, que se conseguem obter do simulador desenvolvido.

A avaliação da qualidade de um sistema de controlo de trânsito, é feita utilizando vários tipos de medidas, havendo de entre elas quatro que são utilizadas de forma mais comum

[44], que são:

- o número de paragens - quantidade de vezes que os veículo são obrigados a parar;
- o tempo de atraso - tempo adicional de viagem experimentado por um condutor, passageiro ou pedestre[46];
- a duração da travessia - o tempo médio passado pelos veículo a atravessar um segmento de estrada, incluindo tempo de atraso devido a controlo, em segundos por veículo ou minutos por veículo[46];
- o comprimento de fila - número de veículos em fila quando estão parados.

Para poder ser feita uma comparação entre o sistema de controlo proposto e um sistema com semáforos, não é possível recorrer à medida do número de paragens nem do comprimento de fila, por no sistema proposto nunca haverem paragens e consequentemente não serem formadas filas de veículos parados.

É ainda obtido, no final de cada simulação, o somatório das variações positivas de energia cinética, para cada veículo, enquanto esteve presente no ambiente de simulação, resultante das diversas acelerações que praticou ao aumentar a velocidade. Esta será outra medida de comparação a utilizar.

A duração da travessia de um veículo, por uma dada secção de estrada, é conseguida registando-se os instantes de passagem entre um ponto de entrada e um ponto de saída da secção em estudo e obtendo o tempo passado entre os dois[60].

O tempo de atraso, que um veículo sofre durante a travessia de uma interseção, é medido, obtendo-se primeiro a duração da travessia para o veículo, quando este não for afetado pelo controlo da interseção e subtraindo esta à duração da travessia sendo o veículo influenciado pelo controlo da interseção[60]. Nos casos de estudo de interseções, os pontos onde são detetadas as passagens do veículo necessitam de estar suficientemente afastados da interseção, para que os veículos aí presentes não estejam a ser diretamente influenciados pelo controlo[60].

Para obtenção do tempo de travessia, sem influência de controlo, necessário para o cálculo do tempo de atraso, é executada uma simulação, que implemente um controlo

com semáforos, com uma duração de verde suficiente para permitir um veículo entrar, alcançar a interseção ainda com luz verde e sair do ambiente de simulação, sem nunca abrandar. Os pontos de medição do instante de passagem a utilizar são o ponto de entrada e o ponto de saída de simulação.

Aqui são apresentados resultados de várias simulações, em que o comprimento dos veículos vai ser variado desde o mínimo de 255 cm até ao máximo de 750 cm, com variações de 99 cm, e as velocidades de cruzeiro variam desde 54 km/h até um máximo de 90 km/h em intervalos de 18 km/h.

Para obtenção do tempo de travessia, sem influência de controlo, são feitas simulações com uma sequência de argumentos parecida com a seguinte:

```
--semaphore --red 250 --lmax-cm 255 --vn-kmph 54 --entrys 2
```

Variando apenas os valores de comprimento dos veículos e velocidade de cruzeiro de forma a serem cobertas todas as combinações da tabela 8. Uma vez que a distância entre a entrada e a saída do ambiente de simulação é idêntica, quer estejam a ser simuladas 2 ou 4 entradas, os valores tabelados de duração da travessia, são válidos para as duas situações.

**Tabela 8** Tempos de travessia, sem influência de controlo, para cálculo do tempo de atraso.

		Velocidade (km/h)		
		54	72	90
Comprimento dos veículos (cm)	255	20,20 s	15,15 s	12,12 s
	354	20,26 s	15,20 s	12,16 s
	453	20,32 s	15,24 s	12,20 s
	552	20,40 s	15,29 s	12,24 s
	651	20,46 s	15,34 s	12,28 s
	750	20,52 s	15,40 s	12,32 s

#### 4.3.1. SIMULAÇÃO COM O SISTEMA PROPOSTO

A largura dos veículo é sempre 2,5 metros, para todo o tipo de simulações, e é aplicada uma margem de segurança de 5 metros para todas as simulações, em que é implementando o sistema de controlo proposto.

Em todas as simulações implementando o sistema de controlo proposto, o comprimento da zona de controlo é sempre igual a 53 metros, uma vez que a sua alteração iria variar a velocidade mínima e conseqüentemente a energia consumida, não podendo esta depois servir de medida de comparação.

Utilizando o tipo de controlo proposto são feitas simulações, de modo a se obterem resultados para diferentes distâncias de separação, sendo sempre maiores ou iguais à mínima calculada com recurso a (3.29), mantendo-se para essas simulações o mesmo comprimento de veículo e a mesma velocidade de cruzeiro. Para essas simulações são utilizados os parâmetros seguintes, sendo alterados os valores de forma a ser preenchida a tabela 9:

```
--dmin-cm 1255 --lmax-cm 255 --vn-kmph 54 --pred --safe-cm 500  
--d-cm 5300 --entrys 2
```

**Tabela 9 Duração de travessia média, para diferentes distâncias de separação.**

Comprimento dos veículos (cm)	Distância de separação (cm)	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
		54	72	90
255	1255	20,45 s	15,34 s	12,27 s
	1655	20,45 s	15,34 s	12,27 s
	2055	20,45 s	15,34 s	12,27 s

Os valores médios medidos, de tempo de atraso, para as mesmas simulações são apresentados na tabelas 10.

**Tabela 10** Tempo de atraso médio, para diferentes distâncias de separação.

Comprimento dos veículos (cm)	Distância de separação (cm)	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
		54	72	90
255	1255	0,25 s	0,19 s	0,15 s
	1655	0,25 s	0,19 s	0,15 s
	2055	0,25 s	0,19 s	0,15 s

Os valores medidos, de volume de trânsito, para as mesmas simulações são apresentados na tabela 11. Uma vez que no início de cada simulação não há veículos presentes no ambiente de simulação, para o cálculo do volume de trânsito de saída, foi utilizado o intervalo de tempo iniciado no passo de simulação no qual se dá a remoção do primeiro veículo, até àquele no qual se dá a saída do último.

**Tabela 11** Volume de trânsito medido, para diferentes distâncias de separação.

Comprimento dos veículos (cm)	Distância de separação (cm)	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
		54	72	90
255	1255	7165 veí/h	9549 veí/h	11933 veí/h
	1655	5670 veí/h	7552 veí/h	9439 veí/h
	2055	4693 veí/h	6251 veí/h	7809 veí/h

Os valores médios medidos, de consumo de energia, para as mesmas simulações são apresentados na tabela 12.

**Tabela 12** Energia média consumida pelos veículos, para diferentes distâncias de separação.

Comprimento dos veículos (cm)	Distância de separação (cm)	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
		54	72	90
255	1255	24,4 J/Kg	43,3 J/Kg	68,0 J/Kg
	1655	24,4 J/Kg	43,2 J/Kg	68,0 J/Kg
	2055	24,4 J/Kg	43,3 J/Kg	68,0 J/Kg

Ao olhar para os resultados destas simulações é perceptível que a distância de separação não influencia o tempo de atraso e conseqüentemente não influencia nem a duração da travessia, nem a energia consumida. O que é concordante com (3.27), por o tempo de atraso não ter a distância de separação como termo, e só ser alterado com variação de comprimento do veículo, margem de segurança e/ou velocidade de cruzeiro.

A velocidade mínima é dependente, como provado em (3.4), do comprimento da zona de controlo, da velocidade de cruzeiro e do tempo de atraso, este último que já se viu não ser influenciado pela distância de separação. Sendo a energia consumida proporcional à diferença, entre a velocidade de cruzeiro e a velocidade mínima, a energia consumida é também ela não influenciada pela distância de separação, e é diretamente proporcional à velocidade de cruzeiro, como confirmam os resultados da tabela 12.

A única medida dos resultados que a distância de separação influencia é o volume de trânsito à saída, pois ao ser maior faz aumentar o desfasamento temporal entre entradas consecutivas de veículos, fazendo diminuir o volume de trânsito nas entradas. Como no sistema proposto o volume é idêntico, na entrada e na saída, o volume de trânsito nas saídas é inversamente proporcional à distância de separação.

#### 4.3.2. SIMULAÇÃO COM SEMÁFOROS

Para fins de comparação com os resultados das simulações anteriores, são feitas novas simulações utilizando controlo com semáforos. Nestas simulações com semáforos a serem implementados, os veículos mantêm-se a uma distância do veículo à sua frente, como dito anteriormente, que os permita alcançar a velocidade de 0 m/s, travando à sua capacidade de travagem máxima, sem alcançarem a posição onde está a extremidade traseira do veículo à sua frente. Esta distância é calculada multiplicando-se o tempo que o veículo demora a alcançar a velocidade de 0 m/s, pela velocidade média que pratica durante essa desaceleração. O tempo de travagem é conseguido dividindo a variação de velocidade, pela desaceleração máxima, que sabendo-se ser a velocidade final zero é correspondente à divisão da velocidade inicial pela desaceleração máxima. Uma vez que a desaceleração é constante durante toda a travagem, vai levar a variação da velocidade a ser linear, e nesta situação a velocidade média corresponde a somar a velocidade inicial e a final e dividir o resultado por dois, como exposto e depois simplificado em (4.3).

$$d_{tr} = \Delta t_{tr} \times \tilde{v}_{tr} = \frac{(v_f - v_i)}{a_{máx}} \times \frac{(v_i + v_f)}{2} = \frac{(0 - v_i)}{a_{máx}} \times \frac{(v_i + 0)}{2} = \frac{v_i^2}{-a_{máx} \times 2} . \quad (4.3)$$

Numa tentativa de estabelecer o mesmo volume de trânsito a entrar, por faixa de trânsito, quando está a ser simulado o controlo com semáforos, a desaceleração máxima é calculada a partir da distância de separação pretendida, que corresponde à indicada nas simulações com o sistema de controlo proposto utilizando o parâmetro `--dmin-cm`, e da velocidade de cruzeiro, de acordo com a fórmula (4.4), obtida da (4.3) resolvida em ordem à desaceleração máxima.

$$-a_{máx} = \frac{v_i^2}{2 \times d_{tr}} . \quad (4.4)$$

Utilizando a expressão (4.4) é calculada a desaceleração máxima, que corresponde à distância de separação utilizada na tabela 10, para as diferentes velocidades de cruzeiro. Estando expostos esses cálculos na tabela 13.

**Tabela 13** Cálculo da desaceleração máxima, consoante velocidade de cruzeiro e distância de separação.

Distância de separação (cm)	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
	54	72	90
1255	-8,964 m/s <sup>2</sup>	-15,936 m/s <sup>2</sup>	-24,9 m/s <sup>2</sup>
1655	-6,798 m/s <sup>2</sup>	-12,085 m/s <sup>2</sup>	-18,882 m/s <sup>2</sup>
2055	-5,475 m/s <sup>2</sup>	-9,732 m/s <sup>2</sup>	-15,207 m/s <sup>2</sup>

Os valores de aceleração máxima foram também alterados, para serem metade da desaceleração máxima dos veículos.

Nestas simulações com semáforos foi escolhido um ciclo com duração de 50 segundos, tendo cada fase: 25 segundos de luz vermelha, 23 segundos de luz verde e 2 segundos de luz amarela, durações que evitam a formação de fila desde o semáforo até à entrada para o ambiente de simulação.

O agregado de parâmetros utilizados nestas simulações com semáforos são os seguintes:

```
--semaphore --red 25 --yellow 2 --lmax-cm 255 --vn-kmph 54 --amax-mmpss 4482 --amin-mmpss -8964 --dbreak-cm 120 --entrys 2
```

Sendo alteradas as velocidades de cruzeiro e os valores das acelerações, calculadas na tabela 13. Nas tabelas 14, 15, 16 e 17, nem todas as células estão preenchidas, uma vez que não há valores de aceleração repetidos de entre os calculados na tabela 13, para distâncias de separação e velocidades diferentes. As células dessas tabelas, que não correspondas às simulações a serem feitas contêm apenas um X, indicando que não têm valor.

Na tabela 14, estão os resultados da duração de travessia média para cada simulação.

**Tabela 14** Duração de travessia média, para diferentes desacelerações máximas.

Desaceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
	54	72	90
-8,964	32,79 s	X	X
-6,798	34,24 s	X	X
-5,475	36,22 s	X	X
-15,936	X	26,50 s	X
-12,085	X	27,67 s	X
-9,732	X	28,56 s	X
-24,900	X	X	22,37 s
-18,882	X	X	22,80 s
-15,207	X	X	23,91 s

Na tabela 15, estão os valores calculados de tempo de atraso médio, para as mesmas simulações, com semáforos.

**Tabela 15** Tempo de atraso média, para diferentes desacelerações máximas.

Desaceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
	54	72	90
-8,964	12,59 s	X	X
-6,798	14,04 s	X	X
-5,475	16,02 s	X	X
-15,936	X	11,35 s	X
-12,085	X	12,52 s	X
-9,732	X	13,41 s	X
-24,900	X	X	10,25 s
-18,882	X	X	10,68 s
-15,207	X	X	11,79 s

Analisando estes resultados, a duração de travessia média é mais elevada, quando é

simulado semáforo do que quando é simulado o sistema de controlo proposto, sendo pelo menos 10,1 segundos maior para todas estas simulações.

Os valores de volume de trânsito, medidos para as mesmas simulações, estão presentes na tabela 16.

**Tabela 16** Volume de trânsito medido, para diferentes desacelerações máximas.

Desaceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
	54	72	90
-8,964	6808 veí/h	X	X
-6,798	5753 veí/h	X	X
-5,475	5054 veí/h	X	X
-15,936	X	8701 veí/h	X
-12,085	X	7663 veí/h	X
-9,732	X	6721 veí/h	X
-24,900	X	X	9538 veí/h
-18,882	X	X	8825 veí/h
-15,207	X	X	8008 veí/h

Os resultados de volume de trânsito de saída mostram que o sistema de controlo proposto não é melhor que semáforos, para todas as condições de simulação. O fato de com semáforos serem formados pelotões de veículos enquanto esperam por luz verde e que assim que a tiverem, comportam-se como um só veículo, leva a que durante a saída desse pelotão o volume de saída seja muito elevado. Por exemplo nas simulações com velocidade de cruzeiro igual a 54 km/h, tendo os veículos um comprimento de 2,55 m e estando em pelotão separados de 1,2 m da traseira daquele à sua frente, sai um veículo a cada 0,25 s  $((2,55+1,2)/15)$ , que corresponde a um volume de trânsito à saída de 14400 veí/h  $(3600/0,25)$ . Um valor bastante acima dos tabelados na tabela 16.

A energia média consumida pelos veículos nestas simulações, está presente na tabela 17.

**Tabela 17** Energia média consumida pelos veículos, para diferentes desacelerações máximas.

Desaceleração máxima (m/s <sup>2</sup> )	Velocidade de cruzeiro (km/h)		
	54	72	90
-8,964	103,7 J/Kg	X	X
-6,798	107,6 J/Kg	X	X
-5,475	111,0 J/Kg	X	X
-15,936	X	176,0 J/Kg	X
-12,085	X	185,7 J/Kg	X
-9,732	X	187,8 J/Kg	X
-24,900	X	X	232,7 J/Kg
-18,882	X	X	259,0 J/Kg
-15,207	X	X	275,8 J/Kg

Em termos de energia consumida média, em comparação os semáforos forçam os veículos a gastar mais energia em todas as simulações, sendo destes resultados o mais parecido em percentagem, 342% (232,7/68,0) maior. Este fato deve-se naturalmente por vários dos veículos terem de arrancar com a velocidade igual a 0 m/s, antes de entrarem na interseção.

#### 4.3.3. SIMULAÇÕES COM ENTRADA DE VEÍCULOS ALEATÓRIA

Por fim são efetuadas 10 simulações, agrupadas em pares de duas, sendo numa de cada par implementado o sistema de controlo proposto e na outra o sistema de controlo com semáforos. As condições para as simulações do mesmo par são idênticas, permitindo que os resultados de cada uma sejam comparáveis com os resultados da outra. O volume de trânsito na entrada de cada faixa de trânsito utilizado nestas simulações é variável, entre um limite máximo, imposto pela distância de separação mínima e um limite inferior, causado pelo intervalo de tempo máximo permitido sem entrada de novo veículo. O volume de trânsito na entrada mínimo é calculado, em veículos por hora, ao se dividir 3600 pelo intervalo de tempo máximo referido.

Na tabela 18 apresentam-se as condições de simulação para cada um dos pares de

simulações, daqui em diante designados por letras. São indicados: a distância de separação mínima, quando é simulado o sistema de controlo proposto e a desaceleração máxima utilizada na simulação com semáforo, tal como o volume de trânsito máximo que tanto uma como a outra vão permitir nas entradas. É também indicado o intervalo de tempo máximo permitido sem haver entrada de um novo veículo e o limite inferior de volume que esse causa, nas simulações. Em dois dos pares de simulações a zona de interceção possui 4 entradas.

**Tabela 18 Condições para cada par de simulações.**

Par	Nº de entradas	Comprimento do veículo (cm)	Velocidade de cruzeiro (km/h)	Distância de separação (cm)	Desaceleração máxima ( $m/s^2$ )	Intervalo de tempo máximo (ms)	Volume de trânsito por entrada (veí/h)
A	2	354	54	1600	-7,031	3908	[ 921; 2764]
B	2	453	90	1500	-20,833	1900	[ 1895; 4608]
C	2	552	72	1800	-11,111	2117	[ 1701; 3061]
D	4	651	90	3100	-10,08	3301	[ 1091; 2399]
E	4	750	54	2900	-3,879	10000	[ 360; 1479]

Na tabela 19, apresentam-se os resultados das simulações que simulam o sistema de controlo proposto, para cada um dos pares de simulações.

**Tabela 19 Resultados das simulações a implementar o sistema de controlo proposto, para cada par.**

Par	Duração de travessia média (s)	Tempo de atraso médio (s)	Volume de trânsito à saída (veí/h)	Energia média consumida (J/Kg)
A	20,36	0,1	3242	9,8
B	12,31	0,11	6465	49,2
C	15,55	0,26	5190	51,2
D	12,58	0,30	7188	107,4
E	20,73	0,21	2593	17,4

Na tabela 20, estão os resultados das simulações que simulam semáforos, para cada um

dos pares de simulações.

**Tabela 20** Resultados das simulações a implementar controlo com semáforos, para cada par.

Par	Duração de travessia média (s)	Tempo de atraso médio (s)	Volume de trânsito à saída (veí/h)	Energia média consumida (J/Kg)
A	28,83	8,57	3099	77,4
B	21,17	8,97	5835	207,9
C	25,00	9,71	4708	149,0
D	21,57	9,29	7011	242,4
E	28,01	7,49	2552	58,8

Neste grupo de simulações com volume de trânsito variável nas entradas, as simulações implementando o sistema de controlo, apresentam-se favoráveis em todas as medidas de avaliação, sendo as durações de travessia menores em alguns segundos, os volumes de trânsito medido à saída foram, desta vez, um pouco maiores e as energias consumidas médias foram menos de metade.

## 5. CONCLUSÕES

Como era objetivo proposto desta tese, conseguiu-se dimensionar um sistema de controle de tráfego para interseções, desenvolvido para não reter veículos de forma desnecessária e nunca os forçar a parar. Sendo designada uma secção da faixa de trânsito, localizada antes da entrada para a interseção, dentro da qual os veículos procedem a uma redução não muito acentuada da sua velocidade média, por forma a chegarem à entrada da interseção assim que houverem condições para a atravessarem sem risco de colisões. As menores variações de velocidade, em comparação com outros sistemas de controle, são também mais confortáveis para os passageiros e reduzem a possibilidade de falhas de aderência ao pavimento em que os veículos se deslocam. Salientando-se que por defeito o sistema tenta que cada veículo proceda, sem ter de reduzir a sua velocidade até à entrada e no interior da interseção, permitindo um tempo de atraso de zero. Em situações de muito pouco trânsito, os veículos recebem permissão de passagem, da mesma forma que receberiam de um sistema com distribuição no tempo dinâmico completamente atuado, não havendo tempo de atraso nenhum. No entanto também não é introduzido tempo de atraso se os veículos aparecerem desfasados de forma a não serem causadas

colisões. Podendo isto acontecer até, com o volume máximo de trânsito permitido em todas as entradas, ou seja à capacidade máxima da interseção, se os primeiros veículos das filas surgirem desfasados entre si, a mesma quantidade de tempo, que aplicariam de atraso se entrassem ao mesmo tempo, não sendo desta maneira aplicados atrasos a nenhum dos veículos.

Foi também explicado o algoritmo a implementar pelo sistema de controlo proposto, no qual quando um veículo dá entrada no sistema são verificadas possíveis colisões com todos os outros veículos ainda a serem controlados pelo sistema, inclusivamente feito o desenvolvimento das equações matemáticas necessárias para avaliar se dois veículos colidem ou não, e no caso de colidirem estão também apresentadas as fórmulas para o cálculo do tempo de atraso, que o veículo vai ter de implementar e das correspondentes variações de velocidade a serem feitas dentro da zona de controlo.

Infelizmente provou-se complicado permitir veículos na entrada do sistema com diferentes velocidades, acabando-se por dimensionar o sistema associado a uma só velocidade de cruzeiro, que tem de ser aquela a que os veículos se deslocam antes da zona de controlo e durante e depois da interseção.

Pelo seu modo de funcionamento distinto, foram também identificadas condições limitadoras de trânsito, que precisam de ser cumpridas antes do sistema de controlo, nomeadamente em termos de volume de trânsito máximo, associado a uma distância mínima de separação entre veículos.

Neste trabalho, nomeadamente com o recurso ao simulador desenvolvido, foi possível comprovar que o sistema de controlo proposto, permite aos veículos que atravessam a interseção, fazerem-no com tempos de atraso médios significativamente menores, quando em comparação com os que são praticados se a interseção for controlada por semáforos luminosos. Este objetivo foi alcançado com sucesso. Havendo também resultados a provar que a energia consumida pelos veículos, quando sob controlo de semáforos, é significativamente maior. Mesmo assim viu-se que a capacidade da interseção pode ser maior, em situações com semáforos implementados.

Uma desvantagem identificada do sistema proposto é, como provado pela equação (3.24),

ser possível que uma interseção apenas com trânsito proveniente de uma via obrigue todos os veículos a implementar um atraso temporal, algo que não aconteceria num sistema com distribuição no tempo dinâmico completamente atuado.

O sistema aqui proposto não foi dimensionado para permitir a cedência de passagem a peões nem ciclistas em passadeiras, nas imediações da interseção. É assumido que essas passagens são feitas por caminhos subterrâneos e/ou viadutos.

## 5.1. POSSÍVEIS MELHORIAS

Para além do que foi conseguido, existem desenvolvimentos teóricos e práticos que serviriam para melhor ajustar o tipo de controlo proposto, a situações mais realistas e serviriam também para uma melhor avaliação da sua adequação, enquanto sistema de controlo de trânsito a essas situações.

O sistema não foi dimensionado para permitir viragens na interseção. A ser feito iria alterar o algoritmo, adicionando mais equações matemáticas, para verificação das colisões a evitar, mas viria a ser mais útil e realista enquanto sistema de controlo de interseções. As condições limitadoras de trânsito à entrada do sistema teriam também de ser diferentes, obrigando a diminuir o volume de trânsito aceite à entrada das zonas de controlo. Exemplificando para uma interseção de duas entradas, se os veículos convergirem todos para a mesma saída, o volume de trânsito nessa saída será a soma do volume ambas as entradas, sendo assim na saída que se presencia o volume máximo, que será exatamente igual à capacidade da interseção. Em cada entrada o limite de volume terá de ser igual à capacidade da interseção dividida pelo número de entradas, que se podem concentrar na saída, ou seja metade dela e em comparação metade do que seria se não fossem permitidas viragens. Para além disto os veículos ao virarem dentro da interseção, possivelmente terão de reduzir a sua velocidade para não correrem o risco de perderem tração, se assim for, isso irá aumentar os tempos de atraso dos veículos que evitem colisões com eles, obrigando à redução da capacidade da interseção e por sua vez a reduzir ainda mais o volume máximo aceite em cada entrada. A não ser que se garanta que a velocidade de cruzeiro é segura para os veículos a praticarem nessas viragens.

Seria também útil o sistema proposto ser dimensionado para outros tipos de interseção.

Os tipos de movimento que os veículos têm de produzir, são muito restritivos, nomeadamente pela velocidade de cruzeiro obrigatória. Seria interessante estudar como um facilitismo ao movimento que os veículos possam realizar, que as suas posições estivessem associadas a uma zona, um pouco mais longa que o seu comprimento, permitindo que, se o veículo não cumprisse verdadeiramente a velocidade de cruzeiro, só fizesse ajuste da sua velocidade quando chegasse à extremidade da sua zona, permitindo assim algum erro posicional. Os veículos em perseguição estariam a seguir a zona, essa sim que se deslocaria exatamente à velocidade de cruzeiro, em vez de seguirem mesmo a traseira do veículo. Seria também necessário dimensionar o sistema que determina onde a zona de cada veículo está e de como os veículos se apercebem dos limites da sua zona e das dos outros.

No sistema aqui proposto não estão contempladas situações de incidentes. Tais situações iriam forçosamente obrigar à paragem do funcionamento do sistema para evitar possíveis acidentes em cadeia, por os veículos estarem a seguir os movimentos pré-definidos pelo sistema e não estarem a avaliar aquilo em seu redor. A interseção teria de passar a ser controlada de uma outra forma, até o sistema proposto conseguir retomar funcionalidade.

As restrições de movimento impostas aos veículos, para limitar o volume de trânsito, na secção de entrada, são introduzidas eventualmente em algum ponto da via e no caso de o trânsito, que se apresenta nesse ponto, ter um volume superior, será formada uma fila de espera. Seria útil para uma simulação mais realista, que este ponto estivesse presente no ambiente de simulação.

Algumas das dimensões do ambiente de simulação estão programadas de forma fixa no simulador. Tais como a largura e o comprimento das faixas de trânsito e a largura dos veículos. O comprimento da interseção apenas pode ter dois valores dependendo se esta tem 2 entradas ou 4 entradas. Se fosse aumentado o comprimento das faixas de trânsito, seria possível simular mais veículos ao mesmo tempo e poderiam ser incluídos pontos mais afastados da interseção, podendo nomeadamente no caso de simulação de semáforos dar-se a formação de filas maiores, sem chegarem ao início da faixa de trânsito,

permitindo simular tempos de vermelho maiores.

O sistema de controlo proposto, apenas foi comparado com sistemas com semáforos implementando ciclo de duração fixa e pré-temporizado. Ficando a carecer de uma comparação com outros sistemas de controlo, nomeadamente, sistemas de semáforos completamente atuados, que serão mais eficazes do que os pré-temporizados.

Do ponto de vista de uma concretização real do sistema de controlo proposto, este é simples o suficiente para ser implementado pelo mesmo tipo de *hardware*, que é utilizado para controlar semáforos luminosos. O *hardware* de processamento fica instalado perto da interseção, efetuando comunicações com os veículos e quando algum passa no posto de controlo, determinando se pode prosseguir à velocidade de cruzeiro ou se necessita de atrasar o seu movimento.

Os postos de controlo possuirão, sensores para ser detetada a presença de veículos, que por estes passarem a pouca distância poderão ser, por exemplo, bobines que detetam campo magnético. Quando um veículo for detetado a passar, o sistema tem de obter informações sobre o veículo, como o seu comprimento, podendo recorrer a sensores para medição e/ou a uma comunicação de curta distância para perguntar ao veículo. Depois de processada a travessia que o veículo terá de fazer, é obrigatório o sistema realizar uma transmissão ao veículo, para o informar de como tem de proceder. Estas transmissões são de curta distância, pelo que as potências de transmissão poderão ser pequenas, consumindo menos energia e também criando menos ruído nos recetores vizinhos. Ao mesmo tempo o sistema precisa de informar o veículo seguinte, para passar a ignorar a distância que o separa, daquele que acaba de entrar na zona de controlo; tendo esta comunicação de já ter maior alcance e de abranger a faixa de trânsito, na secção anterior ao posto de controlo.



## Referências Documentais

- [1] M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz, H. Winner. (2016). "*Autonomous Driving Technical, Legal and Social Aspects*". Springer Berlin, Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48847-8>.
- [2] T. M. Gasser, C. Arzt, M. Ayoubi, A. Bartels, L. Bürkle, J. Eier, F. Flemisch, D. Häcker, T. Hesse, W. Huber, C. Lotz, M. Maurer, S. Ruth-Schumacher, J. Schwarz, W. Vogt. (2012). "*Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*".
- [3] European Commission. (2018). "*On the road to automated mobility: An EU strategy for mobility of the future*". COM(2018) 283.
- [4] D. J. Fagnant, K. Kockelman. (2013). "*Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations*". Eno Center for Transportation, 1710 Rhode Island Avenue, NW, Suite 500, Washington, DC 20036. Disponível: <https://enotrans.org/wp-content/uploads/2023/02/AV-paper.pdf>
- [5] D. Ticoll. (2015). "*Driving Changes: Automated Vehicles in Toronto*". Discussion Paper. University of Toronto Transportation Research Institute.
- [6] R. A. Gheorghiu, V. Iordache, A. C. Cormos. (2017). "*Cooperative Communication Network for Adaptive Truck Platooning*". In Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems - Volume 1: VEHITS, ISBN 978-989-758-242-4, pages 228-235. DOI: <https://doi.org/10.5220/0006302402280235>.
- [7] D. J. Fagnant. (2014). "*The Future of Fully Automated Vehicles: Opportunities for Vehicle and Ride-Sharing, with Cost and Emissions Savings (PhD thesis)*". Austin, Texas: The University of Texas at Austin. Disponível: <http://hdl.handle.net/2152/25932>.
- [8] European Commission. (2016). "*Saving Lives: Boosting Car Safety in the EU*". COM(2016) 787.
- [9] European Commission. (2018). "*EUROPE ON THE MOVE: Sustainable Mobility for Europe: safe, connected, and clean*". COM(2018) 293.
- [10] J. Weber, F. Kröger. (2018). "*Introduction: Autonomous Driving and the Transformation of Car Cultures*". Transfers, Volume 8, Issue 1, pag. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.3167/TRANS.2018.080103>.
- [11] S. Tsugawa, T. Yatabe, T. Hirose, S. Matsumoto. (1979). "*An Automobile with Artificial Intelligence*". In Proceedings of the 6th international joint conference on

Artificial intelligence - Volume 2 (IJCAI'79). Morgan Kaufmann Publishers Inc., São Francisco, CA, EUA, 893–895.

- [12] Robotics Age. (1980). Volume 2, Nº 1, 1 de Março de 1980, pag. 19-26.
- [13] H. P. Moravec. (1980). "*Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover*". Stanford Artificial Intelligence Laboratory, Computer Science Department, Report Nº. STAN-CS-80-813. Stanford University, Sanford, California 94305 EUA.
- [14] E. D. Dickmanns, A. Zapp. (1987). "*Autonomous High Speed Road Vehicle Guidance by Computer Vision*". IFAC Proceedings Volumes, Volume 20, Issue 5, Part 4, pag. 221-226, ISSN 1474-6670. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)55320-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)55320-3).
- [15] E. D. Dickmanns, R. Behringer, D. Dickmanns, T. Hildebrandt, M. Maurer, F. Thomanek, J. Schiehlen. (1994). "*The seeing passenger car 'VaMoRs-P'*". Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium, Paris, França, pag. 68-73. DOI: <https://doi.org/10.1109/IVS.1994.639472>.
- [16] E. D. Dickmanns. (1995). "*KNOWLEDGE BASED REAL-TIME VISION*". Institut für Programmiersprachen und Programmentwicklung. Fakultät für Informatik Universität der Bundeswehr München. IFAC Intelligent Autonomous Vehicles, Espoo, Finlândia. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042366-1.50007-5>.
- [17] F. Thomanek, E. D. Dickmanns, D. Dickmanns. (1994). "*Multiple object recognition and scene interpretation for autonomous road vehicle guidance*". Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium, Paris, França, pag. 231-236, DOI: <https://doi.org/10.1109/IVS.1994.639510>.
- [18] F. Thomanek, E. D. Dickmanns. (1996). "*Autonomous road vehicle guidance in normal traffic*". In: Li, S.Z., Mital, D.P., Teoh, E.K., Wang, H. (eds) Recent Developments in Computer Vision. ACCV 1995. Lecture Notes in Computer Science, vol 1035. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [https://doi.org/10.1007/3-540-60793-5\\_103](https://doi.org/10.1007/3-540-60793-5_103).
- [19] E. D. Dickmanns, N. Müller. (1995). "*SCENE RECOGNITION AND LANDMARK NAVIGATION FOR ROAD VEHICLES*". IFAC Intelligent Autonomous Vehicles, Espoo, Finlândia. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042366-1.50036-1>.
- [20] C. Kujawski. (1995). "*DECIDING THE BEHAVIOUR OF AN AUTONOMOUS MOBILE ROAD VEHICLE*". IFAC Intelligent Autonomous Vehicles, Espoo, Finlândia. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-042366-1.50067-1>.
- [21] E. D. Dickmanns. (2007). "*Dynamic Vision for Perception and Control of Motion*". Springer, Heidelberg, 2007.

- [22] Z. Zhang, J. Ohya. (2021). "Movement Control with Vehicle-to-Vehicle Communication by using End-to-End Deep Learning for Autonomous Driving". In Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods - ICPRAM; ISBN 978-989-758-486-2; ISSN 2184-4313, SciTePress, pag. 377-385. DOI: <https://doi.org/10.5220/0010235703770385>.
- [23] A. Rehman. (2024). Performance analysis of multiple access protocols for sidelink vehicular communications. Università degli Studi dell'Aquila, L'Aquila, Italia. Disponível: <https://ricerca.univaq.it/handle/11697/259339>.
- [24] European Telecommunications Standards Institute. (2010). "Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture". EN 302 665. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [25] Z. Špitálová. (2022). "VEHICLE-TO-EVERYTHING COMMUNICATION". Institute of Computer Engineering and Applied Informatics, Faculty of Informatics and Information Technology, Slovak University of Technology, Bratislava, Eslováquia. Electrical Engineering in Transport, Communications, Volume 25, Issue 1, pag. 24-35. DOI: <https://doi.org/10.26552/com.C.2023.017>.
- [26] European Telecommunications Standards Institute. (2014). "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 3: Network Architecture". EN 302 636-3. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [27] European Telecommunications Standards Institute. (2014). "Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 1: Requirements". EN 302 636-1. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [28] Electronic Communications Committee. (2015). "ECC Decision (08)01: The harmonised use of the 5875-5925 MHz frequency band for Intelligent Transport Systems (ITS)".
- [29] T. Breton. (2020). "COMMISSION IMPLEMENTING DECISION (EU) 2020/1426 of 7 October 2020 on the harmonised use of radio spectrum in the 5 875-5 935 MHz frequency band for safety-related applications of intelligent transport systems (ITS) and repealing Decision 2008/671/EC". Bruxelas. Official Journal of the European Union, L 328/19, 9 de Outubro de 2020.
- [30] Electronic Communications Committee. (2022). "ECC Recommendation (08)01: Use of the band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS)".
- [31] European Telecommunications Standards Institute. (2010). "Intelligent Transport Systems (ITS); European profile standard for the physical and medium access control layer of Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band". ES 202 663. Disponível: <http://www.etsi.org>.

- [32] European Telecommunications Standards Institute. (2013). "*Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 2: Scenarios*". EN 302 636-2. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [33] European Telecommunications Standards Institute. (2013). "*Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Geographical Area Definition*". EN 302 931. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [34] European Telecommunications Standards Institute. (2011). "*Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol*". TS 102 636-5-1. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [35] European Telecommunications Standards Institute. (2011). "*Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 6: Internet Integration; Sub-part 1: Transmission of IPv6 Packets over GeoNetworking Protocols*". TS 102 636-6-1. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [36] European Telecommunications Standards Institute. (2019). "*Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 3: Specifications of Decentralized Environmental Notification Basic Service*". EN 302 637-3. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [37] European Telecommunications Standards Institute. (2019). "*Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service*". EN 302 637-2. Disponível: <http://www.etsi.org>.
- [38] 3GPP. (2016). "*LTE-based V2X Services*". 3GPP TSG RAN Meeting Nº. 73, RP-161894. Disponível: [https://www.3gpp.org/ftp/tsg\\_ran/TSG\\_RAN/TSGR\\_73/Docs/](https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_73/Docs/).
- [39] 3GPP. (2020). "*Technical Specification Group Services and System Aspects; Summary of Rel-16 Work Items*". Tech. Rep. TR 21.916 V1.0.0, Dezembro de 2020.
- [40] T. V. Mathew, K. V. K. Rao. (2007). "*Introduction to Transportation Engineering*". Capítulo 39. TRAFFIC INTERSECTIONS. NPTEL, 2007.
- [41] REGULAMENTO DE SINALIZAÇÃO DO TRÂNSITO. Decreto Regulamentar nº 22-A/98, Diário da República nº 227, I Série-B, 1 de Outubro de 1998.
- [42] М. Тальников. (2018). Disponível: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A121\\_highway\\_\(Russia\)\\_33km.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:A121_highway_(Russia)_33km.jpg), sob licença: Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).
- [43] European Telecommunications Standards Institute. (1996). "*Digital cellular*

*telecommunications system (Phase 2); Physical layer on the radio path General description (GSM 05.01)*". ETS 300 573.

- [44] C. A. O'Flaherty, M. G. H. Bell, P. W. Bonsall, G. R. Leake, A. D. May, C. A. Nash. (2006). "*Transport Planning and Traffic Engineering*". Elsevier Ltd. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, Reino Unido.
- [45] H. R. Smith, B. Hemily, M. Ivanovic. (2005). "*Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook*".
- [46] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. (2000). "*Highway Capacity Manual 2000*". ISBN 0-309-06681-6.
- [47] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2010. "*Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice*". Washington, DC: The National Academies Press. DOI: <https://doi.org/10.17226/14364>.
- [48] M. Ferreira, R. Fernandes, H. Conceição, W. Viriyasitavat, O. K. Tonguz. (2010). "*Self-Organized Traffic Control*". Proceedings of 7th ACM International Workshop on Vehicular Internetworking (VANET 2010), Chicago, IL, pag. 85–90, Setembro de 2010.
- [49] Orange Traffic. "*Ideal Intersection Archives - Orange Traffic inc*". Disponível: [https://www.orangetraffic.com/en\\_CA/solutions/ideal-intersection-en\\_CA/](https://www.orangetraffic.com/en_CA/solutions/ideal-intersection-en_CA/) [12 de Setembro de 2025].
- [50] Orange Traffic. 2020. "*The Challenge of Optimizing Fluidity Following the Opening of Place Bell - Orange Traffic inc*". Disponível: <https://www.orangetraffic.com/2020/04/09/the-challenge-of-optimizing-fluidity-following-the-opening-of-place-bell/> [12 de Setembro de 2025].
- [51] EMTRAC. (2017). Transit Signal Priority (TSP) System. Disponível: <https://www.emtracsystems.com/wp-content/uploads/2021/01/EMTRAC-Transit.pdf>.
- [52] CÓDIGO DA ESTRADA, Título II, Capítulo I, Secção IV, Subsecção II, Artigo 30.º Cedência de passagem. Lei nº 72/2013, Diário da República nº 169, Série I, 3 de Setembro de 2013.
- [53] L. Glielmo. (2014). "*Vehicle-to-Vehicle/Vehicle-to-Infrastructure Control*". The Impact of Control Technology, T. Samad and A.M. Annaswamy (eds.), 2014. Disponível: <https://ieeecss.org/sites/ieeecss/files/2019-06/loCT2-RC-Glielmo-1.pdf>.
- [54] K. Dresner, P. Stone. (2007). "*A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management*". Journal of Artificial Intelligence Research 31, 2008.
- [55] M. Quinlan, T. Au, J. Zhu, N. Sturca, P. Stone. (2010). "*Bringing Simulation to Life: A*

- Mixed Reality Autonomous Intersection*". Proceedings of IROS 2010-IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (IROS 2010), Taipei, Taiwan, 2010.
- [56] J. Postel. (1980). "*User Datagram Protocol*". RFC 768, USC/Information Sciences Institute.
- [57] O. K. Tonguz. (2018). "*How Vehicle-to-Vehicle Communication Could Replace Traffic Lights and Shorten Commutes*". IEEE Spectrum, 25-Setembro-2018. Disponível: <https://spectrum.ieee.org/how-vehicletovehicle-communication-could-replace-traffic-lights-and-shorten-commutes> [12 de Setembro de 2025].
- [58] R. Zhang, F. Schmutz, K. Gerard, A. Pomini, L. Basseto, S. B. Hassen, A. Ishikawa, I. Ozgunes, O. Tonguz. (2018). "*Virtual Traffic Lights: System Design and Implementation*". 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Chicago, IL, EUA, 2018, pag. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690709>.
- [59] V. Gradinescu, C. Gorgorin, R. Diaconescu, V. Cristea, L. Iftode. "*Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication*". 2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference - VTC2007-Spring, Dublin, Irlanda, 2007, pag. 21-25. DOI: <https://doi.org/10.1109/VETECS.2007.17>.
- [60] A. D. May. (1990). "*Traffic Flow Fundamentals*". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 07632. ISBN: 0-13-926072-2.
- [61] K. Høgsberg. (2012). "*Wayland*". Disponível: <https://wayland.freedesktop.org/docs/html/>.
- [62] J. Leech. (2014). "*Khronos Native Platform Graphics Interface. The Khronos Group Inc*". Disponível: <https://registry.khronos.org/EGL/specs/eglspec.1.5.pdf>.
- [63] The Khronos Group Inc. (2025). "*OpenGL ES - The Standard for Embedded Accelerated 3D Graphics*". Disponível: <https://www.khronos.org/opengles/>.