



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologias

Departamento de Engenharia Eletrónica e de Computadores

Sérgio André Correia Santos

# **Sistema de Gestão de Tráfego com Integração Sensorial dos Veículos em Ambiente de Simulação**

Dissertação de Mestrado

04 de Setembro de 2014



UNIVERSIDADE DE COIMBRA





UNIVERSIDADE DE COIMBRA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

# Sistema de Gestão de Tráfego com Integração Sensorial dos Veículos em Ambiente de Simulação

Sérgio André Correia Santos

Coimbra, 2014



# Sistema de Gestão de Tráfego com Integração Sensorial dos Veículos em Ambiente de Simulação

Orientador:

Professor Doutor Urbano José Carreira Nunes

Co-orientador:

Mestre Luís Manuel Conde Bento

Júri:

Prof. Dr. Vítor Manuel Mendes da Silva

Prof. Dr. Jorge Nuno de Almeida e Sousa Almada Lobo

Prof. Dr. Urbano José Carreira Nunes



Sérgio André Correia Santos

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e  
de Computadores

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra

Setembro, 2014



“O verdadeiro triunfo de um homem surge das cinzas do fracasso.”

Pablo Neruda



# Agradecimentos

Durante todo o meu percurso académico fui conhecendo inúmeras pessoas, entre elas amigos, colegas, professores, entre outros. Todos estes, embora uns mais do que outros, foram marcando o meu percurso de alguma forma. Assim sendo, esta página serve para deixar o meu agradecimento a todas elas.

Primeiro que tudo quero deixar um especial agradecimento ao Professor Urbano Nunes pelas opiniões e críticas que foi dando ao longo deste trabalho. Um agradecimento também para o Mestre Luís Conde Bento pelas horas passadas comigo à procura da melhor forma para desenvolver o trabalho. Um enorme obrigado ao Mestre Ricardo Parafita pois sem ele teria demorado o dobro do tempo a perceber e manusear o simulador desenvolvido pelo mesmo (*ISR-TRAFSIM*), assim como na ajuda da resolução de diversos problemas que foram surgindo aquando da implementação de diversos módulos. Uma palavra também ao ISR-UC (Instituto de Sistemas e Robótica - Universidade de Coimbra) pelas excelentes condições de trabalho disponibilizadas.

Esta dissertação foi realizada e suportada no âmbito dos projetos: 1)- EVSIM09-Modelos para simulação de tráfego de veículos elétricos com comunicação e capacidade de decisão dinâmica (PTDC/SEN-TRA/099413/2008) financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia e programa COMPETE; 2)- ProjB-Diagnosis and Assisted Mobility – EcoAMobility component, projecto QREN Centro-07-ST24-FEDER-002028.

Um obrigado também ao Sampaio, Raúl, Diogo, João, Cristóvão, Formiga, Vitor, Tiago, Jorge, Caseiro, Pedro, Oliveira, Carolina, Nujo, Costa, Miguel por todos os momentos de trabalho e lazer que passámos juntos nestes anos.

Um especial obrigado à Mariana pela paciência e incentivo em todos os momentos.

Por fim, quero agradecer aos meus pais e irmão por todo o esforço que fizeram para que eu completasse este curso, assim como, pelas condições que criaram para que eu conseguisse todos os objetivos.

A todos o meu obrigado.



# Resumo

O aumento do fluxo de tráfego nas infraestruturas existentes, minimizando o número de acidentes, consumos de combustível e emissões de  $CO_2$  têm obtido foco por parte do estudo dos Sistemas Inteligentes de Transportes (*ITS*). As interseções são a chave para melhorar estes problemas, pois concentram um maior número de veículos. Nos últimos anos várias técnicas foram desenvolvidas para regular o tráfego em vários tipos de interseções. Contudo, dado o elevado custo das técnicas propostas e as questões de segurança associadas, torna-se fundamental simular todos os aspetos relevantes, avaliando-os e corrigindo possíveis erros. Desta forma, para alcançar este fim foi desenvolvido um sistema multi-agente denominado ISR-TrafSim.

O ISR-TrafSim foi desenvolvido para simulação de tráfego em cenários urbanos, fornecendo as ferramentas necessárias para simular Sistemas Inteligentes de Gestão de Tráfego (*ITMS*). Estes cenários urbanos poderão possuir rotundas, cruzamentos ou ambos. A estas interseções podem ser acoplados sistemas de gestão, que poderão processar a informação produzida por veículos ou pelos sensores das infraestruturas, transmitida por um sistema de comunicação *V2V/V2I*. Os algoritmos *ITMS* podem ser comparados com métodos tradicionais de tráfego através da velocidade média no cenário, tempo de paragem ou pelos consumos de combustível. Foram desenvolvidas técnicas para gestão de tráfego, o *FMITM* (*Forward Method Intelligent Traffic Management*), e *LEMIM* (*Legacy Early Method Intelligent Traffic Management*). Foram implementados no cruzamento, os métodos *WMIM* (*Waiting Method Intelligent Traffic Management*) e *EMIM* (*Early Method Intelligent Traffic Management*) já disponíveis para a rotunda, de modo a ser possível comparar o desempenho dos mesmos nas diferentes interseções. Todas as técnicas propostas para regular o tráfego são baseadas em reservas espacio-temporais para otimizar a área da interseção, fornecendo ao veicular um caminho livre de colisões. Foi realizada uma comparação entre os simuladores *ISR-TrafSim* e *VISSIM*, de forma a validar os resultados obtidos pelo *ISR-TrafSim*. Adicionalment foi implementado o sistema *Four Wheel Steering* (*4WS*) nos veículos de forma a aumentar a estabilidade dos veículos e a resposta dos mesmo a velocidades elevadas.

**Palavras chave:** Gestão Inteligente de Tráfego (*ITM*), simulador de tráfego, Sistema Inteligente de Transportes (*ITS*), comunicações *V2V/V2I*, *four wheel steering*, consumo de combustível



# Abstract

Increase the throughput of the existing infrastructures, minimizing the number of accidents, the decreasing of fuel consumptions and the reduction of  $CO_2$  emissions has been the major focus of Intelligent Transportation Systems (*ITS*). Road intersections are the main key to improve all identified problems since is where it exist the biggest vehicle concentration. Over the years, many techniques were developed to study and to regulate the traffic in several types of intersections, however, since the cost of proposed techniques is expensive and for safety issues it is necessary simulate all relevant aspects to evaluate and to correct possible errors that may occur. To achieve the proposed goal a multiagent system named *ISR-TrafSim* was developed.

The *ISR-TrafSim* was designed to simulate traffic in urban scenarios, providing the necessary tools to simulate Intelligent Traffic Management Systems (*ITMS*). These urban scenarios can be designed to have intersections such as roundabout, a crossroad or both. The intersections can be coupled with management systems, that can access information produced by vehicles or infrastructures sensors. Since the exchange of information between all agents in the simulation is important, a *V2V/V2I* communication over a wireless network was simulated. The developed *ITMS* are compared with traditional control methods and their impact can be measured by vehicles mean speed in scenario, stopping time and the fuel consumption. Several techniques have been proposed for traffic management, *FMITM* (*Forward Method Intelligent Traffic Management*) and *LEMITM* (*Legacy Early Method Intelligent Traffic Management*). Were also exported from the roundabout to the crossroad the methods *WMITM* (*Waiting Method Intelligent Traffic Management*) and *EMITM* (*Early Method Intelligent Traffic Management*) in order to evaluate the performance in both intersections. All the proposed techniques to regulate the traffic are based on a spatio-temporal reservation scheme to optimize the intersection area, providing to the driver a collision-free path. A comparison was made between the simulators *ISR-TrafSim* and *VISSIM* in order to validate the results obtained by *ISR-TrafSim*. Four wheel steering system has been developed to the vehicles in order to increase the stability and response of the vehicles at high speeds.

**Keywords:** Intelligent Traffic Management (ITM), traffic simulator, Intelligent Transportation System (ITS), V2V/V2I communications, four wheel steering, fuel consumption



# Conteúdo

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xx</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xxiii</b>
<b>1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Motivação . . . . .	1
1.2. Contextualização . . . . .	1
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.4. Trabalho Realizado e Contribuições Chave . . . . .	3
1.5. Publicações . . . . .	4
<b>2. Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1. Simulação de Tráfego . . . . .	5
2.1.1. Tipos de Simuladores de Tráfego . . . . .	5
2.1.2. Modelos de Consumos e Emissões de $CO_2$ . . . . .	8
2.2. Algoritmos de Gestão de Tráfego . . . . .	10
2.2.1. Técnicas Tradicionais para Gestão de Tráfego . . . . .	10
2.2.2. Algoritmos Inteligentes para Interseções com Sinalização Luminosa . . . . .	11
2.2.3. Algoritmos Inteligentes para Interseções com reserva prévia . . . . .	12
<b>3. Arquitetura do Simulador <i>ISR-TrafSim</i></b>	<b>15</b>
3.1. Agente Veículo . . . . .	15
3.1.1. Cinemática do veículo . . . . .	16
3.1.2. Modelo de odometria e encoders . . . . .	17
3.1.3. Planeador de velocidade e sistema anti-colisão . . . . .	18
3.1.4. Marcadores magnéticos . . . . .	18
3.1.5. Laser . . . . .	20
3.1.6. Tipos de veículos e condutores . . . . .	21
3.1.7. Impacto Ambiental . . . . .	22
3.1.7.1. Consumo de combustível e cálculo das emissões . . . . .	22
3.2. Agente Infraestrutura . . . . .	23
3.2.1. Marcadores magnéticos e sensores de pressão . . . . .	23
3.2.2. Algoritmos de gestão de tráfego . . . . .	24

---

3.2.3.	Controlador de fluxo de tráfego . . . . .	24
3.2.4.	Sistema global de navegação por satélite . . . . .	26
3.3.	Comunicações <i>V2V</i> e <i>V2I</i> . . . . .	26
3.4.	Cenário do <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	27
<b>4.</b>	<b>Novos Algoritmos de <i>ITM</i> e Desenvolvimentos no <i>ISR-TrafSim</i></b>	<b>29</b>
4.1.	Validação dos resultados para as interseções sem sistemas de gestão . . . . .	29
4.2.	Algoritmos <i>ITM</i> . . . . .	30
4.2.1.	Teoria de Suporte . . . . .	30
4.2.1.1.	Matriz Espacio-Temporal . . . . .	30
4.2.2.	Implementação dos Algoritmos <i>ITM</i> desenvolvidos para a Rotunda no Cruzamento . . . . .	32
4.2.3.	<i>LEMITM</i> . . . . .	32
4.2.3.1.	Formulação e Implementação . . . . .	32
4.2.3.2.	Processo de reserva . . . . .	34
4.2.3.3.	Margem de segurança na reserva . . . . .	35
4.2.4.	Método de gestão <i>FMITM</i> . . . . .	36
4.3.	Desenvolvimentos no Simulador <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	38
4.3.1.	Implementação de Mudança de Via . . . . .	38
4.3.2.	Implementação do Sistema <i>Four Wheel Steering</i> . . . . .	38
<b>5.</b>	<b>Análise de Resultados</b>	<b>41</b>
5.1.	Validação dos resultados para as interseções sem sistemas de gestão usando o <i>VISSIM</i> . . . . .	41
5.2.	Algoritmos <i>ITM</i> . . . . .	43
5.2.1.	Resultados do algoritmo <i>LEMITM</i> . . . . .	43
5.2.2.	Resultados do algoritmo <i>FMITM</i> . . . . .	48
5.2.3.	Resultados dos algoritmos para os módulos rotunda e cruzamento . . . . .	50
5.2.3.1.	Resultados dos métodos de gestão no módulo Rotunda . . . . .	50
5.2.3.2.	Resultados dos métodos de gestão no módulo Cruzamento . . . . .	51
5.2.3.3.	Comparação dos métodos de reserva entre o módulo rotunda e o módulo cruzamento . . . . .	53
5.3.	Desenvolvimentos no Simulador <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	54
5.3.1.	Margens de Reserva . . . . .	54
5.3.2.	<i>Modelo Cinemático 4WS</i> . . . . .	54
<b>6.</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>59</b>

---

<b>A. Anexos</b>	<b>63</b>
A.1. Tabela de Resultados Métodos Tradicionais nos simuladores <i>VISSIM</i> e <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	63
A.2. Tabelas de Resultados do Método <i>LEMITM</i> . . . . .	64
A.3. Tabela de Resultados dos Métodos para a Rotunda . . . . .	65
A.4. Tabela de Resultados dos Métodos para o Cruzamento . . . . .	66
A.5. Tabela de Resultados para Análise de Desempenho do Método <i>FMITM</i> . .	67
A.6. Trajecto para avaliar Ângulo Traseiro do Sistema 4WS . . . . .	68



# Lista de Figuras

1.1. Módulo do cenário completo (cima), rotunda (canto esquerdo inferior) e cruzamento (canto direito inferior). . . . .	2
1.2. Arquitetura do simulador <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	3
2.1. Exemplos de vários métodos para quantificar emissões (adaptado de [Williams et al., 2012]). . . . .	8
2.2. Análise do impacto dos três métodos de regulamentação numa rotunda. . .	11
3.1. Cinemática do veículo. . . . .	17
3.2. Sistema marcadores magnéticos. . . . .	19
3.3. Campo Magnético. . . . .	20
3.4. <i>LIDAR</i> . . . . .	21
3.5. Constelação de satélites simulada (esquerda) e modelo de comunicação <i>V2I/V2V</i> usado no <i>ISR-TrafSim</i> (direita). . . . .	27
3.6. Painel de configuração do <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	28
4.1. Módulos criados no simulador <i>VISSIM</i> para validação dos resultados. . . .	30
4.2. Matriz espacio-temporal. . . . .	31
4.3. Etapas do processo de gestão de tráfego para um veículo. . . . .	32
4.4. Diferença da reserva de células usando os algoritmos <i>WMITM</i> e <i>EMITM</i> . . .	33
4.5. Detetores de fluxo de entrada e saída e reserva do algoritmo <i>LEMITM</i> . . .	34
4.6. Reserva com o algoritmo <i>LEMITM</i> na matriz espacio-temporal. . . . .	35
4.7. Funcionamento do método de gestão <i>forward</i> . . . . .	36
4.8. Diferença entre os perfis de velocidade gerados pelos métodos <i>FMITM</i> e <i>EMITM</i> . . . . .	37
4.9. Diferença entre os perfis de velocidade gerados pelos métodos <i>FMITM</i> e <i>EMITM</i> . . . . .	37
4.10. Ilustração de uma Mudança de Via. . . . .	38
4.11. Sistema <i>4 wheel steering</i> . . . . .	39
4.12. Diferenças entre <i>4WS</i> e <i>2WS</i> . . . . .	39
4.13. Função que define variação do ângulo de direção traseiro. . . . .	40
5.1. Análise da validação de resultados do módulo rotunda. . . . .	41
5.2. Análise da validação de resultados do módulo cruzamento. . . . .	42

---

5.3.	Exemplo do processo de reserva para ambas as interseções. . . . .	43
5.4.	Diferença entre os fluxos de entrada e saída (esquerda) e velocidade média dos veículos (direita) para um fluxo de entrada de 100, 200 e 300 veículos por hora. . . . .	44
5.5.	Comparação do algoritmo <i>LEMITM</i> com os algoritmos disponíveis para o cenário completo para um fluxo de entrada de 100 veículos por hora. . . . .	45
5.6.	Comparação do algoritmo <i>LEMITM</i> com os algoritmos disponíveis para o cenário completo para um fluxo de entrada de 200 veículos por hora. . . . .	46
5.7.	Comparação do algoritmo <i>LEMITM</i> com os algoritmos disponíveis para o cenário completo para um fluxo de entrada de 300 veículos por hora. . . . .	47
5.8.	Fluxo de saída para os diferentes métodos para fluxos de entrada de 100, 200 e 300 veículos/h. . . . .	48
5.9.	Comparação da percentagem do número de colisões resolvidas entre os dois <i>datasets</i> . . . . .	49
5.10.	Velocidade média (esquerda) e consumo médio dos veículos (direita). . . . .	49
5.11.	Fluxo de saída para os 4 algoritmos identificados no gráfico. . . . .	50
5.12.	Velocidade média dos veículos para os 4 algoritmos identificados no gráfico. . . . .	51
5.13.	Consumo médio de gasolina para os 4 algoritmos identificados no gráfico. . . . .	51
5.14.	Fluxo de saída para os 5 algoritmos identificados no gráfico. . . . .	52
5.15.	Velocidade média dos veículos para os 5 algoritmos identificados no gráfico. . . . .	52
5.16.	Consumo médio de gasolina para os 5 algoritmos identificados no gráfico. . . . .	53
5.17.	Comparação do fluxo de saída entre os dois tipos de interseções. . . . .	53
5.18.	Margens de reserva dos algoritmos com comunicação. . . . .	54
5.19.	Ângulo traseiro e dianteiro para velocidades de 10 km/h (cima) e 70 km/h (baixo). . . . .	55
A.1.	Resultados do métodos tradicionais nos simuladores <i>VISSIM</i> e <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	63
A.2.	Resultados do método <i>LEMITM</i> apicado no cenário completo. . . . .	64
A.3.	Resultados dos métodos comparados com o <i>LEMITM</i> . . . . .	64
A.4.	Resultados dos métodos com reserva espacio-temporal para a rotunda. . . . .	65
A.5.	Resultados dos métodos com reserva espacio-temporal para o cruzamento. . . . .	66
A.6.	Resultados da Análise de Desempenho do Método <i>FMITM</i> . . . . .	67
A.7.	Trajecto para avaliar ângulo traseiro do sistema <i>4WS</i> . . . . .	68

# Lista de Tabelas

2.1. Simuladores Existentes . . . . .	7
2.2. Modelos microscópicos de consumo de combustível e emissões de $CO_2$ . . . . .	9
2.3. Desempenho dos Métodos Tradicionais - Tempo de Espera (s) . . . . .	11
2.4. Algoritmos de gestão - Sinalização Luminosa . . . . .	12
2.5. Algoritmos de gestão com reserva prévia. . . . .	13
3.1. Especificações dos tipos de veículos. . . . .	22
3.2. Características dos Combustíveis. . . . .	24
3.3. Algoritmos existentes no <i>ISR-TrafSim</i> . . . . .	25



# Abreviaturas

<b>ISR-TrafSim</b>	Institute of Systems and Robotics Traffic Simulator
<b>ITS</b>	Intelligent Transportations Systems
<b>ITM</b>	Intelligent Traffic Management
<b>CIITM</b>	Crossroads Intersection Intelligent Traffic Management
<b>ITMD</b>	Intelligent Traffic Management Deactivated
<b>STLS</b>	Standard Traffic Light System
<b>WMITM</b>	Waiting Method Intelligent Traffic Management
<b>EMITM</b>	Early Method Intelligent Traffic Management
<b>FMITM</b>	Forward Method Intelligent Traffic Management
<b>LEMITM</b>	Legacy Early Method Intelligent Traffic Management
<b>I2V</b>	Infrastructure to Vehicle
<b>V2I</b>	Vehicle to Infrastructure
<b>V2V</b>	Vehicle to Vehicle
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>SMA</b>	Sistema Multiagente
<b>2WS</b>	Two Wheel Steering
<b>4WS</b>	Four Wheel Steering
<b>WTT</b>	Well To Tank
<b>TTW</b>	Tank To Wheel



# 1. Introdução

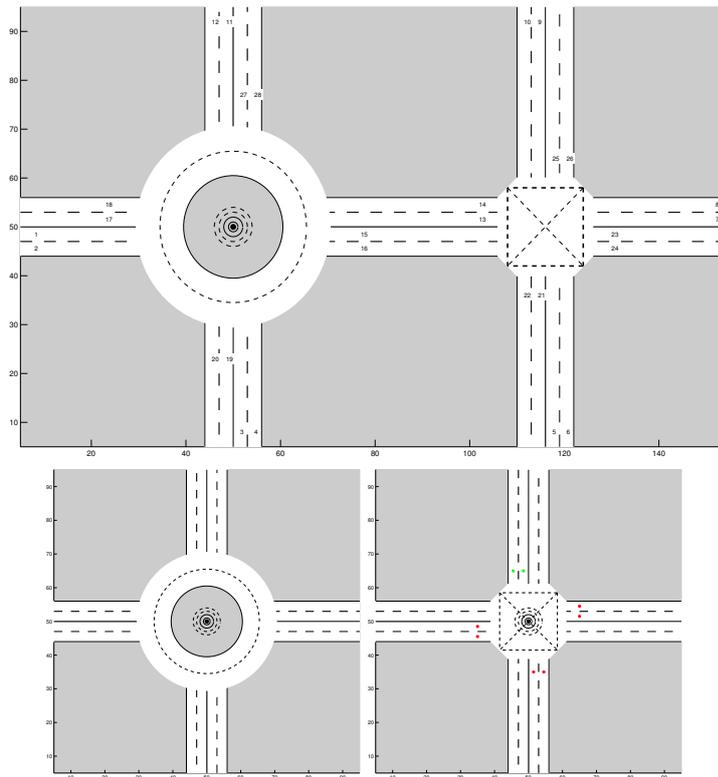
## 1.1. Motivação

Desde a invenção do carro, a frequência, o volume e a rapidez do transporte de pessoas têm vindo a aumentar significativamente. Paralelamente a este crescimento, a capacidade, a qualidade e a eficácia das infraestruturas, tais como, estradas, interseções e rotundas também têm sofrido melhorias significativas. No entanto, estas melhorias não são suficientes para evitar o congestionamento do trânsito e acidentes, sendo estas infraestruturas usadas muito acima da sua capacidade durante as horas de elevado tráfego, devido à ausência de um sistema de controlo de tráfego eficiente, que tire partido de todas as potencialidades de interseções inteligentes. Terá de se ter em conta que o objetivo de todos os veículos é a realização do percurso desejado da forma mais rápida e segura possível. Este comportamento pode gerar situações adversas como a ocorrência de engarrafamentos e acidentes devido ao conflito de interesses entre os condutores envolvidos. Em Inglaterra, os custos devido a engarrafamentos foram estimados na ordem dos 34000 milhões de euros [Goodwin, 2004]. Dada a conjuntura económica atual e a subida do preço dos combustíveis é necessário a redução dos consumos energéticos, através de um perfil de condução que vise a eficiência energética e, por sua vez, as emissões de  $CO_2$ , uma vez que estas estão diretamente relacionadas [Oliver-Hoyo and Pinto, 2008]. Segundo o estudo de Nagurney, 15% das emissões de  $CO_2$  no mundo provêm dos veículos automóveis [Nagurney, 2000], sendo esta uma das maiores preocupações ambientais à escala global.

Existem inúmeros simuladores para o estudo do desempenho de interseções e/ou redes de interseções rodoviárias, contudo, a maior parte destes possuem uma arquitectura fechada, impossibilitando a aplicação e desenvolvimento de novas técnicas de gestão de tráfego. Devido a este entrave surgiu a necessidade, por parte do Instituto de Sistemas e Robótica, de desenvolver um simulador *open source*, o ISR-TrafSim, o qual várias pessoas podem usar, permitindo que adicionem funcionalidades ao mesmo.

## 1.2. Contextualização

Esta dissertação tem como base o simulador de tráfego rodoviário designado *Institute of Systems and Robotics Traffic Simulator (ISR-TrafSim)*, desenvolvido por Ricardo Parafita e Luís Conde Bento [Bento et al., 2012a][Bento et al., 2012b]. Este simulador



**Figura 1.1.:** Módulo do cenário completo (cima), rotunda (canto esquerdo inferior) e cruzamento (canto direito inferior).

possui um cenário composto por uma rotunda e um cruzamento, como ilustra a figura (Figura 1.1). Inicialmente foram desenvolvidos dois algoritmos descentralizados para gestão de tráfego, sendo o funcionamento destes explicado na secção 4.2.2. O referido simulador tem integrados diversos métodos de posicionamento, como por exemplo, sistemas de navegação inercial, sistemas de navegação por satélite, odometria, fusão sensorial e fontes de informação auxiliar como sensores de distância laser e detetores de magnetos. O simulador possui também um sistema de comunicação entre veículos e entre veículos e infra-estruturas [Bento et al., 2012b]. Na figura 3.6 pode ser observado o painel de configuração de uma determinada simulação.

### 1.3. Objetivos

O objetivo desta dissertação é maioritariamente o desenvolvimento de técnicas inteligentes de gestão de tráfego (*ITM*), utilizando mecanismos de pré-reserva em matrizes espacio-temporais com comunicação *Veículo para Veículo* (*V2V*), *Veículo para Infraes-*

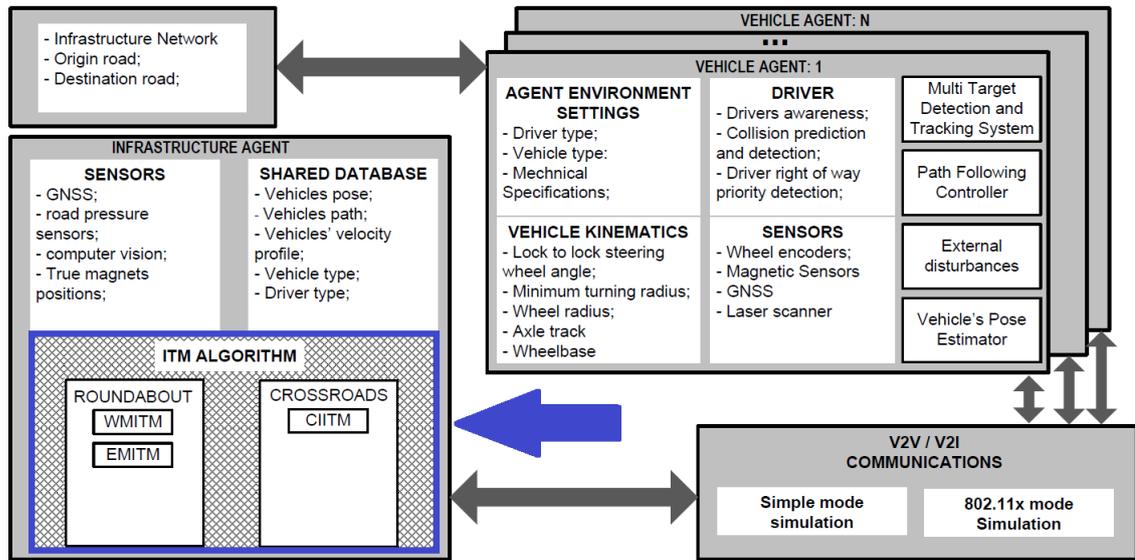


Figura 1.2.: Arquitetura do simulador *ISR-TrafSim*.

estrutura (*V2I*) e *Infraestrutura para Veículo (I2V)*. O objectivo inicial consiste em implementar no cruzamento os algoritmos já existentes para a rotunda, mais propriamente, o *Waiting Method Intelligent Traffic Management (WMITM)* e o *Early Method Intelligent Traffic Management (EMITM)*, procedendo-se depois ao desenvolvimento de dois novos algoritmos de *ITM*: o *Legacy Early Method Intelligent Traffic Management (LEMITM)* e o *Forward Method Intelligent Traffic Management (FMITM)*. Estes deverão ser desenvolvidos de modo a tornar o simulador o mais abrangente possível, permitindo a contemplação de veículos que não possuam sistemas de comunicação. A Figura 1.2, apresenta a arquitectura do *ISR-TrafSim*. Esta dissertação foca-se no módulo *ITM Algorithm*.

Pretendeu-se também realizar uma otimização do cenário do simulador, no sentido de se poder testar cada intersecção separadamente, pois um grande constrangimento no desempenho do cenário atual é a existência de uma estrada de ligação entre as duas intersecções com comprimento reduzido, o que reflete pouco a realidade. Para este fim foram criados dois módulos independentes de rotunda e cruzamento, para posteriormente se poder avaliar o desempenho dos algoritmos inteligentes em cada intersecção.

## 1.4. Trabalho Realizado e Contribuições Chave

Durante a elaboração desta dissertação foram realizadas várias tarefas, estando elas divididas em áreas diferentes:

1. Desenvolvimento no Simulador *ISR-TrafSim*

- a) Adaptação para o cruzamento de dois métodos de gestão de tráfego (*WMITM* e *EMITM*) que foram desenvolvidos para a rotunda [Bento et al., 2012a]. Com este desenvolvimento foi possível avaliar o desempenho destes algoritmos quando aplicados simultaneamente nas interseções contempladas no cenário representado na Figura 1.1.
  - b) Implementação da funcionalidade de mudança de faixa por parte de um veículo caso encontre um outro à sua frente e a faixa adjacente esteja disponível.
  - c) Desenvolvimento de módulos independentes para cada interseção, como ilustra a Figura 1.1, de forma a se poder avaliar o desempenho dos algoritmos desenvolvidos separadamente em cada interseção. Estes módulos poderão ser mais tarde usados para realização de cenários com mais interseções, tendo, para isso, de ser implementado um sistema de comunicação e sincronização entre eles.
  - d) Estudo do limite das margens de segurança para reserva dos algoritmos *ITM* de modo a evitar possíveis colisões caso os condutores não sigam o perfil de velocidade definido.
  - e) Implementação do sistema de *four wheel steering (4SW)* nos veículos.
2. Desenvolvimento de algoritmos *ITM*
    - a) Desenvolvimento e implementação do *LEMITM*, um novo algoritmo inteligente de gestão de tráfego que permite a existência de um cenário misto de veículos com e sem sistemas de comunicação *V2I* e *V2V*.
    - b) Desenvolvimento e implementação do *FMITM*, um novo algoritmo de gestão que gera um perfil de velocidade para cada veículo, com base em reservas espacio-temporais.
  3. Teste dos algoritmos e módulos implementados
  4. Validação dos resultados da circulação automóvel sem sistemas de gestão, para a rotunda e cruzamento, usando um simulador validado, o *VISSIM*.

## 1.5. Publicações

Os resultados da adaptação dos métodos de gestão de tráfego existentes na rotunda (*WMITM* e *EMITM*) para o cruzamento, assim como, desenvolvimento e resultados do algoritmo *LEMITM*) contribuíram para a publicação de um artigo na 16<sup>a</sup> Conferência Internacional de Sistemas Inteligentes de Transportes [Bento et al., 2013].

## 2. Estado da Arte

### 2.1. Simulação de Tráfego

Devido à ineficiência dos sistemas convencionais (cruzamentos, rotundas) em atenuar os problemas causados pelo aumento de tráfego (engarrafamentos, acidentes, etc.), a área de *Intelligent Transportations Systems (ITS)* tem vindo a ser cada vez mais objeto de estudo. A investigação nesta área tem revelado resultados promissores, no entanto, a implementação dos sistemas desenvolvidos implica um enorme investimento, levando ao desenvolvimento de simuladores de tráfego automóvel pois, num ambiente de simulação, podemos avaliar o desempenho das técnicas de gestão desenvolvidas.

Simulação é um método baseado no desenvolvimento de um modelo computacional. Este modelo permite descrever o comportamento de um determinado sistema, podendo este ser um sistema real ou proposto. A partir deste método poder-se-ão extrair inferências válidas sobre o comportamento do modelo computacional desenvolvido, a partir da observação e análise das experiências realizadas com o mesmo. Durante os últimos anos, a Simulação tem-se vindo a tornar uma das ferramentas mais utilizadas para a análise de sistemas. Assim, com este método, pretende-se obter uma melhor compreensão de como o sistema se comporta aquando da ocorrência de mudanças no mesmo. Este conceito é utilizado também para a análise e projecto de sistemas de tráfego.

#### 2.1.1. Tipos de Simuladores de Tráfego

Os simuladores de tráfego são divididos em três grandes categorias de acordo com o nível de representação dos veículos [Ehlert and Rothkrantz, 2001][Burghout et al., 2006][Potuzak. and Herout, 2007]:

- Macroscópicos - nesta categoria de simuladores, os veículos costumam ser tratados como um conjunto, onde o seu movimento é modelado recorrendo a equações matemáticas, levando a que estes simuladores sejam computacionalmente mais rápidos. As principais grandezas analisadas neste tipo de simuladores são: fluxo  $f$ , densidade  $d$  e velocidade média  $\bar{v}$ . Entende-se por fluxo  $f$ , o número de veículos que passam por um determinado espaço durante o período  $[t, t + \delta t]$  por unidade de tempo, onde  $t$  e  $\delta t$  são o tempo inicial e o período, respetivamente. Densidade  $d$  é definida como o número de veículos que estão presentes num dado espaço  $[x, x + \delta x]$  por unidade

de comprimento, num dado momento  $t$ , onde  $x$  e  $\delta x$  são, respectivamente, o ponto inicial desse espaço e o comprimento do mesmo. Por fim, velocidade média é dada pela razão entre a densidade e o fluxo, ou seja,  $\bar{v} = \frac{d}{f}$ . Uma vez que estas grandezas estão condicionadas a uma localização e ao tempo, estas são normalmente descritas pelas funções  $f(x, t)$ ,  $d(x, t)$  e  $\bar{v}(x, t)$  [Hoogendoorn and Bovy, 2001].

- Microscópicos - nesta categoria, ao contrário da anterior, cada veículo é tratado individualmente. Nesta técnica são consideradas mudanças de via, os tipos de condutores e veículos, assim como, as interações entre eles e o ambiente que os rodeia. A principal vantagem deste tipo de simuladores é que o comportamento dos condutores e dos veículos são descritos em detalhe. Contudo, as suas limitações são a necessidade de uma grande capacidade de memória para armazenamento de dados e o facto de se tornarem lentos quando usados para uma grande rede de tráfego, ou seja, este tipo de simuladores são mais indicados para estudo de tráfego locais (rotundas, cruzamentos, interseções).
- Mesoscópicos - neste tipo de simuladores, o fluxo de tráfego é descrito em menos detalhe que nos simuladores microscópicos e em maior detalhe que nos macroscópicos. O comportamento dos veículos e dos condutores não são descritos individualmente mas em conjuntos de veículos, de forma semelhante aos modelos macroscópicos.

Na Tabela 2.1 estão representados alguns simuladores de tráfego com maior relevância, assinalando em que categoria se inserem e acompanhados com uma breve descrição das características principais de cada um. Pode ser visto também o tipo de licença e a portabilidade de cada um, nas colunas Licença e Portabilidade, respetivamente.

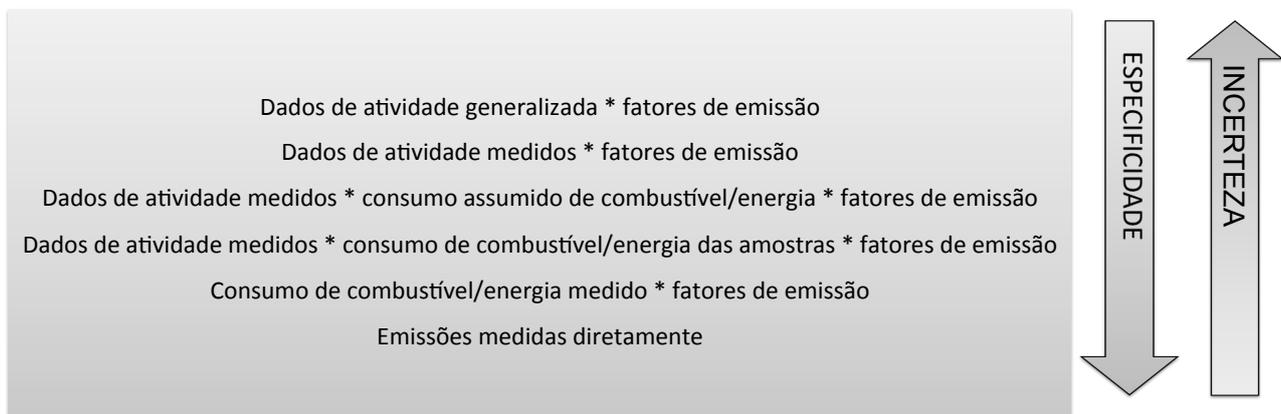
## 2.1 Simulação de Tráfego

**Tabela 2.1.: Simuladores Existentes**

Nome	Tipo	Licença	Portabilidade	Descrição
SUMO [Behrisch et al., 2011]	Micro	Free Open Source	Windows Unix	“ <i>Simulation of Urban MObility</i> ”, é um simulador que tem como objetivo avaliar o comportamento dos vários veículos que integram uma determinada rede de tráfego . Essa rede é gerada usando uma aplicação chamada “ <i>netgen</i> ” ou importando um mapa de estradas digital. A ferramenta de importação de estradas permite a leitura de redes de tráfego de outros simuladores, tais como, <i>VISUM</i> , <i>VISSIM</i> ou <i>MATSIM</i> .
CORSIM [McTrans, 2006]	Micro	Pago	Windows	“ <i>Corridor Simulation</i> ” é um simulador microscópico que inclui o <i>NETSIM</i> , para simulações de redes de tráfego que possam possuir sistemas de sinais luminosos, e o <i>FRESIM</i> , para a simulação de sistemas de auto-estradas.
AIMSUN [Barceló, 2004]	Micro Meso	Pago	Windows Unix	<i>Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks</i> é um software de modelação de tráfego que nos permite modelar qualquer tipo de elemento possível de encontrar numa via, desde uma faixa de autocarro, bicicletas, peões ou até uma determinada região. Não existe um limite imposto pelo software para a dimensão da rede a simular, sendo este limite imposto apenas pelas características da máquina onde está a ser simulada. O <i>AIMSUN</i> tem a particularidade de produzir rápidas simulações, microscópicas, mesoscópicas ou mesmo uma simulação híbrida.
PARAMICS [Cheu et al., 2003]	Micro	Pago	Windows	<i>PARAllell MICROscopic Simulator</i> é uma das primeiras ferramentas de simulação de tráfego, do tipo microscópica, desenvolvida com capacidades de modelagem <i>ITS</i> . Este simulador foi desenvolvido com o intuito de ser possível simular interseções, uma auto-estrada ou a criação de uma rede de infraestruturas.
TransModeler [Caliper, 2014]	Micro Macro Meso	Pago	Windows	<i>TransModeler</i> é uma poderosa ferramenta para tarefas de modelação e planeamento de tráfego. Este simulador consegue simular praticamente todo o tipo de redes de tráfego, desde auto-estradas a zonas urbanas, assim como, a análise de redes multimodais em grande detalhe e com grande fiabilidade. Com este simulador pode-se visualizar o comportamento dos sistemas de tráfego projetdos em 2-D ou 3-D.
VISSIM [VISSIM, 2014]	Micro	Pago	Windows	O <i>VISSIM</i> é um simulador microscópico que permite uma construção de uma rede de tráfego através da junção de <i>links</i> . Poderão ser simuladas infraestruturas individuais ou até mesmo construir uma rede para, por exemplo, estudar o tráfego numa determinada cidade. É também possível incorporar peões, transportes públicos, ciclistas, etc. As simulações poderão ser projetadas em 2-D ou 3-D.

### 2.1.2. Modelos de Consumos e Emissões de $CO_2$

De forma a compreender as diferenças entre modelos de consumos e emissões de  $CO_2$ , [Williams et al., 2012] realizaram uma classificação baseada na simplicidade e incerteza dos parâmetros dos modelos (Figura 2.1). Podemos observar que é obtida maior precisão quanto mais nos aproximarmos das medidas exatas, sendo estas as emissões medidas diretamente do veículo.



**Figura 2.1.:** Exemplos de vários métodos para quantificar emissões (adaptado de [Williams et al., 2012]).

[Rakha et al., 2003] classificaram os modelos de consumo de combustível em 3 grupos principais, sendo estes classificados com o aumento do nível de complexidade:

- Modelos de fatores: incluem métodos simples de consumo de combustível.
- Modelos macroscópicos: usam parâmetros médios da rede rodoviária, nomeadamente para estimar as taxas de emissão em toda a sua extensão.
- Modelos microscópicos: estimam o consumo de combustível instantâneo e as taxas de emissão a um nível mais detalhado.

O estudo apresentado foca-se em modelos do tipo microscópico uma vez que, para interseções são os que mais se enquadram visto que se pretende analisar todas as variações dos parâmetros do desempenho dos veículos com máximo detalhe. Na tabela 2.2 estão presentes modelos de consumos com relevância na literatura do tipo microscópicos, acompanhados de uma breve descrição.

**Tabela 2.2.:** Modelos microscópicos de consumo de combustível e emissões de  $CO_2$ .

Modelo	Descrição
<i>Instantaneous Fuel Consumption Model (IFCM)</i>	Um modelo de estimativa de emissões relacionado com energia é descrito em [Bowyer et al., 1985] O modelo <i>IFCM</i> usa as características dos veículos tais como a sua massa, energia, parâmetros de eficiência, força de arrasto e componentes de consumo de combustível associados ao arrasto aerodinâmico e resistência de rolamento. Este modelo aproxima o consumo de combustível ao segundo.
<i>Four-mode Elemental Fuel Consumption Model (FMEFCM)</i>	<i>FMEFCM</i> foi introduzido por [Bowyer et al., 1985]. Este modelo para além dos parâmetros usados pelo <i>IFCM</i> usa também as velocidades inicial e final dos veículos e parâmetros energéticos.
<i>Vehicle Specific Power (VSP)</i>	O modelo <i>VSP</i> tem provado ser muito útil enquanto modelo microscópico para estimar o consumo de combustível dos veículos e taxas de emissões ([Jimenez-Palacios, 1998]. Este modelo está altamente correlacionado com a variação das emissões poluentes de veículos a <i>diesel</i> segundo a segundo. O <i>VSP</i> é uma medida da carga do veículo e é definida como a força por unidade de massa de forma a superar a inclinação da estrada, a resistência aerodinâmica e de rolamento e a aceleração inercial.
<i>Virginia Tech Microscopic (VT-Micro)</i>	Este modelo foi desenvolvido por [Ahn et al., 2002] a partir de testes com inúmeras combinações polinomiais de níveis de velocidade e aceleração, usando os dados captados por dinamómetros aplicados no chassi de veículos ligeiros. As emissões foram estimadas usando a equação de balanço do carbono em conjunto com medidas de consumo de combustível.

Os modelos microscópicos apresentados na tabela 2.2 são similares na medida em que ambos usam em detalhe os parâmetros dos veículos e as condições das estradas, de forma a calcular os consumos de combustível e emissões de  $CO_2$ . Este não é o caso para os modelos macroscópicos uma vez que, a sua maioria apresenta formas mais simples com base em estimativas baseadas em regressões, usando um conjunto pré-definido de parâmetros que variam com a classe na qual o veículo se identifica.

O simulador *ISR-TrafSim* possui um modelo de consumos e emissões do tipo microscópico uma vez que pretendemos obter medidas com a máxima precisão possível.

## 2.2. Algoritmos de Gestão de Tráfego

### 2.2.1. Técnicas Tradicionais para Gestão de Tráfego

O trânsito nas interseções pode ser regulado através de diversos métodos, sendo os mais tradicionais:

- **Sinais de Cedência de Passagem:** este sinal é usado para indicar aos condutores que deverão abrandar para estarem preparados para parar caso seja necessário. Ao aproximarem-se de uma interseção com esta sinalização os condutores deverão ceder a passagem a todos os veículos que nela circulam.
- **Sinais de Stop:** um sinal de stop obriga o condutor a realizar uma paragem completa antes de avançar para a interseção. Sob nenhuma condição o condutor poderá avançar sem parar primeiro. Este tipo de sinal limita consideravelmente o fluxo de saída de uma interseção.
- **Sinais Luminosos:** os sinais luminosos atuam como um sinal de stop quando está a vermelho e como um sinal de cedência de passagem quando está a verde ou amarelo.

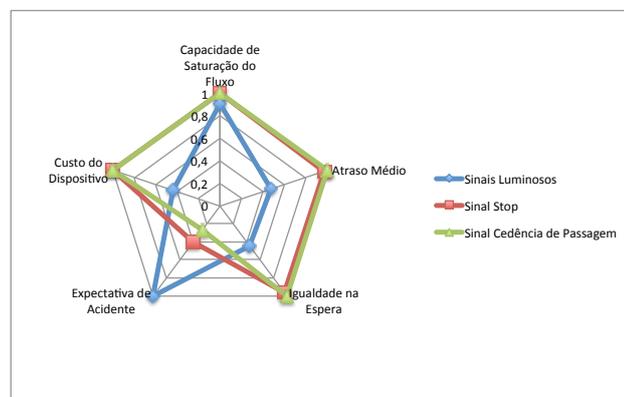
A maior parte dos acidentes nas interseções devem-se à não obediência da sinalização por parte dos condutores. As únicas exceções que poderão ocorrer, no que diz respeito à não obediência à sinalização, são quando o condutor recebe ordens de um agente da autoridade que esteja no local.

Vários trabalhos foram desenvolvidos para avaliar o desempenho dos diferentes métodos tradicionais usados para regular interseções. [Jones et al., 2009] realizaram um estudo através da análise dos três diferentes métodos usados numa rotunda, variando o número de faixas de rodagem da mesma. Analisando a Tabela 2.3, podemos verificar que a solução ótima para manter um fluxo de tráfego elevado, diminuindo o tempo de espera, é o uso de sinais de cedência de passagem. A pior solução nesta configuração é o uso de sinais luminosos com comutação estática, com os quais se obtém um elevado tempo de espera. Foi observado de igual modo que quanto maior for o número de faixas de rodagem melhor desempenho a interseção tem.

[Zhu et al., 2009b] analisaram o impacto destes três métodos de controlo de tráfego aplicados numa rotunda. Na figura 2.2 podemos observar o impacto de cada método de controlo de gestão de tráfego para a rotunda. De notar que os resultados apresentados na figura apresentam-se normalizados, de 0 a 1, do pior para o melhor desempenho. Numa primeira análise são levantadas algumas dúvidas acerca do custo do dispositivo, no entanto, conclui-se que usando um sistema de sinalização luminosa consegue-se controlar a ocorrência de acidentes. Apesar de os outros métodos conseguirem aumentar substancialmente o fluxo de saída podem tornar-se perigosos aumentando a expectativa da ocorrência de acidentes.

**Tabela 2.3.:** Desempenho dos Métodos Tradicionais - Tempo de Espera (s)

Rotunda com uma Faixa de Rodagem			
Veículos/hora	Sinal de Cedência	Sinal de Stop	Sinais Luminosos
1800	0.9704	0.9762	4.6797
3000	1.0691	1.4886	7.8653
4800	1.4660	2.0226	10.2129
Rotunda com duas Faixas de Rodagem			
Veículos/hora	Sinal de Cedência	Sinal de Stop	Sinais Luminosos
1800	0.5420	0.4005	3.5859
3000	0.6508	0.6096	5.8696
4800	1.2337	1.4381	8.8374



**Figura 2.2.:** Análise do impacto dos três métodos de regulamentação numa rotunda.

### 2.2.2. Algoritmos Inteligentes para Interseções com Sinalização Luminosa

A otimização de sinais luminosos é uma tarefa extremamente difícil. Esta tarefa até mesmo para interseções simples, com pequenas junções, pode-se tornar complexa podendo mesmo nunca nos levar a uma solução ótima. Esta complexidade irá aumentar, ainda mais, para interseções que possuam múltiplas junções, onde o estado de um sinal luminoso poderá influenciar o fluxo de tráfego existente noutras vias que possuam sinais luminosos. Outro problema, que incrementa a complexidade desta tarefa, é a constante mudança da intensidade do fluxo de tráfego, variando esta consoante a altura do dia em que nos encontramos.

Na prática, a maioria dos sinais luminosos são controlados por temporizações pré-definidas, ou ciclos fixos. Uma fase de um sinal luminoso representa uma fração de tempo durante a qual uma ou várias correntes de tráfego têm direito a avançar, estando as outras impedidas de o fazer. O início de uma fase é determinado quando há pelo menos

uma corrente de tráfego a ganhar permissão de avançar, sendo esta dada com o sinal verde, e termina sempre que pelo menos uma corrente de tráfego perde esse direito, com o aparecimento do sinal vermelho. A sequência de fases proporcionando a todas as correntes de tráfego o direito de avançar completa um ciclo. Em zonas urbanas com elevado tráfego, ciclos mais longos levam a uma melhoria no desempenho da interseção. Hoje em dia, os semáforos são na maioria controlados de duas maneiras: através da intensidade de tráfego que existe na interseção em questão ou através de temporizações pré-definidas. O primeiro método apresentado é usado sobretudo em países desenvolvidos pois é necessária a instalação de infra-estruturas nas interseções, levando a maiores custos de instalação, custos estes que nem todos os países podem suportar. Como se pode visualizar na tabela 2.4 alguns trabalhos têm sido desenvolvidos tendo como alvo a otimização do tempo de cada fase dos sinais luminosos.

**Tabela 2.4.:** Algoritmos de gestão - Sinalização Luminosa

Artigo	Descrição
[Girija et al., 2007]	Neste artigo é descrito um sistema de lógica difusa para controlar o tráfego num cruzamento, sendo este simulado em <i>Visual Basic (VB)</i> . Todos os dados relativamente ao estado do tráfego são capturados no VB, sendo transmitidos para o <i>MatLab</i> , onde se tomará decisão quanto ao tempo de duração de fase que o semáforo irá tomar. Esta duração depende da quantidade de veículos que chegam ao cruzamento e da fila que existe. É apresentada uma comparação entre este método e o método tradicional de tempo fixo. Os resultados mostram que o controlador de lógica difusa possui melhor desempenho.
[Askerzade and Mahmood, 2010]	Este artigo descreve como calcular uma extensão de tempo ideal que irá ser adicionada ao tempo de fase de um sistema de controlo convencional de tempo fixo. O sistema foi desenvolvido de forma a simular um cruzamento isolado baseado em lógica difusa. Observa-se que o sistema desenvolvido apresenta melhor desempenho quando comparado a um controlador convencional de tempo fixo.
[Bento et al., 2012a]	Neste artigo é descrito um sistema inteligente de visão por computador, usando câmaras instaladas na interseção, que possuem a habilidade de detetar a aproximação de veículos e verificar o sinal de mudança de via para saber qual a direção que o veículo irá tomar, reservando espaço para a travessia do veículo. Este sistema evita que esteja um semáforo a verde numa via onde não existam veículos a transitar. Com este método é obtida uma melhoria de 36,5% no fluxo de saída quando comparado com um sistema convencional.

### 2.2.3. Algoritmos Inteligentes para Interseções com reserva prévia

Como alternativa aos métodos apresentados anteriormente foi efetuada uma nova abordagem designada como interseção inteligente com base em reserva. A interseção inte-

ligente é designada como uma solução futurista para gestão de tráfego em interseções de diversos tipos. Este conceito foi inicialmente proposto por [Dresner and Stone, 2004]. O conceito aproveita a conectividade e capacidades sensoriais dos futuros sistemas de transportes, onde interações autónomas entre diversos veículos e interseções estão previstas existir no futuro. Nestes tipos de interseções todos os agentes envolvidos necessitam de estar dotados de sistemas de comunicação. Na Tabela 2.5 podemos visualizar diversos métodos desenvolvidos para gestão de tráfego com base em sistemas de reserva prévia.

**Tabela 2.5.:** Algoritmos de gestão com reserva prévia.

Artigo	Descrição
[Dresner and Stone, 2004]	Neste artigo é descrito um processo de reserva no espaço $(x,y)$ e no tempo $(t)$ . O sistema desenvolvido é dotado de um agente de condução, o qual controla o veículo e um agente gestor interseção, o qual é colocado em cada interseção. O agente condutor ao aproximar-se da interseção irá tentar reservar um bloco espacio-temporal para fazer a travessia. Por sua vez, o gestor interseção irá decidir se rejeita ou aceita os pedidos de reserva, de acordo com a política de controlo de interseção ativa. Existem diversas politicas de reserva, entre elas a <i>First Come, First Served (FCFS)</i> . Os resultados mostram que se consegue reduzir o atraso dos veículos em cerca de 90% quando comparado com o uso de sinais de stop.
[Zohdy et al., 2012]	Este artigo apresenta uma nova ferramenta para otimizar os movimentos dos veículos autónomos nas interseções ( <i>iCACC</i> ). O conceito chave da ferramenta proposta é o controlo da trajetória dos veículos usando sistemas <i>Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)</i> para evitar colisões e minimizar o atraso dos veículos nas interseções. Com o <i>iCACC</i> , quando comparado com um sistema convencional de sinalização luminosa, consegue-se obter uma melhoria de 91% no atraso dos veículos e 82% no consumo de combustível.
[Huang et al., 2012]	Neste artigo é proposto um novo protocolo de reserva, que difere do <i>FCFS</i> apresentado em [Dresner and Stone, 2008], no sentido em que é necessário que os veículos façam uma constante atualização a cada incremento de tempo da sua informação. A interseção irá recomendar um perfil de velocidade para que os veículos sigam até que a abandonem, dando prioridades a pedidos dos veículos numa faixa hierárquica, baseada em diversos fatores, como por exemplo, as distâncias dos veículos à linha de stop. Devido a esta particularidade, este artigo submete-nos para um protocolo de reserva dinâmica. A interseção inteligente irá permitir uma redução de 85% do atraso dos veículos, 50% do consumo de combustível e entre 39%-50% das emissões poluentes.
[Zhu et al., 2009a]	Este artigo possui a descrição do desenvolvimento de uma nova política de reserva para interseções, que possuam sistemas de comunicação, focando-se na forma como o sistema atribuirá permissões de passagem para os veículos. Posto isto, é apresentada uma nova estratégia de alocação designada como <i>Look-ahead Intersection Control Policy (LICP)</i> , a qual procura minimizar o atraso dos veículos ao atravessar a interseção. Os resultados presentes neste artigo demonstraram que com esta nova abordagem existe uma melhoria de 25% no atraso dos veículos, comparando ao <i>FCFS</i> apresentado por [Dresner and Stone, 2008].



## 3. Arquitetura do Simulador *ISR-TrafSim*

De forma a ser possível obter um rápido desenvolvimento no simulador optou-se por desenvolvê-lo no ambiente de programação *MATLAB* porque é uma linguagem de alto nível, oferecendo uma enorme variedade de funções para análise de dados, operações matemáticas, manipulação de matrizes e uma maior facilidade de programação.

O *ISR-TrafSim* é um simulador do tipo microscópico onde são simuladas a maior parte das interações físicas entre os veículos e o meio envolvente. Os veículos são vistos como um simples objeto que está ligado ao cenário, interagindo com o meio ambiente que o rodeia. A percepção e o comportamento dos condutores são também simulados através da implementação de diferentes valores de velocidade, assim como, da predição e deteção de situações de colisão, variando estes com o tipo de condutor. O *ISR-TrafSim* foi projetado com uma arquitetura modular de modo a facilitar a inserção de novos módulos. Cada módulo pode, por exemplo, simular uma interação física, um sensor ou a dinâmica de determinado objeto.

Resumindo, os módulos poderão ser divididos em 3 grandes categorias: agente veículo, agente infraestrutura e comunicações *V2V/V2I*. Cada uma destas categorias possui um módulo para realizar cada tarefa, todas elas necessárias para o funcionamento do simulador.

De seguida será feita uma abordagem a estes 3 módulos principais, assim como aos diferentes módulos, que são essenciais para a gestão do tráfego. Será feita também uma descrição da interface criada e as suas características.

Durante a elaboração deste capítulo foi consultado o documento “*ISR-TrafSim - Internal Technical Report, 2013*”

### 3.1. Agente Veículo

Por definição, um sistema multiagente (*SMA*) é composto por um grupo de agentes individuais capazes de interagir entre si e o meio envolvente [Chen and Cheng, 2010]. O movimento do trânsito no interior de uma cidade pode ser visto como um *SMA*, uma vez que cada veículo é uma entidade individual, que interage com o meio envolvente e com

outros veículos, onde o comportamento de cada um é definido com base na percepção do condutor, nas leis de trânsito e nos mecanismos de sinalização.

Para obter um simulador com o nível de detalhes pretendido, tornando-o o mais realista possível, aspetos como o campo de visão de cada condutor, comportamento dos mesmos e os diferentes tipos de veículos deverão ser tidos em conta. Cada um destes componentes são módulos que serão apresentados de seguida.

### 3.1.1. Cinemática do veículo

Os veículos simulados possuem 4 rodas e o seu movimento é descrito por um conjunto de relações matemáticas que possuem puras translações e rotações, transformando assim, o seu movimento contínuo num movimento discreto. Este processo é conhecido como modelo cinemático. Estes modelos possuem a particularidade de manter a direção e velocidade completamente desacoplados, levando a que a cinemática seja mais simples de projetar. São utilizados em investigação veículos que possuem o sistema de *4WS* [Mendes et al., 2003][Bento et al., 2003]. Existem também fabricantes que já possuem em comercialização veículos ligeiros com este sistema [Besselink et al., 2008][Engineer, 2007].

As equações do movimento do eixo traseiro estão representadas na equação 3.1:

$$\begin{cases} \dot{x}_R = V_R \cdot \cos(\theta + \chi) \\ \dot{y}_R = V_R \cdot \sin(\theta + \chi) \\ \dot{\theta} = V_R \cdot \frac{\sin(\psi + \chi)}{L \cdot \cos(\psi)} \end{cases} \quad (3.1)$$

Assim, o modelo cinemático do veículo, assumindo que as rodas rodam sem deslizamento, para um ponto de referência localizado em  $ICCV$ , ver figura 3.1, está representado na matriz 3.2.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \chi) \\ \sin(\theta + \chi) \\ \frac{\sin(\varphi + \chi)}{L \cos(\psi)} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_3 \quad (3.2)$$

onde  $v_1$  representa a velocidade linear do veículo,  $v_2$  a velocidade angular das rodas de direção dianteiras,  $v_3$  a velocidade angular das rodas de direção traseiras,  $L$  a distância entre os eixos dianteiro e traseiro,  $\chi$  o ângulo de direção traseiro,  $\varphi$  o ângulo de direção dianteiro e, por fim,  $\theta$  é a orientação do veículo no sistema de coordenadas mundo.

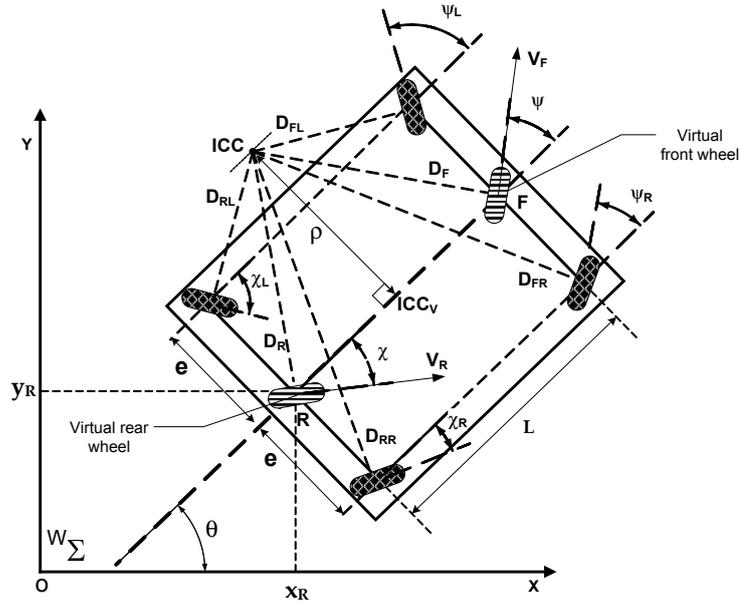


Figura 3.1.: Cinemática do veículo.

### 3.1.2. Modelo de odometria e encoders

O método mais simples para estimar a pose de um veículo é a odometria. Este método usa encoders acoplados às rodas do veículo para, através da contagem dos pulsos, medir o deslocamento das rodas a que estão acoplados. Na equação 3.3 está representado um modelo de odometria para o sistema  $4WS$  apresentado anteriormente.

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + \Delta \cos\left(\theta_k + \chi_k + \frac{w}{2}\right) \\ y_{k+1} = y_k + \Delta \sin\left(\theta_k + \chi_k + \frac{w}{2}\right) \\ \theta_{k+1} = \theta_k + w \end{cases} \quad (3.3)$$

onde  $\Delta$  é o comprimento do arco e  $w$  a rotação.

Assumindo que não existe deslizamento das rodas e usando apenas os dados dos encoders acoplados nas rodas traseiras e o ângulo de direção do eixo traseiro, então

$$\Delta = \frac{\Delta_{RR} + \Delta_{RL}}{2}, w = \frac{\Delta_{RR} - \Delta_{RL}}{2e \cos(\chi)}, \quad (3.4)$$

onde  $e$  é metade da distância entre as rodas e  $\Delta_{RR}$  e  $\Delta_{RL}$  são calculados usando as medidas dos encoders direito e esquerdo, respetivamente.

### 3.1.3. Planeador de velocidade e sistema anti-colisão

O perfil de velocidade de cada veículo deriva das leis de trânsito e do meio ambiente que rodeia o veículo em questão. Para cada condutor simulado, um adequado perfil de velocidade será definido para a situação atual. O planeador de velocidade possui um processo para converter o comportamento humano para eventos discretos. Inicialmente, cada condutor irá listar todos os veículos próximos dele, simulando assim, o campo de visão de um condutor, podendo este possuir a forma elipsoidal, circular ou retangular (com dimensões configuráveis). Depois de estar concluída esta listagem, cada condutor irá intercepar o seu movimento com o dos outros veículos, decidindo, de seguida, qual a reação a tomar para que seja adotada uma circulação em segurança. Por exemplo, se o condutor está a fazer um trajecto em linha reta e deteta uma colisão com um carro da frente irá adotar um modelo de *car-following* [Treiber et al., 2000], onde a aceleração do veículo que irá seguir o da frente,  $dv/dt$ , é dada por:

$$\frac{dv}{dt} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_p} \right) - \left( \frac{s}{s^*} \right)^2 \right] \quad (3.5)$$

Este modelo especifica a aceleração do veículo em função de um termo de travagem dado pela relação entre a velocidade atual ( $v$ ) e a velocidade máxima permitida na estrada ( $v_p$ ), e a relação entre a distância atual entre os veículos ( $s$ ) e a distância desejada ( $s^*$ ), sendo que esta

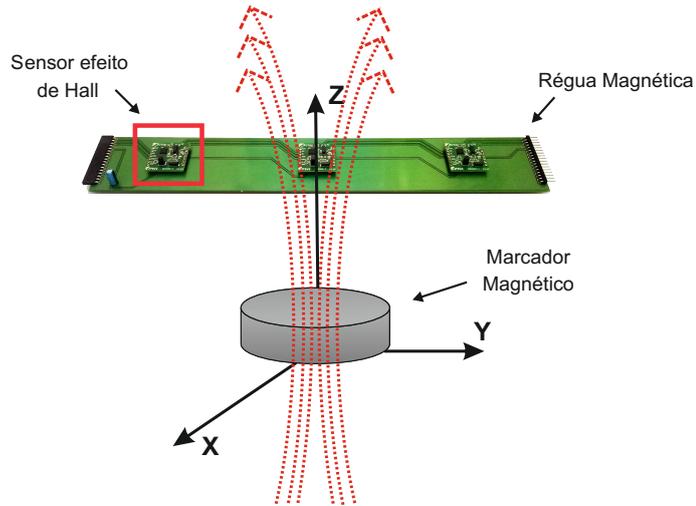
$$s^* = s_0 + \left( v \cdot T + \frac{v \cdot \Delta v}{2 \cdot \sqrt{a \cdot b}} \right) \quad (3.6)$$

varia dinamicamente com a velocidade e a taxa de aproximação.

A velocidade atual do veículo será usada para identificar o ponto de colisão com algum veículo e instante de tempo em que esta ocorrerá. Depois de obtida esta informação irão ser gerados comandos de aceleração e/ou travagem para que todos os conflitos sejam resolvidos, respeitando sempre todas as leis de trânsito.

### 3.1.4. Marcadores magnéticos

Um mecanismo para a estimativa e correção da posição de um veículo é o uso de uma régua magnética que irá detetar marcadores magnéticos (*MM*) colocados na estrada, estando a colocação destes simulada no *ISR-TrafSim*. Na figura 3.2 estão representados todos os componentes para este sistema, assim como a interação entre eles. A régua magnética é colocada na base do veículo, detetando o campo magnético que flui do *MM*, permitindo saber a posição do veículo na estrada em relação ao *MM*. Investigadores do



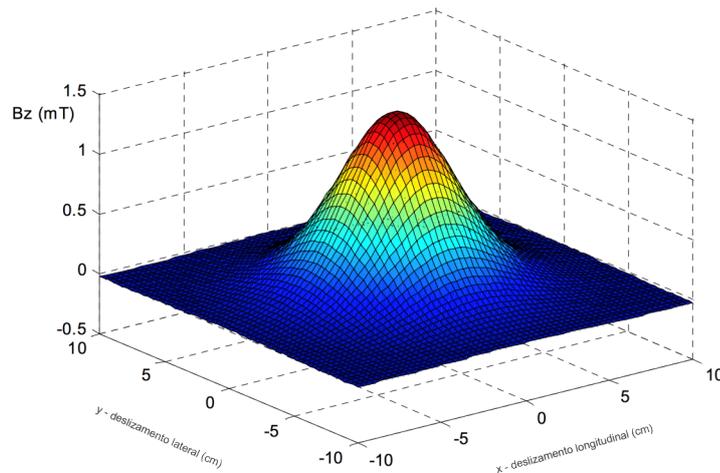
**Figura 3.2.:** Sistema marcadores magnéticos.

*Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)* modelaram um *MM* como um dipolo magnético. Temos então que o campo magnético  $B(x, y, z)$ , num dado ponto  $P(x, y, z)$  é dado por

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 M}{4\pi r^5} (3xz\hat{i} + 3yz\hat{j} + (2z^2 - x^2 - y^2)\hat{k}) [T] \quad (3.7)$$

onde  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ ,  $M$  é o momento magnético do *MM*, o eixo  $x$  corresponde à direção do movimento, o eixo  $y$  corresponde ao desvio lateral e  $z$  é função da altura em relação ao centro do *MM*.

Como podemos observar na figura 3.3, obtida a partir da equação 3.7, a componente vertical do campo magnético atinge o seu máximo quando o sensor está exatamente sobre o centro de massa do *MM*.



**Figura 3.3.:** Campo Magnético.

As vantagens deste sistema são a não influência das condições climáticas nas medidas e o facto de não ser necessário contacto físico para a realização das mesmas. Uma desvantagem deste sistema é a possibilidade de existir interferências devido à aproximação de materiais ferromagnéticos.

### 3.1.5. Laser

Um *laser range finder* (*LRF*) é um dispositivo usado para obter a distância a que este se encontra de objetos ao seu redor. Na generalidade são usadas duas técnicas fundamentais. Uma das técnicas é denominada como tempo de vôo, onde para se efetuar uma medição é emitido um pulso de luz que é refletido de volta para um recetor, sendo a distância determinada com base no tempo de vôo do pulso. A segunda técnica é denominada como mudança de fase, onde é emitido continuamente um feixe de uma onda sinusoidal, sendo que a distância será obtida com base na frequência e desfasamento entre os sinais emitido e refletido.

No *ISR-TrafSim* o mapa do cenário é representado por células e, para mapas de dimensão considerável e de elevada precisão, a simulação do *LRF* torna-se impraticável devido aos elevados tempos de processamento, caso seja usada uma linguagem de programação de alto nível, o *MatLab*. Para resolver esta situação, o módulo que simula o funcionamento do *LRF* foi implementado em *C++*, diminuindo assim o tempo de processamento. Na figura 3.4 pode-se observar o cone de deteção do *LRF* e a tracejado os pulsos emitidos para efetuar as medidas.

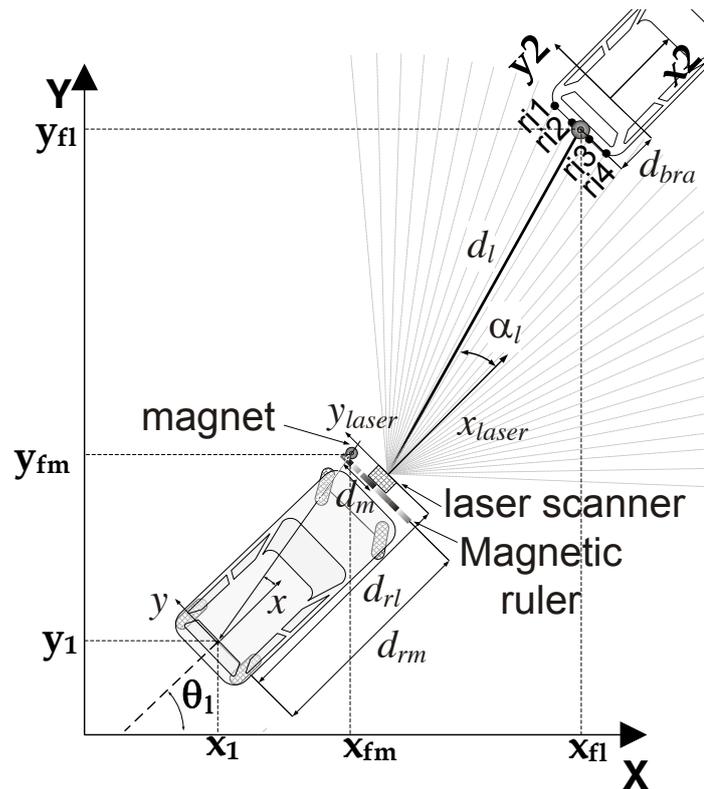


Figura 3.4.: LIDAR.

### 3.1.6. Tipos de veículos e condutores

O tráfego em meio urbano não é homogêneo e, para simular esta característica, o *ISR-TrafSim* possui a opção de simular diferentes tipos de veículos. Na presente versão do simulador apenas existem disponíveis dois tipos de veículos, estando apresentadas as suas características na Tabela 3.1. As especificações são reais e identificam o Renault Laguna III, para o veículo ligeiro, e a Renault Traffic, para o pesado de pequeno porte.

Outro aspeto que afeta a circulação rodoviária é o comportamento individual de cada condutor. No simulador existe a possibilidade de simular 3 tipos de condutores (I, II e III), sendo as velocidades máxima para cada um de 30, 40 e 50 km/h, respetivamente. Para além da variação da velocidade máxima foram também tidos em conta os parâmetros referentes à aceleração e travagem, fixando um limite para o incremento/decremento da velocidade em função do comando gerado pelo controlo de velocidade. Por omissão, os valores definidos são 5 m/s para o incremento e -10 m/s para o decremento. Todas estas configurações poderão ser alteradas antes de se iniciar uma simulação.

**Tabela 3.1.:** Especificações dos tipos de veículos.

Especificações		Tipo Veículo	
Característica	Unidade	Ligeiro	Monovolume
Largura	mm	1808	1904
Comprimento	mm	4295	4782
Roda	mm	205/55R16	205/65R16
Peso	Kg	1205	1912
Área Frontal	$m^2$	2.21	3.38
Coef. Deslizamento	–	0.326	0.362

### 3.1.7. Impacto Ambiental

Como foi mencionado anteriormente, uma das maiores preocupações relacionadas com engarrafamentos de trânsito é o custo ambiental, devido às emissões de gases poluentes. Deste modo, surgiu a necessidade de desenvolver um módulo capaz de calcular as emissões de  $CO_2$ , assim como, os consumos de combustível dos veículos. O modelo usado assume que todos os veículos possuem um sistema *start/stop* e que todo o cenário simulado é plano. Apesar de o cenário ser plano, a força gerada devido à inclinação da estrada também é calculada.

#### 3.1.7.1. Consumo de combustível e cálculo das emissões

O modelo do veículo é baseado em forças mecânicas atuando no veículo. De forma a calcular o consumo de combustível será necessário calcular a potência necessária tendo em conta as suas dependências físicas [Guzzella and Onder, 2005].

Considerando um veículo como um ponto de massa, a equação do seu equilíbrio pode ser escrita como

$$F_{trac} = F_{roll} + F_{aero} + F_{inertia} + F_{grade} \quad (3.8)$$

onde  $F_{trac}$  é a força de tração resultante nas rodas para mover o veículo para a frente,  $F_{roll}$  é a resistência de rolamento,  $F_{aero}$  é a força gerada devido à resistência aerodinâmica,  $F_{inertia}$  é a força inercial e  $F_{grade}$  é a força gerada devido ao declive da estrada.

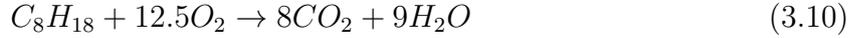
O fluxo de massa de combustível é representado por

$$\dot{m}_f = m_f \frac{w_{eng}}{N \cdot \pi} \quad (3.9)$$

onde  $w_{eng}$  é a velocidade de rotação do motor e  $N = 4$  pois a estarmos perante um motor a quatro tempos.

O total de combustível consumido é a soma do consumo de combustível em cada intervalo de tempo enquanto a força  $F_{trac}$  necessária é positiva. Neste módulo são analisados

dois combustíveis diferentes, gasolina e etanol, estando as suas propriedades representadas na Tabela 3.2. A equação química para a combustão [Pinkerton and Herbst, 2010] da gasolina é:



e para o etanol é:



O processo de combustão da gasolina e do etanol gera 8 e 2 moléculas de  $CO_2$ , respetivamente. Obtendo o número de moléculas de  $CO_2$ , produzidas na combustão, e a massa molar da gasolina ( $M_{C_8H_{18}}$ ), do etanol ( $M_{C_2H_6O}$ ) e do  $CO_2$  ( $M_{CO_2}$ ) podemos calcular as gramas de  $CO_2$  emitidas tanque-rodas (TTW). Para a gasolina obtemos:

$$TTW_{C_8H_{18}}^{CO_2} = \sum \dot{m}_f \cdot \rho_{C_8H_{18}} \cdot 8 \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{C_8H_{18}}} \quad (3.12)$$

e para o etanol:

$$TTW_{C_2H_6O}^{CO_2} = \sum \dot{m}_f \cdot \rho_{C_2H_6O} \cdot 2 \cdot \frac{M_{CO_2}}{M_{C_2H_6O}} \quad (3.13)$$

onde  $\rho_{C_8H_{18}}$  e  $\rho_{C_2H_6O}$  são as densidades da gasolina e do etanol, respetivamente e  $\dot{m}_f$  é o fluxo de massa de combustível. Usando as emissões poço-tanque ( $WTT^{CO_2}$ ) e as equações 3.12 e 3.13 podemos calcular as emissões poço-rodas. Para a gasolina obtemos:

$$WTW_{C_8H_{18}}^{CO_2} = TTW_{C_8H_{18}}^{CO_2} + \sum \dot{m}_f \cdot \rho_{C_8H_{18}} \cdot H_l^{C_8H_{18}} \cdot WTT_{C_8H_{18}}^{CO_2} \quad (3.14)$$

e para o etanol:

$$WTW_{C_2H_6O}^{CO_2} = TTW_{C_2H_6O}^{CO_2} + \sum \dot{m}_f \cdot \rho_{C_2H_6O} \cdot H_l^{C_2H_6O} \cdot WTT_{C_2H_6O}^{CO_2} \quad (3.15)$$

## 3.2. Agente Infraestrutura

### 3.2.1. Marcadores magnéticos e sensores de pressão

Como complemento a outros métodos de localização é possível colocar marcadores magnéticos no cenário de forma a que sejam detetados pelos veículos com régulas magnéticas, apresentadas na secção 3.1.4.

**Tabela 3.2.:** Características dos Combustíveis.

<b>Gasolina</b>			
Parâmetro		Valor	
Densidade	$\rho_{C_8H_{18}}$	0.75	[kg/l]
Lower Heating Value	$H_l^{C_8H_{18}}$	44.4	[MJ/kg]
Massa Molar	$M_{C_8H_{18}}$	114.22	[g/mol]
Poço-Tanque	$WTT_{C_8H_{18}}^{CO_2}$	12.5	[gCO <sub>2</sub> /MJ]
<b>Etanol</b>			
Parâmetro		Valor	
Densidade	$\rho_{C_2H_6O}$	0.79	[kg/l]
Lower Heating Value	$H_l^{C_2H_6O}$	28.86	[MJ/kg]
Massa Molar	$M_{C_2H_6O}$	46.07	[g/mol]
Poço-Tanque	$WTT_{C_2H_6O}^{CO_2}$	48.5	[gCO <sub>2</sub> /MJ]
<b>Dióxido de Carbono</b>			
Parâmetro		Valor	
Massa molar	$M_{CO_2}$	44.01	[g/mol]

As estradas estão também equipadas com sensores de pressão de passagem dando informação à infraestrutura quando passa um veículo em determinada zona. Esta informação poderá ser usada por um algoritmo de gestão, para que este saiba quando um veículo chega ou abandona determinada área da interseção.

### 3.2.2. Algoritmos de gestão de tráfego

O simulador *ISR-TrafSim* possui diversos algoritmos para se poder avaliar o desempenho dos mesmos para as interseções disponíveis. Na tabela 3.3 podemos observar os algoritmos disponíveis, assim como, uma breve descrição dos mesmos.

### 3.2.3. Controlador de fluxo de tráfego

Ao longo do dia, uma estrutura rodoviária enfrenta diferentes intensidades de tráfego, sendo o instante mais crítico no momento em que existe um elevado fluxo de veículos num pequeno intervalo de tempo, ocorrendo o fenómeno que também pode ser denominado como hora de ponta. Existe um módulo configurável responsável por simular a entrada de carros no cenário do simulador. Para uma melhor compreensão do referido módulo é importante diferenciar fluxo de tráfego e densidade de tráfego. O fluxo de tráfego pode ser descrito por [Suzuki et al., 2007]:

$$Fluxo = \frac{n}{T} \quad (3.16)$$

onde  $n$  representa o número de veículos que está a atravessar uma determinada secção da

**Tabela 3.3.:** Algoritmos existentes no *ISR-TrafSim*.

<b>Algoritmos <i>ISR-TrafSim</i></b>	
Cruzamento	
STLS	Quando este algoritmo está ativo, o cruzamento é regulamentado por sinais luminosos que alternam o seu estado em períodos de tempo fixos. Os sinais luminosos apresentam o mesmo estado em segmentos adjacentes e apenas permitem a passagem de veículos oriundos de uma direção a cada ciclo. O ciclo completo para uma determinada direção é composto por $T_{dir} = T_{verde} + T_{ama} + T_{verm}$ , onde $T_{verde}$ , $T_{ama}$ , $T_{verm}$ são os tempo de fase do sinal verde, amarelo e vermelho, respetivamente.
CIITM	Este algoritmo possui um sistema inteligente de visão por computador que, usando camaras, possui a habilidade de detetar a aproximação de veículos numa determinada faixa e de detetar o sinal de mudança de direção de todos os veículos. Depois de detetar a direção em que vai seguir irá reservar o espaço para fazer a travessia, libertando-o à medida que vai avançando. O cruzamento está equipado com sensores à saída de forma a detetar os veículos a abandonar o cruzamento.
Rotunda	
ITMD	Neste algoritmo o trânsito faz-se por forma a que os condutores deem a esquerda à parte central da rotunda, pelo que o trânsito se efetua no sentido giratório anti-horário, em conformidade com o artigo 16º do Código da Estrada. Os veículos que se aproximam da rotunda devem ceder a passagem a quem nela circula de acordo com o artigo 31º do Código da Estrada que regulamenta as cedências de passagem.
WMITM	Para este algoritmo de gestão de tráfego é necessário que os veículos e as infraestruturas estejam dotados de um sistema de comunicação. O veiculo irá comunicar com a interseção informando-a da sua velocidade e faixa de destino. O algoritmo irá gerar um caminho livre para o veículo fazer a travessia em segurança. Esta reserva irá ser feita imediatamente a seguir ao último instante de tempo reservado.
EMITM	Este algoritmo é muito semelhante ao <i>WMITM</i> mas no momento da reserva irá tentar reservar o primeiro espaço disponível. A sua diferença irá ser explicada em mais detalhe aquando da explicação da exportação dos algoritmos da rotunda para o cruzamento.

estrada durante o tempo  $T$ . Por outro lado, a densidade de tráfego pode ser definida por [Suzuki et al., 2007]:

$$Densidade = \frac{n}{X} \quad (3.17)$$

onde  $n$  representa o número de veículos que está presente numa secção da estrada de comprimento  $X$ . Para ajustar a densidade de tráfego nas áreas simuladas pode-se variar o fluxo de entrada de cada estrada, através do painel de configuração representado na Figura 3.6.

### 3.2.4. Sistema global de navegação por satélite

Atualmente, alguns veículos estão equipados com um sistema de posicionamento global (*GPS*), o qual permite obter posições que são usadas pelo condutor para atingir o destino desejado. Para um correto funcionamento, uma constelação de satélites deve fornecer cobertura com um mínimo de quatro satélites para a antena *GPS*. Para determinar uma posição, o sistema terá de resolver uma equação, onde existem quatro parâmetros desconhecidos: latitude, longitude, altitude e tempo.

É possível obter uma precisão centimétrica, com a ajuda de um recetor estacionário, numa técnica designada por *real-time kinematics GPS (RTK-GPS)* [Iqbal et al., 2009][Morales and Tsubouchi, 2007].

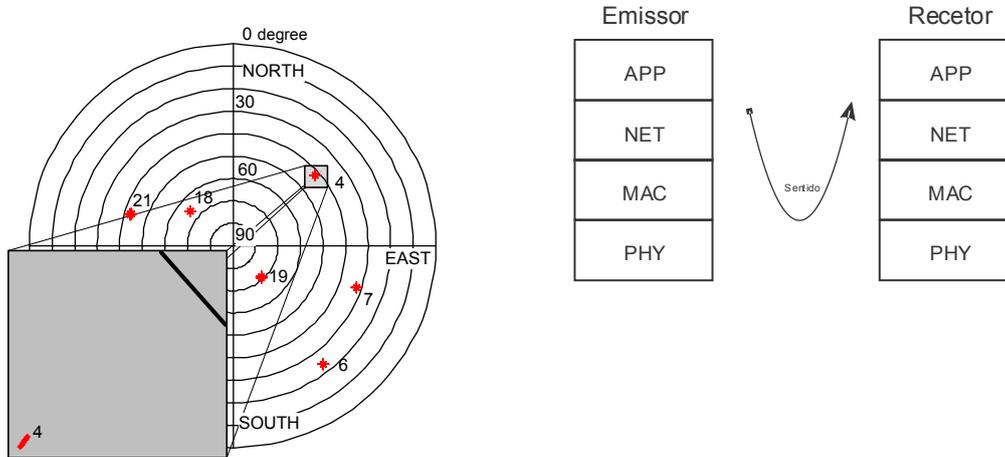
O simulador *ISR-TrafSim* está preparado para usar um software que simula a constelação *GPS USA* [Kaplan, 1996], o *GPSoft*. Na figura 3.5 à esquerda pode visualizar-se os satélites visíveis para uma antena numa determinada posição durante um determinado instante de tempo.

## 3.3. Comunicações *V2V* e *V2I*

As comunicações *V2V/V2I* fornecem um canal seguro para a troca de informação entre os veículos e infraestruturas. No simulador *ISR-TrafSim* é simulado um sistema de comunicação (*SC*) do tipo *IEEE 802.11 b/g/a*.

Baseado no trabalho de Saikat Ray [Ray et al., 2005], foi desenvolvido um simulador de eventos discretos, que simula uma rede bi-dimensional, de forma a simular um *SC* real. Este sistema possui vários parâmetros configuráveis, destacando-se os seguintes:

- Norma: *IEEE 802.11 b/g/a*.
- Modelo de propagação: *Friis*, modelo *two-ray* ou modelo *log shadow*.
- Número máximo de *RTS*.



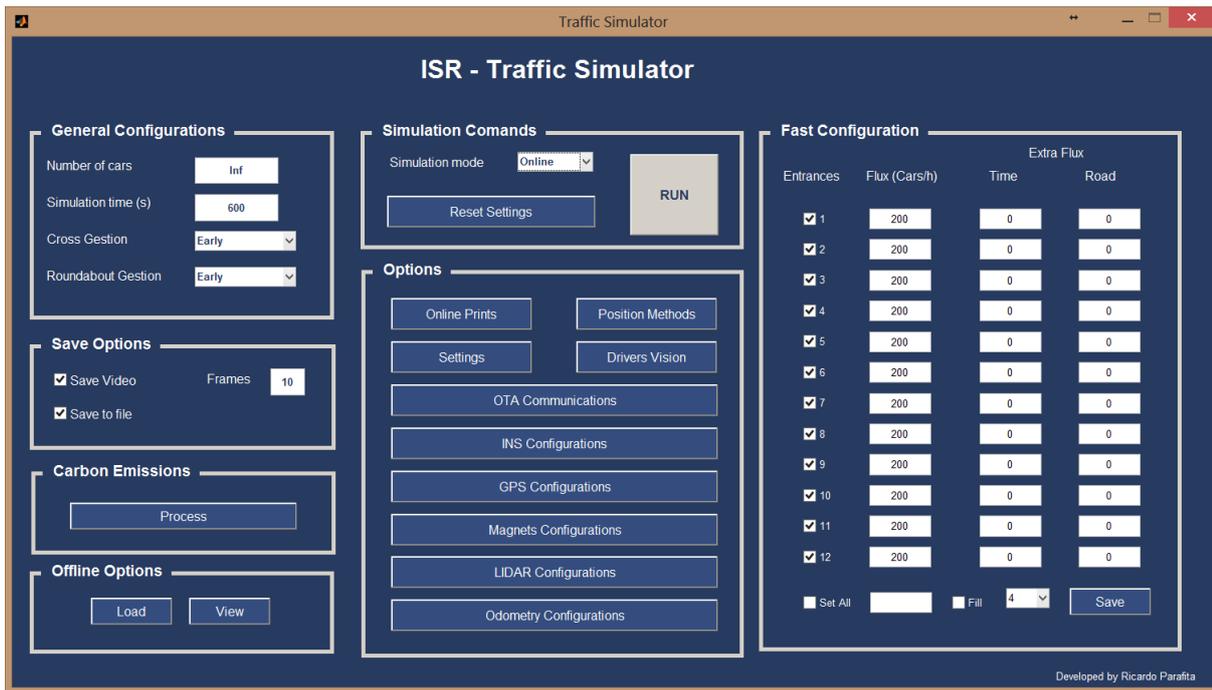
**Figura 3.5.:** Constelação de satélites simulada (esquerda) e modelo de comunicação *V2I/V2V* usado no *ISR-TrafSim* (direita).

Como podemos observar na figura 3.5 à direita, o *SC* é implementado usando 4 camadas: camada de aplicação (*APP*), camada de rede (*NET*), camada de ligação de dados (*MAC*) e camada física (*PHY*). Uma comunicação bem sucedida entre um nodo 1 e um nodo 2 consiste na realização do percurso  $APP1 \rightarrow NET1 \rightarrow MAC1 \rightarrow PHY1 \rightarrow PHY2 \rightarrow MAC2 \rightarrow NET2 \rightarrow APP2$  por um determinado pacote.

Ambas as infraestruturas presentes no simulador possuem módulos *V2I*, permitindo assim a troca de informação entre os veículos ao seu alcance e os algoritmos *ITMS*. Para permitir ao utilizador gerir a rapidez do simulador em função do nível de detalhe pretendido existe a opção que permite ao comutar o funcionamento do *SC* apresentado na figura 3.5 para um *SC* simplificado. Este *SC* simplificado consiste numa total abstração dos conceitos envolvidos na criação de uma ligação entre dois nodos da rede. Com este modo ativo os dados são enviados instantaneamente sem restrições e sem falhas, desde que a distância entre os dois nodos se encontre dentro de um determinado alcance que é definido pelo utilizador.

### 3.4. Cenário do *ISR-TrafSim*

Uma das vantagens do simulador *ISR-TrafSim* é a capacidade de simular vários cenários e testar diferentes módulos. Uma vez que o simulador é orientado para áreas urbanas, este permite a colocação de interseções (rotundas e cruzamentos) no cenário, sendo que



**Figura 3.6.:** Painel de configuração do *ISR-TrafSim*.

ambas possuem sinalização vertical ou luminosa para regular o trânsito. Estas definições não poderão ser alteradas durante uma simulação, mas poderão ser definidas pelo utilizador no início através dos ficheiros de configuração e/ou do painel de configuração apresentado em 3.6.

## 4. Novos Algoritmos de *ITM* e Desenvolvidos no *ISR-TrafSim*

No presente capítulo será inicialmente apresentada a solução encontrada para validar os resultados obtidos no simulador *ISR-TrafSim*. Esta validação será efetuada usando um simulador validado, o *VISSIM* [Dixon and Birchman, 2007]. De seguida, será descrita a implementação dos algoritmos de gestão desenvolvidos para as interseções em estudo. Por fim, serão apresentados os desenvolvimentos efetuados no simulador *ISR-TrafSim* ao longo da realização da presente dissertação.

### 4.1. Validação dos resultados para as interseções sem sistemas de gestão

Com o intuito de confirmar a veracidade dos resultados obtidos nas interseções sem sistema de gestão ativos, foi usada a versão para estudante do simulador *VISSIM*, apresentado na Tabela 2.1. A razão da escolha deste simulador deveu-se ao facto do mesmo se encontrar devidamente validado [Park and Schneeberger, 2003]. De forma a tornar a validação dos resultados o mais real possível, procedeu-se à construção de cenários com as mesmas medidas dos cenários do *ISR-TrafSim*, tanto para a rotunda como para o cruzamento. Na figura 4.1, à esquerda e à direita, podem ver-se os módulos criados para os testes da rotunda e do cruzamento, respetivamente.

De realçar que dado que este simulador não possui uma arquitetura totalmente aberta, e é uma versão de estudante, existiram algumas limitações aquando da criação de simulações idênticas às do simulador *ISR-TrafSim*. Um dos entraves foi a especificação das dimensões dos veículos, não sendo possível definir um valor específico, uma vez que apenas nos é permitido a definição do tipo de veículo. Para cada tipo de veículo existe uma gama de valores para definição da dimensão dos veículos, sendo esta escolhida aleatoriamente. Outro entrave foi o processo da definição do destino de um veículo quando este entra no simulador, sendo este processo diferente do adotado no *ISR-TrafSim*. Por fim, o último parâmetro que não nos foi possível configurar foi a aceleração de cada veículo.

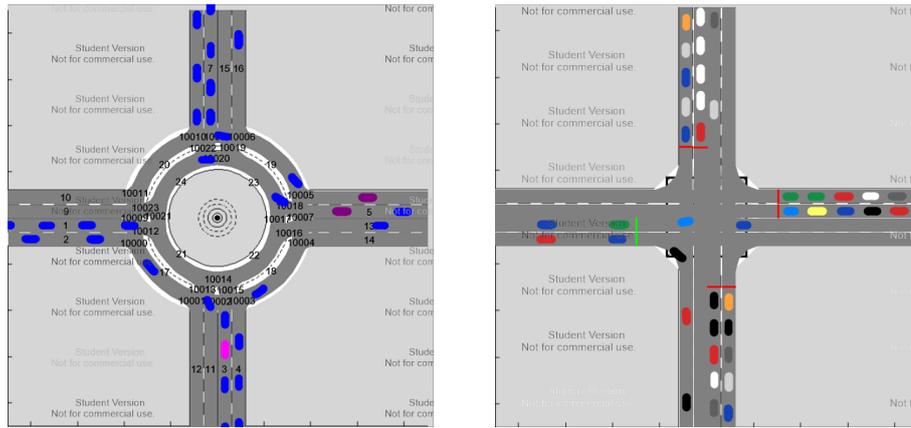


Figura 4.1.: Módulos criados no simulador *VISSIM* para validação dos resultados.

## 4.2. Algoritmos *ITM*

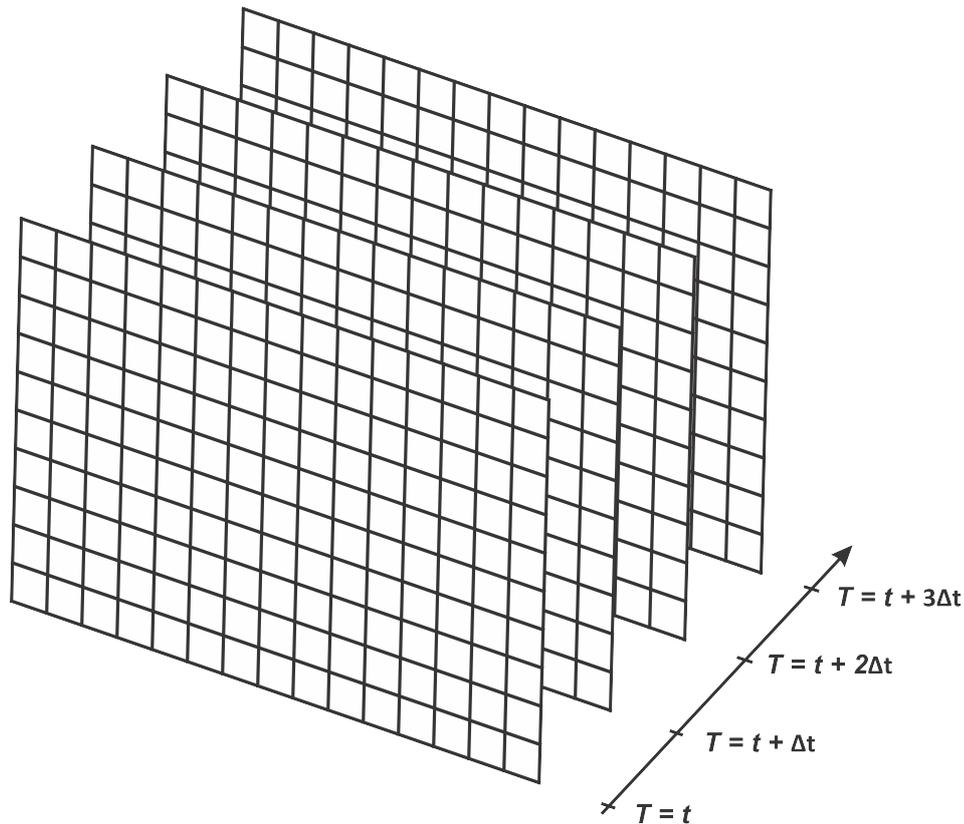
### 4.2.1. Teoria de Suporte

#### 4.2.1.1. Matriz Espacio-Temporal

Usando a posição do veículo, o sistema de gestão de uma determinada interseção irá calcular a distância desde o veículo à interseção. Se o veículo se encontrar dentro de um raio de controlo pré-definido a interseção irá ativar o sistema de gestão selecionado para o veículo em questão, gerando um caminho livre a ser tomado pelo veículo enquanto este realiza a travessia da interseção. O caminho livre gerado é composto por um caminho de duas dimensões, possuindo um determinado perfil de velocidade associado. Tanto o caminho 2D como o perfil de velocidade são usados no processo de reserva na matriz tri-dimensional. A matriz tri-dimensional é composta por um conjunto de camadas, representando cada uma um instante de tempo, onde  $\Delta t$  é o período de amostragem. Cada camada é dividida em células, sendo que cada uma representa um espaço bi-dimensional no cenário usado. Cada célula poderá ter o estado ocupado ou livre. Uma vez que esta matriz possui informação espacial e temporal é denominada por matriz espacio-temporal. Por motivos de segurança, a área de reserva na matriz espacio-temporal é maior que as dimensões dos veículos. Esta margem de segurança ( $A_{SM} = [wide; long][m]$ ) é ajustada de acordo com o algoritmo *ITM* ativo, onde *wide* ( $W$ ) é a largura de reserva e *long* ( $L$ ) a largura.

Na figura 4.2 pode ser observado um exemplo da matriz espacio-temporal.

Para melhorar o desempenho dos algoritmos *ITM*, que usam os sistemas de reserva na matriz espacio-temporal, é necessário um perfeito dimensionamento dos limites mínimos, com os quais podemos definir as margens de segurança para reserva. Os veículos irão seguir



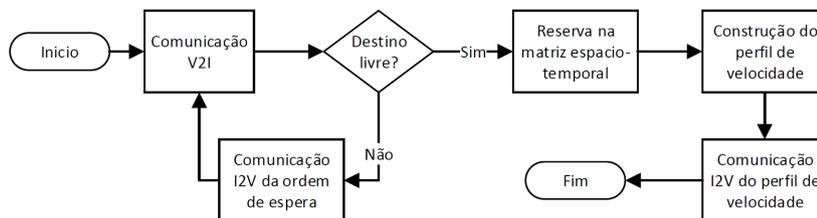
**Figura 4.2.:** Matriz espaço-temporal.

um determinado perfil de velocidade definido pelo algoritmo *ITM* ativo. Este perfil de velocidade é composto pelos valores de velocidade a que o veículo deve circular em cada instante de tempo. Para a avaliação das margens de segurança irá introduzir-se um erro na velocidade atual do veículo para avaliar a robustez do algoritmo *ITM*. Posto isto, é definido um cenário, sendo que este é iniciado com todas as faixas de entrada ocupadas com carros, e com fluxo de entrada elevado, 300 veículos/hora. Quando referimos que estamos perante um fluxo de entrada de 300 veículos/hora quer dizer que em cada faixa de entrada são inseridos 300 veículos a cada hora obtendo o número total de veículo multiplicando pelo número de vias de entrada. Assim, para o caso com mais congestionamento, sendo este o mais crítico, avalia-se e posteriormente definem-se as margens de segurança que melhor se adequam aos nossos algoritmos de *ITM*. De realçar que para este teste foi usado o *GPS* com máxima precisão, para se avaliar o erro de velocidade dos veículos e não o erro de posição. As variáveis que irão ser controladas para esta avaliação são: resolução da grelha de ocupação, erro da velocidade e margem de largura da reserva,  $W$  (cm). A margem de comprimento da reserva foi definida por  $L = 5W$  (cm). A duração das simulações foi de 300 segundos.

## 4.2.2. Implementação dos Algoritmos *ITM* desenvolvidos para a Rotunda no Cruzamento

Como já foi referenciado, para a rotunda existem dois algoritmos inteligentes de gestão: *EMITM* e *WMITM*. Estes dois algoritmos *ITM* serão aplicados no cruzamento, para se poder avaliar o seu desempenho neste tipo de interseções. Para ambos os métodos, é necessária a implementação de uma reserva no espaço e no tempo (x,y,t). Para ser possível fazer esta reserva foi usada uma matriz tri-dimensional. Cada camada é dividida em células, onde cada uma representa um espaço bi-dimensional no mapa. Cada uma destas células pode tomar um dos dois estados: ocupado ou livre (Figura 4.2). O caminho livre de um determinado veículo será alocado na matriz espaço-temporal pelo algoritmo *ITM* ativo.

Na Figura 4.3 estão representadas as etapas do processo de gestão de tráfego para os veículos que se aproximam do cruzamento.



**Figura 4.3.:** Etapas do processo de gestão de tráfego para um veículo.

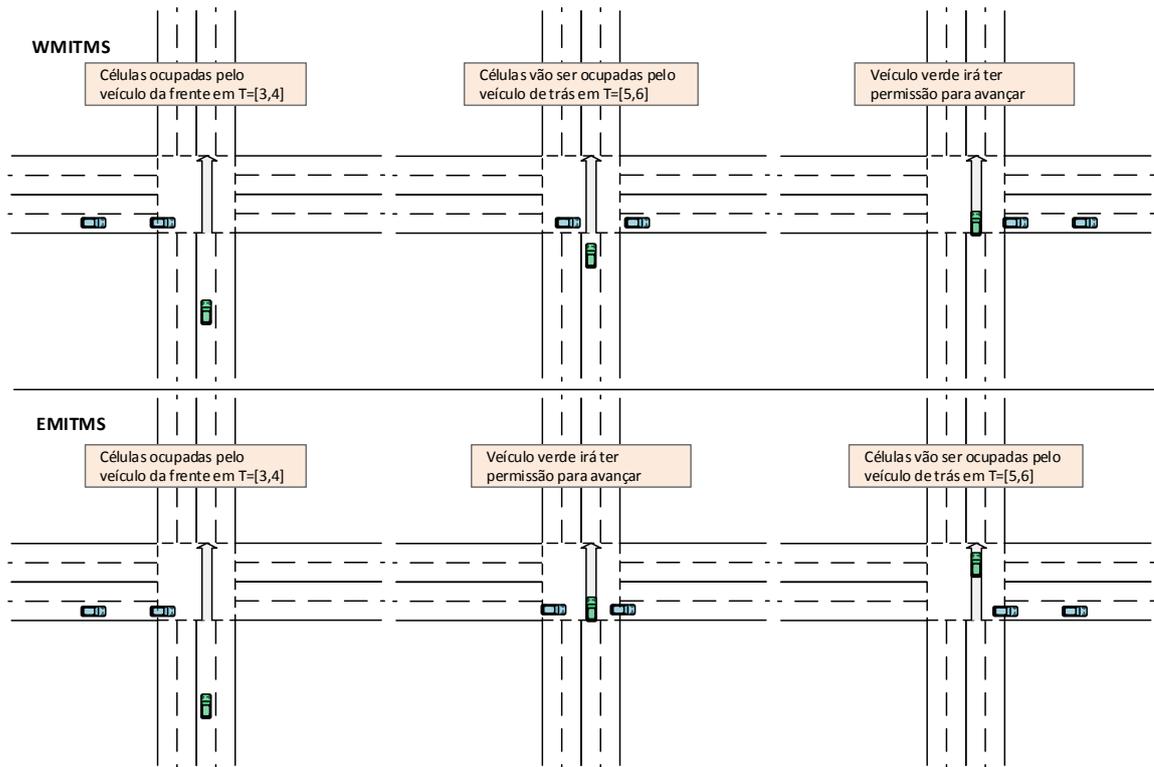
Para ser gerado o perfil de velocidade, a faixa de destino do veículo deverá possuir espaço de forma a acolher o veículo, e o algoritmo *ITM* deverá receber do veículo, através de comunicação *V2I*, a sua posição no mapa, o destino desejado, o tipo de veículo e a sua velocidade atual. Estes algoritmos apenas diferem na definição do perfil de velocidade quando um veículo tenta reservar um espaço que já se encontra ocupado.

Como se pode observar na Figura 4.4, a diferença entre estes dois métodos reside no facto de o algoritmo *EMITM* reservar o espaço assim que este esteja disponível, enquanto que o algoritmo *WMITM* apenas reservará o espaço no fim da última camada em que a célula se encontra reservada.

## 4.2.3. *LEMITM*

### 4.2.3.1. Formulação e Implementação

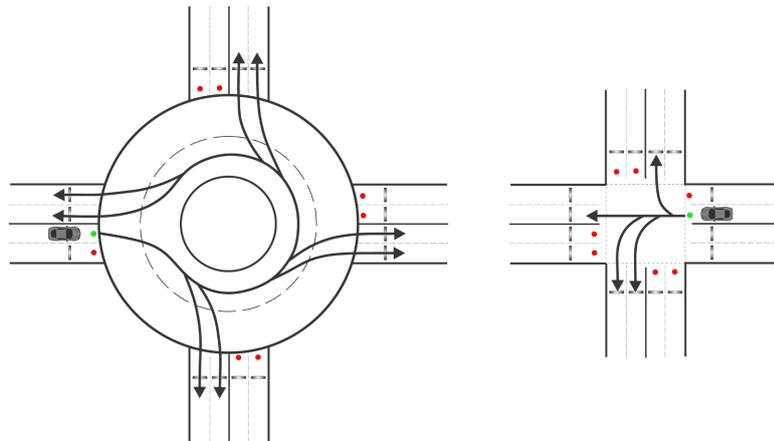
Os algoritmos inteligentes de gestão de tráfego existentes nas interseções, descritos no presente capítulo, necessitam que os veículos existentes nas interseções possuam sistemas



**Figura 4.4.:** Diferença da reserva de células usando os algoritmos *WMITM* e *EMITM*.

de comunicação *V2I/V2V*, de forma a que estes possam ser controlados pelos algoritmos de gestão presentes nas mesmas. No futuro, prevê-se que interseções inteligentes irão ter grande importância no que diz respeito a despacho de tráfego, bem como, na diminuição de sinistros. No entanto, teremos de ter em conta que irão existir sempre veículos que irão ser controlados por humanos e/ou veículos que não possuem sistemas de comunicação, ou que os possuam mas que estejam com um funcionamento defeituoso, mesmo que seja uma pequena percentagem de veículos. Devido a esta restrição, foi desenvolvido um algoritmo inteligente que permite que estas interseções se tornem utilizáveis para todo o tipo de veículos, o algoritmo *Legacy Early Method Intelligent Traffic Management (LEMITM)*.

De forma a que este tipo de veículos possam circular nas interseções, teremos de usar uma forma de comunicação para informação dos humanos que estes conheçam que seja confiável, ou seja, os sinais luminosos. Para além disso é necessária a deteção de veículos nas entradas e saídas das interseções. O algoritmo *LEMITM* irá então fazer uso de sinalização luminosa em todas as faixas de entrada da interseção, possuindo estes apenas dois estados: vermelho (proibição de avançar) e verde (permissão para avançar).



**Figura 4.5.:** Detetores de fluxo de entrada e saída e reserva do algoritmo *LEMITM*.

Irá também fazer uso dos sensores inseridos na infraestrutura para ser possível fazer a detecção da entrada e saída de veículos (4.5). Este algoritmo irá gerir o tráfego na interseção com base numa reserva espacio-temporal.

#### 4.2.3.2. Processo de reserva

Quando um veículo se aproxima da entrada de uma interseção, esta irá detetá-lo através dos sensores na faixa de rodagem. Depois desta deteção, a infraestrutura irá verificar se existe alguma tentativa de comunicação por parte do veículo, ficando este assinalado como um veículo sem comunicação. Caso contrário, uma vez que a interseção não consegue comunicar com ele, não irá ser possível conhecer-se a faixa de destino, assim como a velocidade atual do veículo em questão, ficando a interseção impossibilitada de gerar qualquer perfil de velocidade. Uma vez não sendo conhecida a informação essencial procede-se a uma reserva na matriz espacio-temporal que salvaguarde todos os destinos possíveis a que a faixa de entrada, onde o veículo está presente, pode levar (4.5).

Nesta reserva é assumido que os veículos sem comunicação não irão percorrer a rotação mais do que uma vez, e que para atingir o seu ponto de destino, irão respeitar a tabela de roteamento existente para todos os carros.

O processo de gestão usando o algoritmo *LEMITM* divide-se, assim, em 5 etapas:

1. **Deteção do veículo:** os veículos são detetados na entrada da interseção.
2. **Geração de todas as trajetórias possíveis:** nesta fase o algoritmo irá consultar na tabela de roteamento as saídas possíveis que o veículo detetado poderá tomar, por forma a reservar na matriz espacio-temporal todo o espaço necessário para essa operação.

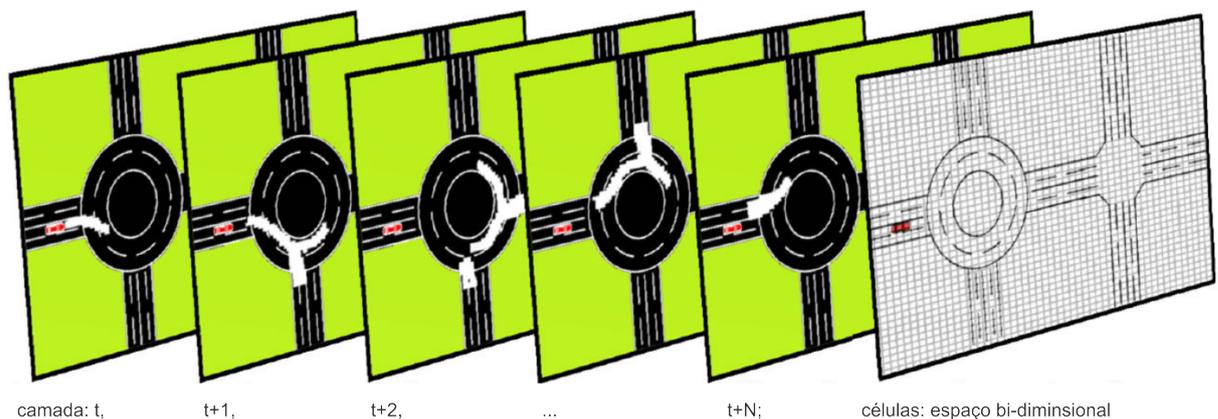
3. **Aguarda ordem de avanço:** nesta etapa o veículo irá visualizar a presença de um sinal vermelho e aguardar à entrada da interseção até que lhe seja dada ordem de avanço.
4. **Recebe ordem de avanço:** quando se é atingido o instante de tempo, em que a interseção está reservada para a circulação do veículo, o semáforo irá transitar para luz verde e o veículo irá fazer a travessia da interseção.
5. **Libertação do espaço reservado:** à medida que o espaço vai sendo libertado, os veículos com comunicação poderão entrar na interseção, seguindo o seu perfil de velocidade, evitando assim, colisões com os veículos sem comunicação.

#### 4.2.3.3. Margem de segurança na reserva

Como explicado em 4.2.3.2, o agente interseção não conhece a velocidade exata com que os veículos sem comunicação irão atravessar a interseção, teremos de fazer uma reserva durante um intervalo de tempo suficiente de forma a que vários tipos de veículos com vários tipos de condutores possam proceder a uma travessia da interseção em segurança, minimizando a possibilidade de ocorrência de colisões. Deste modo é definida uma margem de segurança de velocidades, utilizadas no processo de reserva, sendo representada por:

$$A_{SM} = [speed_{min}; speed_{max}] [km/h] \quad (4.1)$$

onde  $speed_{min}$  e  $speed_{max}$  são as velocidades de segurança mínima e máxima, respetivamente.



**Figura 4.6.:** Reserva com o algoritmo *LEMITM* na matriz espacio-temporal.

#### 4.2.4. Método de gestão *FMITM*

Os sistemas de gestão *WMITM* e *EMITM*, quando geram um perfil de velocidade para o veículo e detetam uma colisão com algum veículo, irão tentar resolvê-la através de desacelerações, até que seja possível reservar um caminho livre na matriz espaço-temporal. Assim, de forma a tentar encontrar uma alternativa para a resolução das colisões, foi desenvolvido um algoritmo que faça com que o veículo aproveite as faixas de entrada das interseções para acelerar, permitindo que este que possa chegar ao ponto de colisão antes do veículo com o qual é detetada uma colisão. Analogamente à figura 4.4 podemos verificar o funcionamento deste algoritmo na figura 4.7.

É definida uma velocidade máxima que o veículo possa atingir para tentar encontrar uma solução. Esta velocidade pode ser alterada aquando do início de uma simulação. De notar que esta velocidade máxima definida será superior à velocidade máxima que é definida para a circulação nas vias e interseções. Quando não é possível encontrar uma solução com este algoritmo será invocado o algoritmo *EMITM* para definir o perfil de velocidade adequado. Esta velocidade máxima só será usada na resolução da colisão, sendo restabelecida a velocidade máxima de circulação pré-definida para todos os veículos aquando da resolução da colisão.

Para que o veículo consiga atingir a velocidade desejada para resolver as colisões houve a necessidade de aumentar o alcance do sistema de comunicação, de forma a que os veículos comecem a ser geridos pelos algoritmos *ITM* mais cedo.

Na figura 4.8 podemos observar a diferença dos perfis de velocidade que irão ser gerados pelos algoritmos *FMITM* e *EMITM* para a situação representada na imagem 4.9.

Como podemos verificar analisando a figura 4.8 o algoritmo *FMITM* irá calcular um perfil de velocidade acelerando o veículo B representado na figura 4.9 de forma a que este

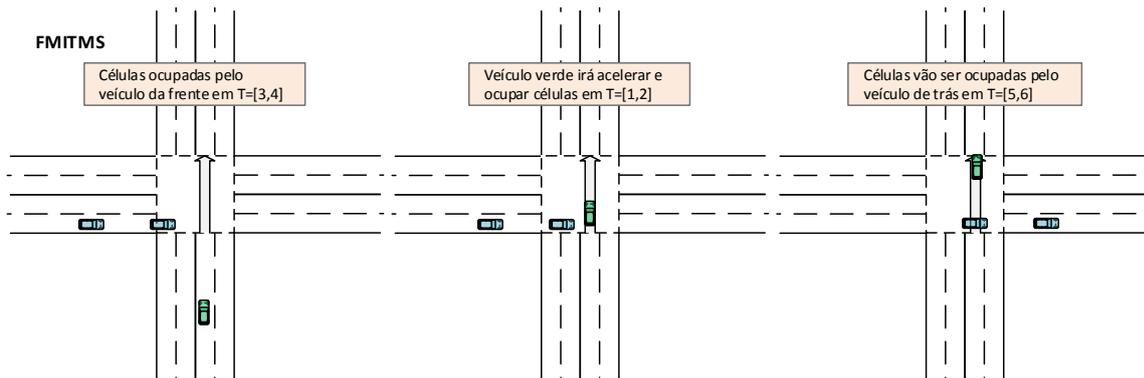
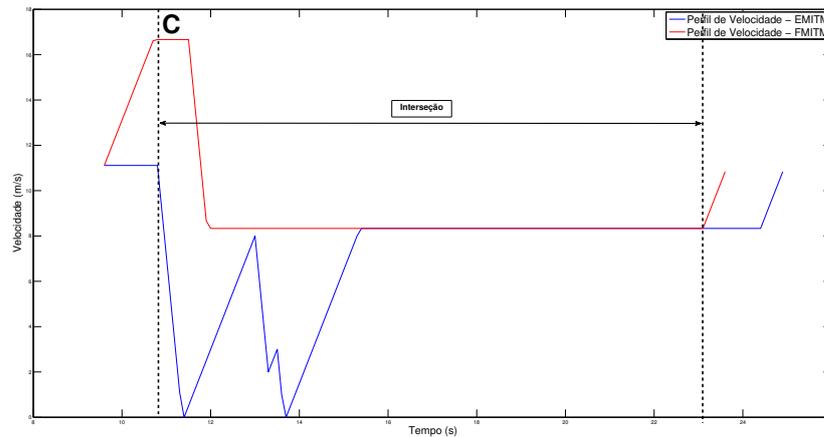
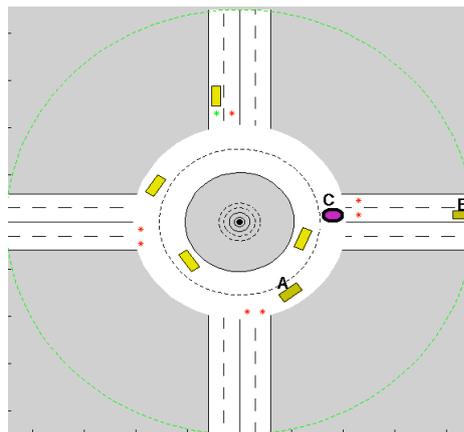


Figura 4.7.: Funcionamento do método de gestão *forward*.



**Figura 4.8.:** Diferença entre os perfis de velocidade gerados pelos métodos *FMITM* e *EMITM*.

chegue primeiro que o veículo A ao ponto de colisão C. Podemos observar que depois de o veículo atingir o ponto de colisão C irá restabelecer a velocidade máxima de circulação definida para o interior das interseções. Com este algoritmo os veículos irão abandonar a interseção mais cedo que com o algoritmo *EMITM*.



**Figura 4.9.:** Diferença entre os perfis de velocidade gerados pelos métodos *FMITM* e *EMITM*.

## 4.3. Desenvolvimentos no Simulador *ISR-TrafSim*

### 4.3.1. Implementação de Mudança de Via

Uma mudança de via poderá ocorrer quando a via onde circula o veículo se encontra ocupada, existindo um espaço livre na via adjacente com dimensões suficientes para ser ocupado pelo veículo na via adjacente. Esta mudança de via apenas é exequível caso o veículo se encontre em modo condutor, não estando a ser controlado por nenhum sistema de gestão *ITM*.

Como se pode visualizar na Figura 4.10, a manobra de mudança de via consiste em dois passos, sendo o primeiro a verificação de espaço livre na via adjacente e cálculo de nova trajetória (A) seguido da realização da manobra seguindo a trajetória previamente definida (B). Em C está representada a pose final do veículo.

Para criar a nova trajetória procede-se a uma união das trajetórias definidas para as duas vias, escolhendo um ponto em cada uma delas para fazer a ligação. Para que não ocorram mudanças abruptas de direção por parte dos veículos, irá ser gerada uma trajetória suave removendo os pontos com menor raio de curvatura usando de seguida uma interpolação usando *splines*.

### 4.3.2. Implementação do Sistema *Four Wheel Steering*

Este tipo de sistema assiste os condutores automaticamente, na medida em que controla o ângulo de direção de todas as quatro rodas, de acordo com a velocidade e ângulo

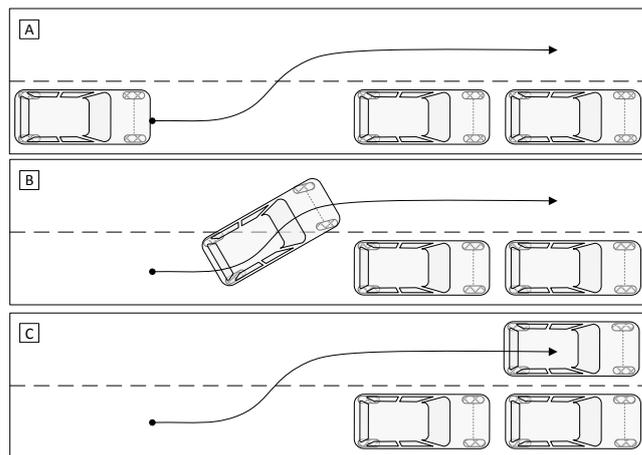
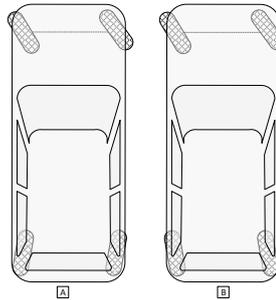


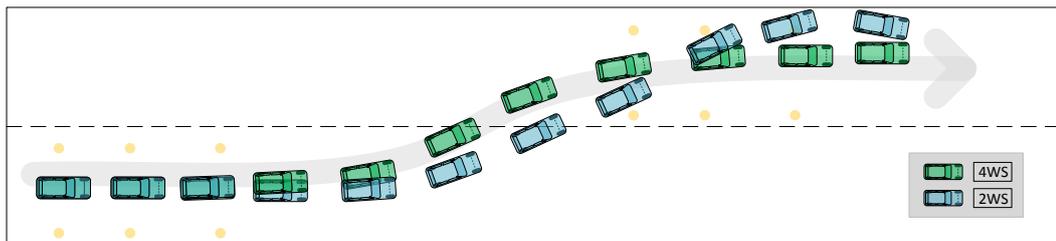
Figura 4.10.: Ilustração de uma Mudança de Via.

de direção das rodas dianteiras. Controlando o ângulo de direção de todas as rodas, aumentar-se-á a estabilidade do veículo e a resposta do mesmo a velocidades elevadas. Para velocidades reduzidas este sistema irá fazer com que as rodas traseiras rodem no sentido oposto ao das rodas dianteiras, como podemos observar na figura 4.11 A, diminuindo assim o esforço do condutor a manobrar o veículo, permitindo que este realize uma determinada manobra num menor espaço. Para velocidades mais elevadas, as rodas traseiras irão rodar no sentido das rodas dianteiras, como podemos observar na figura 4.11 B, aumentando a estabilidade do veículo quando se procede a uma mudança de faixa ou ultrapassagem, ver figura 4.10.



**Figura 4.11.:** Sistema *4 wheel steering*.

Na figura 4.12 podemos observar a diferença de trajetórias entre um veículo com sistema *2WS* e *4WS* aquando da realização de uma mudança brusca de faixa a uma velocidade considerável.



**Figura 4.12.:** Diferenças entre *4WS* e *2WS*.

Na figura 4.13 está representada a função suave desenvolvida para o cálculo do ângulo traseiro em função da velocidade e do ângulo dianteiro, sendo esta definida por:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]}{\sqrt{1 + \left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]^2}} \cdot \left[ \frac{\varphi^2 / \varphi_{max}^2}{\varphi_{max}} \right] \cdot \chi_{neg_{max}} \quad se \ v_1 < v_{ref} \cap \varphi < 0 \\ \frac{\left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]}{\sqrt{1 + \left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]^2}} \cdot \left[ \frac{\varphi^2 / \varphi_{max}^2}{\varphi_{max}} \right] \cdot \chi_{neg_{max}} > \quad se \ v_1 < v_{ref} \cap \varphi > 0 \\ -\frac{\left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]}{\sqrt{1 + \left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]^2}} \cdot \left[ \frac{\varphi^2 / \varphi_{max}^2}{\varphi_{max}} \right] \cdot \chi_{pos_{max}} > \quad se \ v_1 > v_{ref} \cap \varphi < 0 \\ \frac{\left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]}{\sqrt{1 + \left[ \left( \frac{v_1 - v_{ref}}{\varphi_{ref}} \right) \cdot k \right]^2}} \cdot \left[ \frac{\varphi^2 / \varphi_{max}^2}{\varphi_{max}} \right] \cdot \chi_{pos_{max}} > \quad se \ v_1 > v_{ref} \cap \varphi > 0 \end{array} \right. \quad (4.2)$$

onde  $v_1$  é a velocidade linear do veículo,  $\varphi$  o ângulo de direção dianteiro,  $v_{ref}$  a velocidade máxima que possibilita que os eixos rodem em sentidos opostos,  $\chi_{neg_{max}}$ ,  $\chi_{pos_{max}}$  o ângulo traseiro máximo (negativo e positivo) e  $k$  uma constante de suavização, .

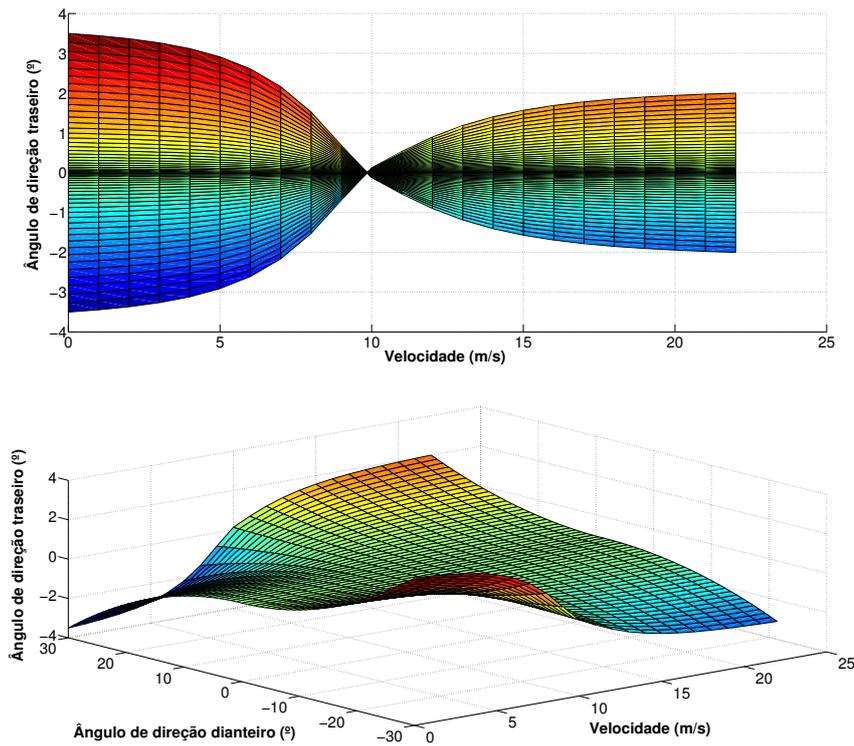


Figura 4.13.: Função que define variação do ângulo de direção traseiro.

## 5. Análise de Resultados

### 5.1. Validação dos resultados para as interseções sem sistemas de gestão usando o VISSIM

Para proceder à validação dos dados obtidos no simulador *ISR-TrafSim* foram desenvolvidos, no simulador apresentado na secção 4.1, dois cenários, que nos permitirão validar os resultados de ambas as interseções em estudo. No módulo rotunda foi aplicado o sistema de gestão *ITMD*, apresentado na Tabela 3.3, no qual os veículos que circulam dentro da interseção têm prioridade. De forma análoga foi, também, implementado no *VISSIM* o módulo cruzamento, no qual foi projetado um controlador de sinalização luminosa, de forma a replicar o mesmo comportamento do controlador desenvolvido para o módulo cruzamento do *ISR-TrafSim*, sendo este método de gestão o *STLS*.

Foram realizadas simulações para diferentes fluxos de entrada em ambos os simuladores e para as diferentes interseções, tendo como valor mínimo 100 veículos por hora e máximo de 3600 veículos por hora em cada faixa de entrada. A especificação e tabela com resultados dos testes, estando presente o fluxo de saída e tempo médio no simulador, podem ser consultados nas tabelas existentes no Anexo A.1. Todas as simulações efetuadas possuem a duração de 10 minutos.

Na figura 5.1 podemos visualizar o fluxo de saída e tempo médio dos veículos em ambos os simuladores para o módulo rotunda, esquerda e direita, respetivamente. Está presente em ambos os gráficos a representação do erro absoluto entre os resultados dos dois simuladores.

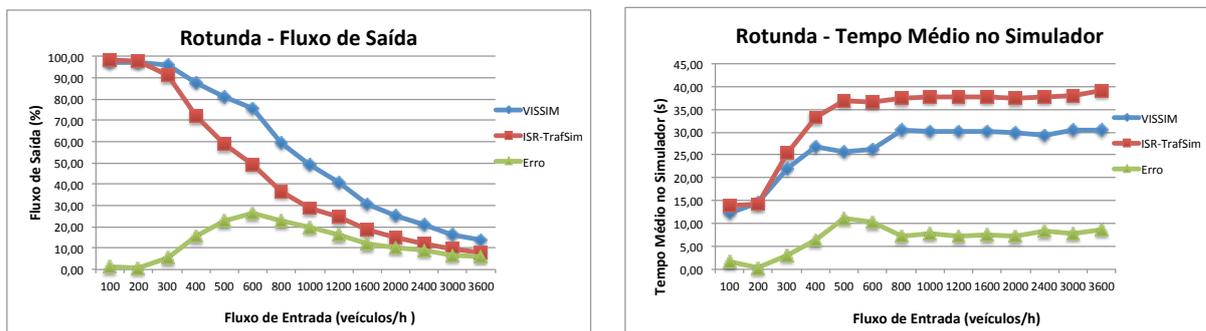


Figura 5.1.: Análise da validação de resultados do módulo rotunda.

Após uma análise cuidada dos dados da figura 5.1 podemos concluir que ambos os simuladores para o módulo rotunda, possuem resultados aproximados. Para o fluxo de saída o erro médio fixa-se em 12.49%, variando entre o valor mínimo de 0.75%, para um fluxo de entrada de 200 veículos/h, e um valor máximo de 26.25%, para um fluxo de entrada de 500 veículos/h. O erro tende a aproximar-se de zero com o aumento do fluxo de entrada. De igual modo, para o tempo médio no simulador obtemos um erro médio de 6.79 segundos, fixando-se neste valor a partir de um fluxo de entrada de 800 veículos/h. Com estes resultados podemos afirmar que uma melhoria dos algoritmos de gestão do simulador *ISR-TrafSim* no módulo rotunda será expectável uma melhoria no mundo real.

De forma semelhante ao módulo rotunda, podemos observar na figura 5.2 o fluxo de saída e tempo médio dos veículos em ambos os simuladores para o módulo cruzamento, esquerda e direita, respetivamente.

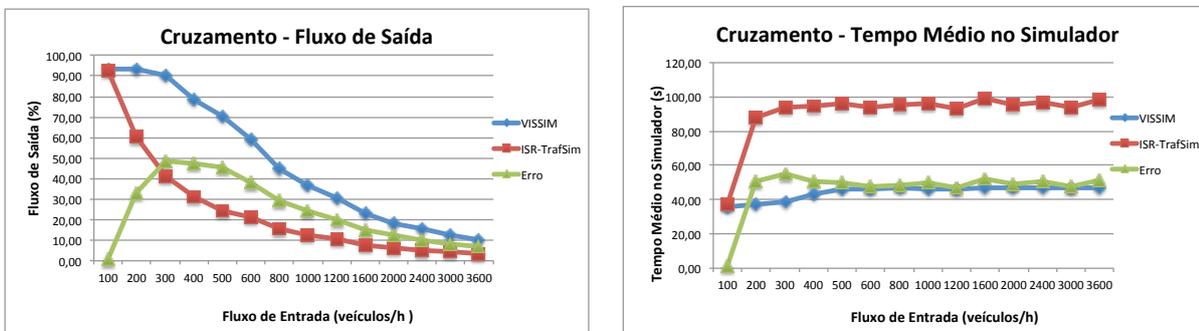


Figura 5.2.: Análise da validação de resultados do módulo cruzamento.

Contrariamente ao modelo testado anteriormente (rotunda), para o cruzamento obtemos um erro bastante significativo aquando da comparação entre os dois simuladores. Para o cruzamento obtém-se um erro médio de 24.28% no fluxo de saída. Apesar deste erro podemos comprovar, através da análise do gráfico, que com o aumento do fluxo de entrada, o fluxo de saída de ambos os simuladores tende a aproximar-se. Por sua vez, obtemos um erro médio de 46.53 segundos para o tempo médio no cruzamento, fixando-se neste valor com o aumento do fluxo de entrada. Pode-se explicar este erro com o facto de o simulador *VISSIM* não ser uma arquitetura completamente aberta, não permitindo a definição da aceleração máxima, bem como definir as dimensões de cada veículo, de forma a igualar as configurações do *ISR-TrafSim*. Outra justificação trata-se da impossibilidade de definir uma tabela de roteamento de forma semelhante ao *ISR-TrafSim*. Ao contrário do módulo rotunda, a inserção de um algoritmo de gestão, que obtenha melhores resultados, não implicará que o mesmo se suceda na vida real, devido a esta diferença nos resultados.

## 5.2. Algoritmos *ITM*

De forma a simplificar as simulações, o carácter aleatório das simulações foi desativado através do painel de configuração, permitindo a que todo o tráfego fosse homogéneo, sendo apenas constituído por veículos ligeiros, sendo estes operados por condutores do tipo II. Todos os algoritmos de gestão *ITM* necessitam de conhecer a posição de cada veículo. Essas posições são obtidas por *RTK-GPS* simulado a uma taxa de 10 Hz. A recolha dos dados que são usados para a avaliação dos sistemas de gestão é realizada a uma taxa de 5 Hz, exceto o parâmetro que traduz a velocidade média, o qual é obtido com base no tempo gasto pelo veículo no simulador e na distância do seu percurso. Apenas os veículos que executam o percurso completo e abandonam o simulador são considerados para as estatísticas. A margem de segurança, usada para fazer a reserva do perfil de velocidade do veículo na matriz espacio-temporal, é de 1 metro para a largura e 5 metros para o comprimento, tendo sido decidido o uso destes valores depois de realizado o estudo das margens de segurança de reserva, apresentado em 4.2.1.1.

### 5.2.1. Resultados do algoritmo *LEMITM*

O algoritmo *LEMITM* foi aplicado no cenário inicialmente disponível no *ISR-TrafSim* (ver figura 1.1). A rotunda e cruzamento possuem um alcance de 45 metros no sistema de comunicação *V2I*.

Na figura 5.3 pode ser observado o processo de reserva por parte das interseções aquando da chegada de um veículo sem sistema de comunicação. As imagens estão ordenadas temporalmente por ordem crescente da esquerda para a direita e de cima para baixo.

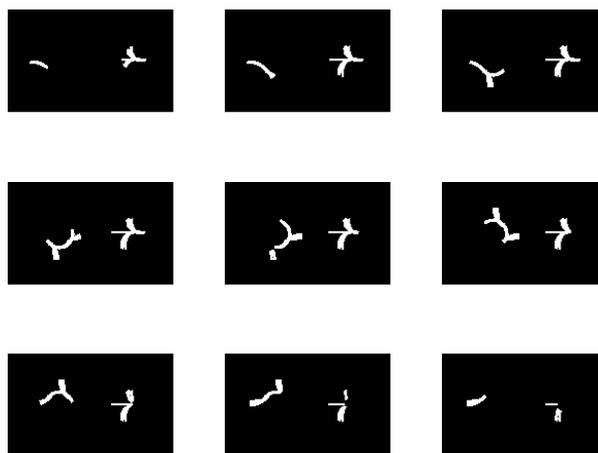


Figura 5.3.: Exemplo do processo de reserva para ambas as interseções.

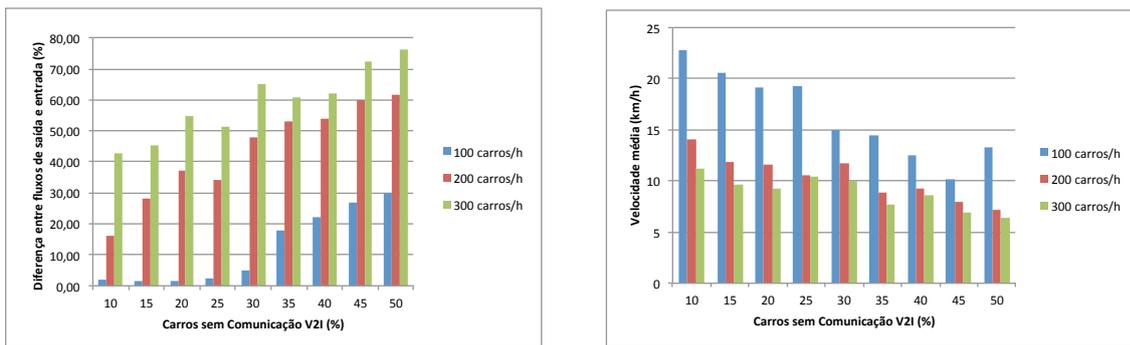
De seguida serão apresentados os resultados deste algoritmo. Nos gráficos da figura 5.4 estão apresentados os resultados para os diferentes fluxos de entrada testados, 100, 200 e 300 veículos por hora, respetivamente. Em cada uma das figuras é apresentada a diferença entre o fluxo de entrada e de saída obtido, assim como, a velocidade média dos veículos para várias percentagens de veículos sem comunicação. os resultados podem ser visualizados na tabela do Anexo A.2.

Os resultados apresentados na figura 5.4 mostram que o desempenho do *LEMITM* piora com o aumento da percentagem de carros que não possuem comunicação  $V2I/V2V$ . A diminuição do desempenho deve-se ao facto de que todos estes veículos reservam as células na matriz espacio-temporal para todas as trajetórias possíveis. Esta característica leva a que existam sempre blocos na matriz espacio-temporal que nunca são usados. Este defeito é a consequência de permitir que circulem veículos sem comunicação nas interseções.

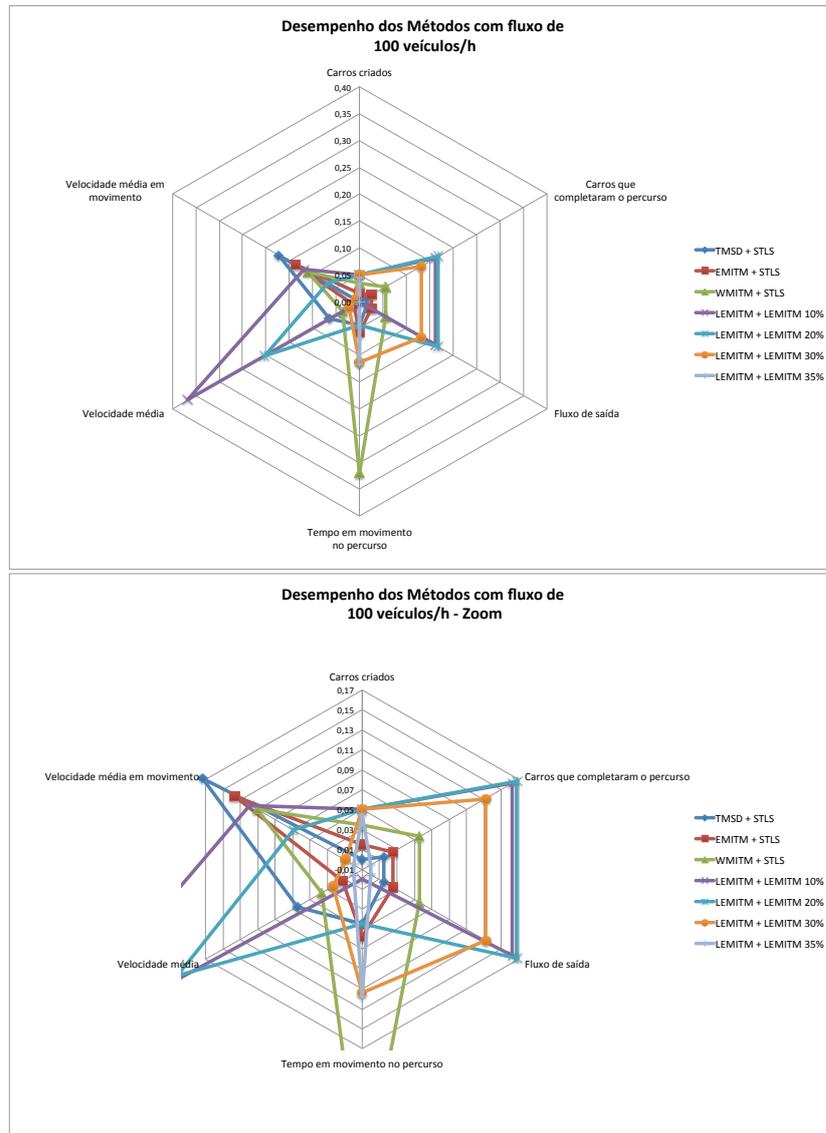
Por fim, podemos observar nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7 as diferenças entre o algoritmo *LEMITM* a operar nas duas interseções e os algoritmos *TMSD*, *STLS*, *EMITM* e *WMITM*, para fluxos de entrada de 100, 200 e 300 veículos por hora, respetivamente. Todos os dados apresentados encontram-se representados respeitando a seguinte fórmula:

$$Y_i = \left[ \frac{1 - (\max(X_{i:n}) - X_i)}{\max(X_{i:n})} - \min(X_{i:n}) \right] \tag{5.1}$$

onde  $X_i$  é a amostra a observar. Assim, com esta representação podemos chegar à conclusão que os parâmetros que se aproximam do máximo apresentado são os que possuem melhor desempenho.

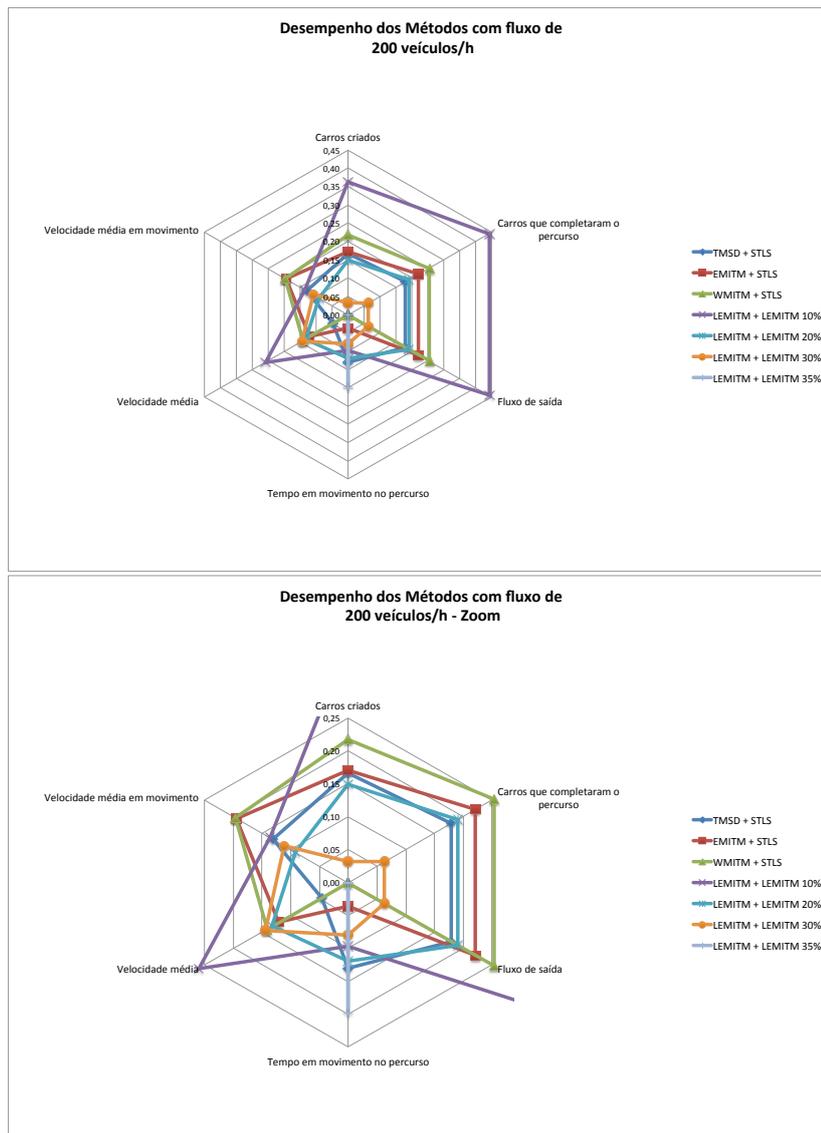


**Figura 5.4.:** Diferença entre os fluxos de entrada e saída (esquerda) e velocidade média dos veículos (direita) para um fluxo de entrada de 100, 200 e 300 veículos por hora.

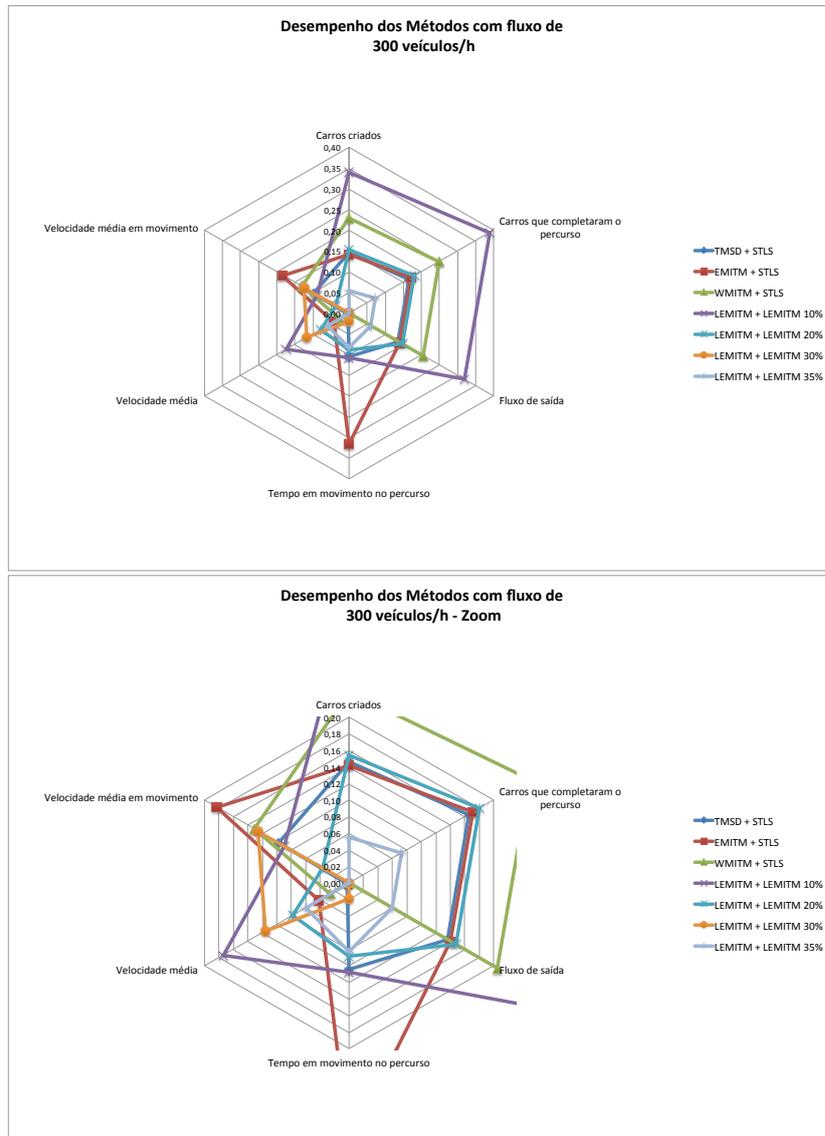


**Figura 5.5.:** Comparação do algoritmo *LEMITM* com os algoritmos disponíveis para o cenário completo para um fluxo de entrada de 100 veículos por hora.

**Exemplo de leitura:** pode verificar-se através da análise da Figura 5.5 que os algoritmos que possuem melhor desempenho nas diversas variáveis em estudo são os que mais se aproximam do valor máximo apresentado no gráfico. O gráfico inferior é um zoom de uma área de interesse selecionada do gráfico superior para que se possa analisar o desempenho com maior detalhe. O mesmo raciocínio pode ser efetuado para a análise das Figuras 5.6 e 5.7.



**Figura 5.6.:** Comparação do algoritmo *LEMITM* com os algoritmos disponíveis para o cenário completo para um fluxo de entrada de 200 veículos por hora.



**Figura 5.7.:** Comparação do algoritmo *LEMITM* com os algoritmos disponíveis para o cenário completo para um fluxo de entrada de 300 veículos por hora.

Analisando as figuras 5.5, 5.6 e 5.7, podemos concluir que, apesar de o algoritmo *LEMITM* reservar espaços na matriz espacio-temporal que não são usados e possuindo um desempenho inferior ao algoritmo *EMITM*, este acaba por possuir um melhor desempenho, quando comparado com os métodos tradicionais de controlo de tráfego, para fluxos de tráfego baixos (ver figura 5.8), aumentando o fluxo de saída e reduzindo o tempo de travessia das interseções, assim como, a velocidade média com que a atravessam.

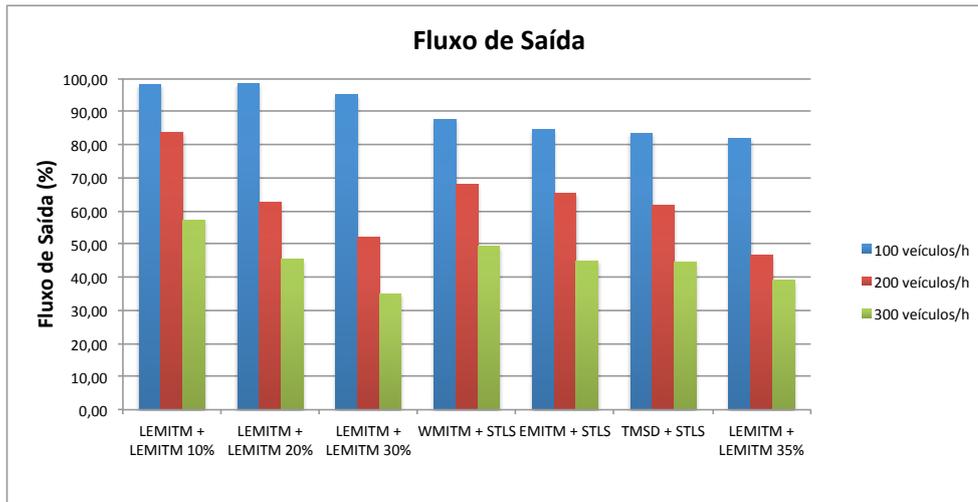


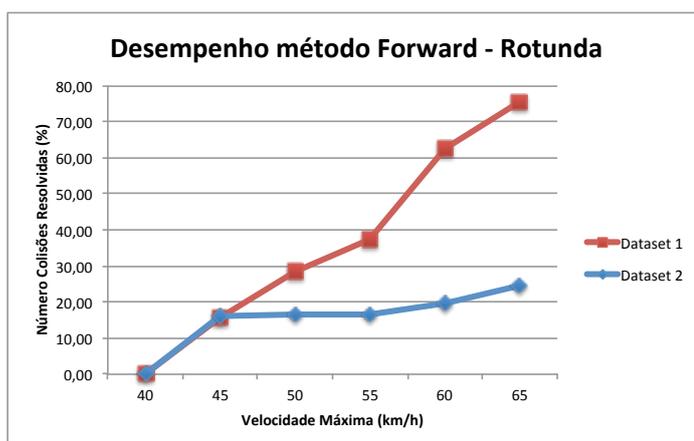
Figura 5.8.: Fluxo de saída para os diferentes métodos para fluxos de entrada de 100, 200 e 300 veículos/h.

### 5.2.2. Resultados do algoritmo *FMITM*

Nesta subsecção serão apresentados os resultados do algoritmo *forward*, apresentado na subsecção 4.2.4, para ambas as interseções.

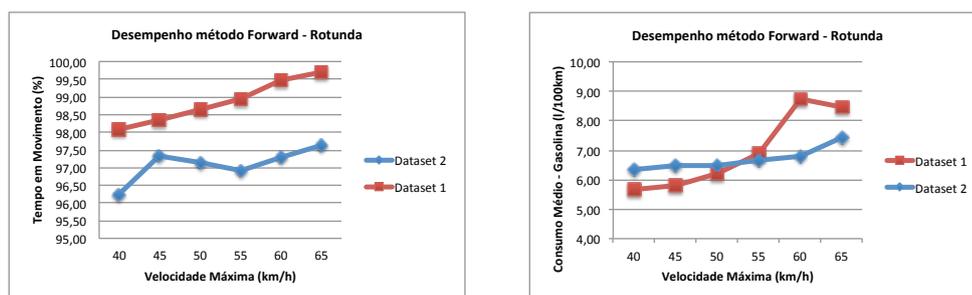
Inicialmente existiu a necessidade de realizar várias simulações de forma a podermos afinar o algoritmo, de modo a obter o máximo de desempenho por parte do mesmo. Para isto foram realizadas as simulações especificadas nas tabelas do Anexo A.5. As variáveis alvo de estudo foram a margem de segurança, aquando da reserva na matriz espaço-temporal e a velocidade máxima que um veículo pode atingir de forma a evitar a colisão. Nos gráficos que serão apresentados, as simulações com margem de segurança de  $A_{SM} = [1; 2.5][m]$  correspondem ao “*Dataset 1*” e as simulações com margem de  $A_{SM} = [1; 5][m]$  ao “*Dataset 2*”. Estas simulações, para afinação do algoritmo, foram apenas realizadas para a rotunda e, cada uma, teve a duração de 10 minutos. Os resultados da análise de desempenho do método *FMITM* na rotunda podem ser observados no Anexo A.5.

Na figura 5.9 podemos observar a percentagem de colisões resolvidas com este método para os dois *datasets*.



**Figura 5.9.:** Comparação da percentagem do número de colisões resolvidas entre os dois *datasets*.

Na figura 5.10 estão representados a velocidade média e consumo médio dos veículos para os dois *datasets*.



**Figura 5.10.:** Velocidade média (esquerda) e consumo médio dos veículos (direita).

Através da análise das figuras 5.9 e 5.10 podemos observar que o algoritmo consegue resolver mais colisões, levando a que os carros permaneçam mais tempo em movimento, quanto maior for a velocidade máxima que estes possam atingir e quanto menor for a margem de segurança de reserva na matriz espaço-temporal. No entanto, este aumento da velocidade máxima leva a que existam consumos de combustível mais altos. Depois desta análise decidiu-se fixar a velocidade máxima nos 60 km/h pois, com esta, já se resolve um número considerável de colisões. Apesar de existirem mais consumos para a velocidade máxima de 60 km/h decidimos fixá-la a este valor de modo a não aumentarmos a velocidade para mais do dobro da velocidade permitida nas interseções.

Uma análise comparativa entre o *FMITM* e os algoritmos existentes para as interseções será realizada na subsecção 5.2.3.

### 5.2.3. Resultados dos algoritmos para os módulos rotunda e cruzamento

Para estes algoritmos foi usado um alcance de 45 metros no sistema de comunicações *V2I*. Ao contrário do que acontece para o cenário completo (ver figura 1.1), não existe um limite máximo de veículos que possam estar presentes nas saídas da interseção.

Nas secções 5.2.3.1 e 5.2.3.2 são apresentados os resultados das simulações dos algoritmos para a rotunda e cruzamento, respetivamente. Foi usado como fluxo de entrada mínimo 100 veículos/h e máximo de 3600 veículos/h, sendo este incrementado gradualmente. Nos gráficos apresentados estão presentes também os resultados do algoritmo *FMITM*, *CIITM*, *ITMD* e *STLS*, para as interseções disponíveis, podendo assim ser feita uma comparação entre os algoritmos mais facilmente.

#### 5.2.3.1. Resultados dos métodos de gestão no módulo Rotunda

Nos gráficos 5.11, 5.12 e 5.13 podemos visualizar o fluxo de saída, a velocidade média dos veículos e o consumo médio de gasolina para os diferentes fluxos de entrada, respetivamente. Em ambos os gráficos estão representados todos os algoritmos disponíveis para este módulo. Os resultados da implementação dos métodos na rotunda poderão ser observados no Anexo A.3.

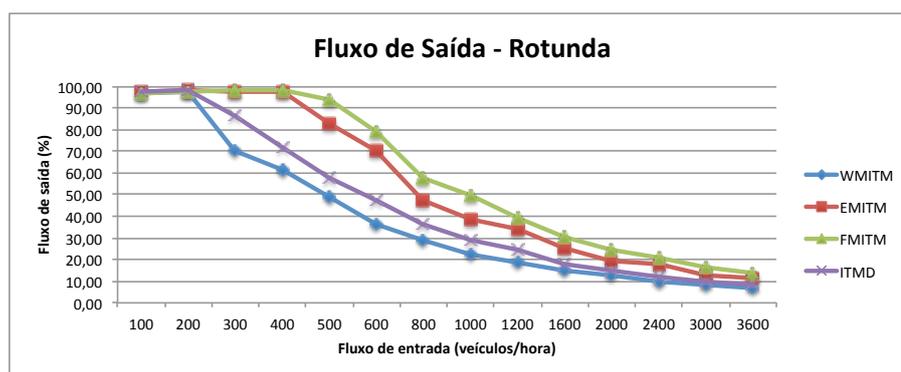


Figura 5.11.: Fluxo de saída para os 4 algoritmos identificados no gráfico.

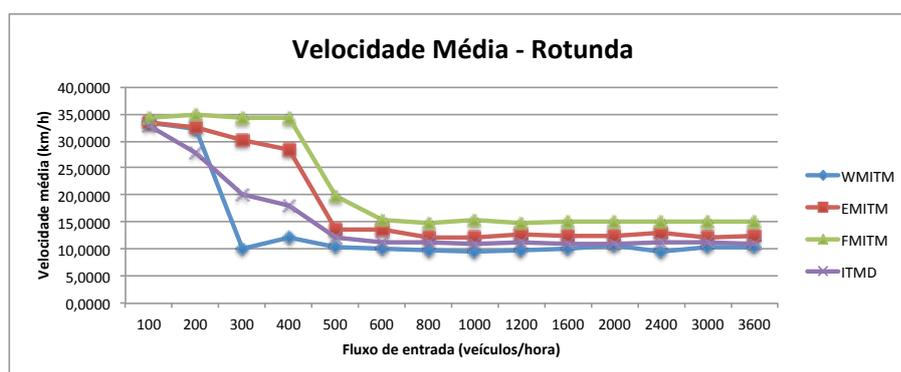


Figura 5.12.: Velocidade média dos veículos para os 4 algoritmos identificados no gráfico.

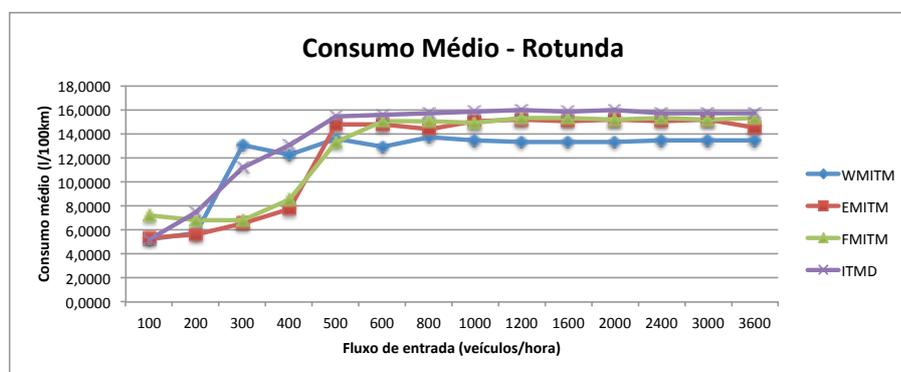


Figura 5.13.: Consumo médio de gasolina para os 4 algoritmos identificados no gráfico.

Para o módulo rotunda podemos verificar que, ao contrário do que seria esperado, consegue-se obter um melhor desempenho quando desativamos os métodos de gestão (*ITMD*) comparativamente com o método *WMITM*. Apesar de possuir esta vantagem podemos concluir que quando não existe um algoritmo de gestão ativo obtemos consumos de combustível mais elevados. Constatamos então que o método com melhor desempenho, com fluxo de saída e velocidade média mais elevada é o *FMITM*, uma vez que usa os espaços livres para acelerar e antecipar-se a um veículo com o qual é detetada uma colisão. Apesar de existir um acréscimo no consumo com este algoritmo, devido a acelerações, quando comparado com o *EMITM* e *WMITM*, este algoritmo apresenta melhores consumos quando comparados com a ausência de um método de gestão (*ITMD*).

### 5.2.3.2. Resultados dos métodos de gestão no módulo Cruzamento

Nos gráficos 5.14, 5.15 e 5.16 podemos visualizar o fluxo de saída, a velocidade média dos veículos e o consumo médio de combustível para os diferentes fluxos de entrada,

respetivamente. Em ambos os gráficos estão representados todos os algoritmos disponíveis para este módulo. Os resultados da implementação dos métodos na rotunda poderão ser observados no Anexo A.4.

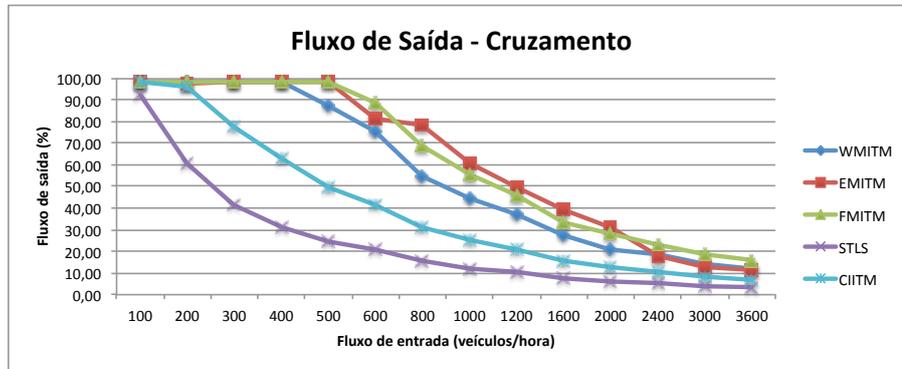


Figura 5.14.: Fluxo de saída para os 5 algoritmos identificados no gráfico.

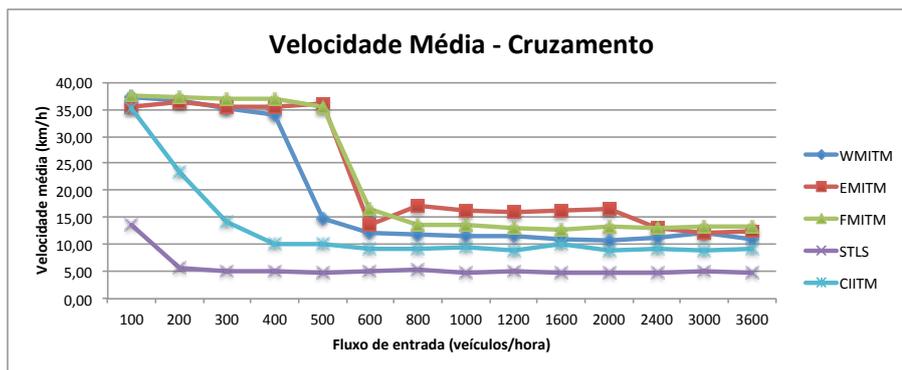


Figura 5.15.: Velocidade média dos veículos para os 5 algoritmos identificados no gráfico.

Para o módulo cruzamento podemos verificar que este apresenta um pior desempenho quando são usados o método de sinalização luminosa tradicional (*STLS*) e o *CIITM*. Existe uma melhoria quando aplicado o *CIITM*, uma vez que este possui um sistema de visão, detetando em que faixas se aproximam veículos, dando-lhes permissão para avançar assim que seja possível. Estes métodos possuem uma velocidade média baixa devido ao tempo que os veículos se encontram parados à espera da ordem de avanço. Quando aplicado qualquer dos algoritmos de gestão existe um aumento considerável do fluxo de saída e, devido à estrutura do cruzamento, ambos os métodos apresentam um desempenho bastante semelhante, ocorrendo pequenas variações dependendo do fluxo de entrada.

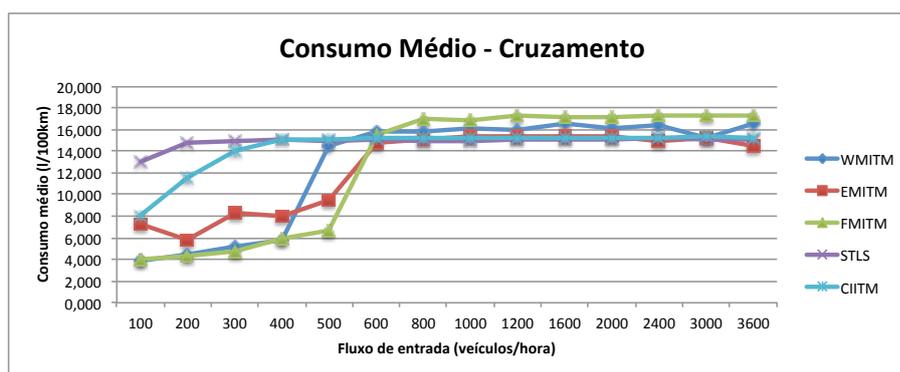


Figura 5.16.: Consumo médio de gasolina para os 5 algoritmos identificados no gráfico.

### 5.2.3.3. Comparação dos métodos de reserva entre o módulo rotunda e o módulo cruzamento

Na figura 5.17 podemos observar a diferença de desempenho entre os dois tipos de interseções quando aplicados os mesmos algoritmos de gestão.

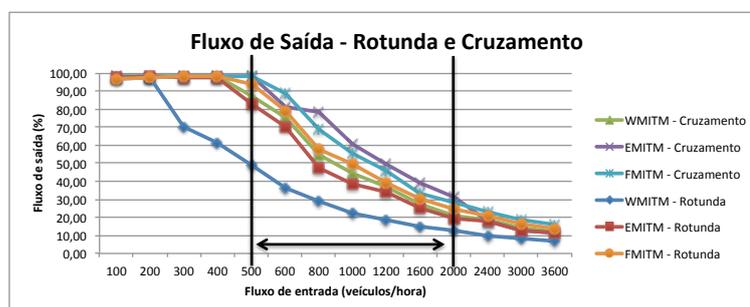


Figura 5.17.: Comparação do fluxo de saída entre os dois tipos de interseções.

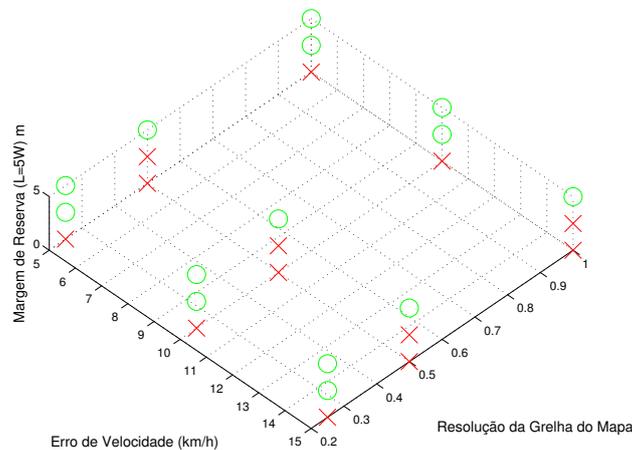
Analisando a figura 5.17 pode concluir-se que os algoritmos identificados revelam um melhor desempenho, para o intervalo valores de fluxo de entrada representados na figura, numa interseção do tipo cruzamento quando comparado com uma rotunda. Assim, aquando da projeção de uma interseção, deve-se ter em conta que para valores do fluxo de entrada entre 500 e 2000 veículos/hora é preferível usar uma interseção do tipo cruzamento em vez de uma rotunda. No intervalo identificado no gráfico podemos observar que o algoritmo *WMITM* no cruzamento consegue ter melhor desempenho que quando aplicado na rotunda.

## 5.3. Desenvolvimentos no Simulador *ISR-TrafSim*

### 5.3.1. Margens de Reserva

Como foi referido na subsecção 4.2.1.1, foi elaborado um estudo para determinar quais as margens de reserva ideais a usar para tirar máximo partido dos algoritmos de gestão. Para tal foi inserido um erro de velocidade que poderá tomar os valores 5, 10 ou 15 km/h. Foram realizadas simulações para cada valor de velocidade definido, variando a grelha de ocupação do simulador, podendo tomar os valores 0.25, 0.5 ou 1.

Os resultados obtidos para este estudo estão presentes na figura 5.18. Com um 'X' vermelho estão assinaladas as simulações que, com as condições especificadas pelas coordenadas do gráfico, falharam. Com um 'O' verde estão assinaladas as simulações que terminaram sem a ocorrência de colisões.



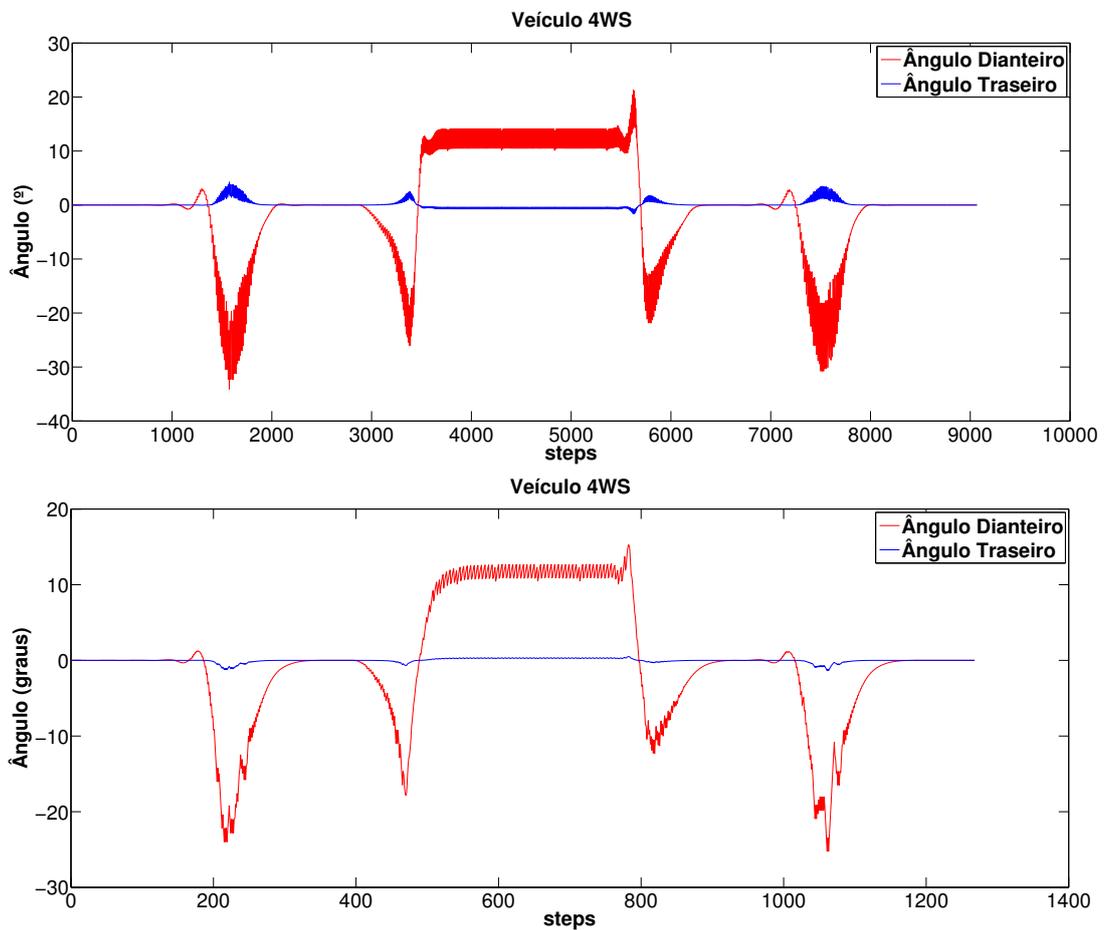
**Figura 5.18.:** Margens de reserva dos algoritmos com comunicação.

Depois de uma análise à figura 5.18 podemos chegar à conclusão que as margens ideais a usar para tirar máximo partido dos algoritmos de gestão, contemplando várias variações que poderão ocorrer são,  $L = 5W$ , com  $W = 1$  m.

### 5.3.2. Modelo Cinemático 4WS

De modo a ser avaliada a cinemática 4WS decidiu-se realizar uma trajetória que possua várias mudanças de direção no cenário completo, com rotunda e cruzamento. Decidiu-se assim introduzir dois veículos na faixa de entrada número 10, saindo estes pela faixa número 22. Este trajecto pode ser visualizado na Figura A.7. Para a realização deste

trajecto foi necessário realizar uma alteração na tabela de roteamento, permitindo assim que os veículos antes de saírem do simulador passem pela rotunda. Foram realizadas duas simulações, com os veículos a 10 e 70 km/h. Na Figura 5.19 podemos observar variação do ângulo traseiro com o ângulo dianteiro e a velocidade.



**Figura 5.19.:** Ângulo traseiro e dianteiro para velocidades de 10 km/h (cima) e 70 km/h (baixo).



## 6. Conclusões e Trabalho Futuro

Como simulador microscópico, o *ISR-TrafSim* revelou ser uma importante ferramenta para a área de *ITS*. O facto de este estar desenvolvido numa linguagem de programação de alto nível torna-o numa ferramenta perfeita para se poderem implementar novas funcionalidades. Foram propostos os algoritmos *ITM* baseados numa reserva espaço-temporal, *LEMITM* e *FMITM*. O algoritmo *LEMITM* permite a utilização de interseções futuristas por veículos inteligentes com *SC* e, ao mesmo tempo, veículos que não possuam um *SC* ou que o seu funcionamento se encontre defeituoso. Este método revelou-se promissor na medida em que possui melhor desempenho para percentagens baixas de veículos sem comunicação com fluxo de entrada a 100 veículos/h, no caso do cenário completo do *ISR-TrafSim*, quando comparado com a combinação dos métodos *EMITM* na rotunda e *STLS* no cruzamento. Concluiu-se que, com o algoritmo *FMITM*, para a rotunda, apesar de existir um aumento no consumo de combustível, consegue-se aumentar o fluxo de saída quando comparado com os métodos já implementados.

Como trabalho futuro existe a necessidade de exportar para *C++* alguns módulos do simulador de maneira a tornar a simulação mais rápida, principalmente o ambiente gráfico pois é onde se consome mais tempo de processamento. Novos modelos de interseções poderão ser desenvolvidos de forma a tornar o simulador *ISR-TrafSim* mais abrangente.

Uma futura melhoria poderá passar pela capacidade de o algoritmo *ITM* ativo poder recalcular todos os perfis de velocidade dos veículos presentes na interseção. Desta forma poderão ser tidos em conta veículos prioritários que tenham urgência em atravessar as interseções da forma mais célere possível.



# Bibliografia

- [Ahn et al., 2002] Ahn, K., Rakha, H., Trani, A., and Aerde, M. V. (2002). Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, pages 182–190.
- [Askerzade and Mahmood, 2010] Askerzade, I. N. and Mahmood, M. (2010). Control the extension time of traffic light in single junction by using fuzzy logic. *Electrical & Computer Sciences*, 10.
- [Bai et al., 2010] Bai, e Xue, Y., and Kun (2010). Association of signal-controlled method at roundabouts and stop rate. *2nd WRI Global Congress on Intelligent Systems*.
- [Barceló, 2004] Barceló, J. (2004). Aimsun microscopic traffic simulator: a tool for the analysis and assessment of its systems. *Technical notes on GETRAM/AIMSUN*.
- [Behrisch et al., 2011] Behrisch, M., Bieker, L., Erdmann, J., and Krajzewicz, D. (2011). Sumo - simulation of urban mobility. *The Third International Conference on Advances in System Simulation*.
- [Bento et al., 2003] Bento, L. C., Nunes, U., and Mendes, A. (2003). Path-tracking controller of a bi-steerable cybernetic car using fuzzy logic. *Int. Conf. on Advanced Robotics*, 3.
- [Bento et al., 2012a] Bento, L. C., Parafita., R., and Nunes, U. (2012a). Intelligent traffic management at intersection supported by v2v and v2i communications. In *15th IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation Systems*.
- [Bento et al., 2012b] Bento, L. C., Parafita, R., and Nunes, U. (2012b). Inter-vehicle sensor fusing for accurate vehicle localization supported by v2v and v2i communications. In *15th IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation Systems*.
- [Bento et al., 2013] Bento, L. C., Parafita, R., Santos, S., and Nunes, U. (2013). An intelligent traffic management at intersections legacy mode for vvehicle not equipped with v2v and v2i communications. In *16th IEEE Int. Conf. Intelligent Transportation Systems*.
- [Besselink et al., 2008] Besselink, I., Veldhuizen, T., and Nijmeijer, H. (2008). Improving yaw ddynamic by feedforward rear wheel steering. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pages 246–250.
- [Bowyer et al., 1985] Bowyer, D. P., Biggs, D. C., and Akçelik, R. (1985). Guide to fuel consumption analysis for urban traffic management. *Australian Road Research Board Transport Research*, 1:30–40.

- [Burghout et al., 2006] Burghout, W., Koutsopoulos, H. N., and Andreasson, I. (2006). A discrete-event mesoscopic traffic simulation model for hybrid traffic simulation. *IEEE Intelligent Transportation Systems*.
- [Caliper, 2014] Caliper (2014). "<http://www.caliper.com/transmodeler/>". *TransModeler - Traffic Simulator Software*.
- [Chen and Cheng, 2010] Chen, B. and Cheng, H. H. (2010). A review of the application of agent technology in traffic and transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11:485–497.
- [Cheu et al., 2003] Cheu, R. L., Tan, Y., and Lee, D.-H. (2003). Comparison of paramics and gertram/aimsun microscopic traffic simulation tools. *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Der-Horng Lee.
- [Dixon and Birchman, 2007] Dixon, M. and Birchman, J. (2007). Validation of arterial travel-time estimation models using field data and simulation. *Final Report*.
- [Dresner and Stone, 2004] Dresner, K. and Stone, P. (2004). Multiagent traffic management: a reservation-based intersection control mechanism. *Proc. Int. Joint Conf. Autonom. Agents Multiagent Syst., New York*, pages 530–537.
- [Dresner and Stone, 2008] Dresner, K. and Stone, P. (2008). A multiagent approach to autonomous intersection management. *Artificial Intelligence Research*.
- [Ehlert and Rothkrantz, 2001] Ehlert, P. A. M. and Rothkrantz, L. J. M. (2001). Microscopic traffic simulation with reactive driving agents. *IEEE Intelligent Transportation Systems*.
- [Engineer, 2007] Engineer, A. (2007). Renault steers laguna upmarket. *Professional Engineering Publishing Ltd*, page 53.
- [Girija et al., 2007] Girija, Kulkarni, H., Waingankar, and G., P. (2007). Fuzzy logic based traffic light controller. In *2th International Conference on Industrial and Information Systems*.
- [Goodwin, 2004] Goodwin, P. B. (2004). The economic costs of road traffic congestion. *UCL (University College London), The Rail Freight Group*.
- [GPSof, ] GPSof. <http://www.gpssoftnav.com>.
- [Guzzella and Onder, 2005] Guzzella, L. and Onder, C. H. (2005). Vehicle propulsion systems: introduction to modeling and optimization. *Springer Verlag*.
- [Hoogendoorn and Bovy, 2001] Hoogendoorn, S. P. and Bovy, P. H. L. (2001). State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling. *Systems and Control Engineering*.
- [Huang et al., 2012] Huang, S., Sadeck, A. W., and Zhao, Y. (2012). Assessing the mobility and environmental benefits of reservation-based intelligent intersection using an integrated simulator. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13.
- [Iqbal et al., 2009] Iqbal, A., H.Mahmood, Farooq, U., Kabir, M. A., and Asad, M. U.

- (2009). An overview of the factors responsible for gps signal error: Origin and solution. *Int. Conf. on Wireless Networks and Information Systems*, pages 294–299.
- [Jimenez-Palacios, 1998] Jimenez-Palacios, J. L. (1998). Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and tildas remote sensing. *PhD thesis, USA: Massachusetts Institute of Technology*.
- [Jones et al., 2009] Jones, J., Mikolajewski, C., and Smereka, J. (2009). How to break way from blocking the box: deesigning a traffic circle. *Meeting of minds - Undergraduate Research Symposium*.
- [Kaplan, 1996] Kaplan, E. D. (1996). Understanding gps: Principles and applications. *Artech House Publishers, Boston*.
- [Lim et al., 2001] Lim, Young, G., Kang, Jin, J., Hong, and Sik, Y. (2001). The optimization of traffic signal light using artificial intelligence. In *The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*.
- [McTrans, 2006] McTrans (2006). "<http://www-mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/version5/corsim.htm>".
- [Mendes et al., 2003] Mendes, A., Bento, L. C., and Nunes, U. (2003). Path-tracking controller with an anti-collision behavior of a bi-steerable cybernetic car. *IEEE Conf. in Emerging Technologies and Factory Automation*, 1:613–619.
- [Morales and Tsubouchi, 2007] Morales, Y. and Tsubouchi, T. (2007). Dgps, rtk-gps and starfire dgps performance under tree shading environments. *IEEE Int. Conf. on Integration Technology*, pages 519–524.
- [Nagurney, 2000] Nagurney, A. (2000). Congested urban transportation networks and emissions paradoxes. *Transportation Research Part D*.
- [Oliver-Hoyo and Pinto, 2008] Oliver-Hoyo, M. T. and Pinto, G. (2008). Using the relationship between vehicle fuel consumption and co2 emissions to illustrate chemical principles. *Chemical Education*.
- [Park and Schneeberger, 2003] Park, B. and Schneeberger, J. D. (2003). Microscopic simulation model calibration and validation: Case study of vissim simulation model for a coordinated actuated signal system. *Transportation Research Record*, pages 185–192.
- [Pinkerton and Herbst, 2010] Pinkerton, F. and Herbst, J. (2010). Hydrogen-powered cars. *McGraw-Hill Yearbook of Science and Technology*.
- [Potuzak. and Herout, 2007] Potuzak., T. and Herout, P. (2007). Use of distributed traffic simulation in the juts project. *Int. Conf. on Computer as a Tool*.
- [Rakha et al., 2003] Rakha, H., Ahn, K., and Trani, A. (2003). Comparison of mobile5a, mobile6, vit-micro, and cmemmodels for estimating hot-stabilized light-duty gasoline vehicle emissions. *Canadian Journal of Civil Engineering*, pages 1010–1021.
- [Ray et al., 2005] Ray, S., Carruthers, J., and Starobinski, D. (2005). Evaluation of the masked node problem in ad hoc wireless lans. *IEEE Transactions on mobile computing*, 4.

- [Suzuki et al., 2007] Suzuki, S., Tsunoda, M., Taniguchi, M., and Takagi, T. (2007). Characterization of road traffic flow from measured data of speed and time-headway - relationship between density (k), flow rate(q) and speed (v). *Annual Conference SICE*, pages 2657–1661.
- [Tan et al., 1996] Tan, Khiang, K., Khalid, e Yusof, M., and Rubiyah (1996). Intelligent traffic lights control by fuzzy logic. *Malaysian Journal of Computer Science*, 9.
- [Treiber et al., 2000] Treiber, M., Hennecke, A., and D.Helbing (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62:1805–1824.
- [VISSIM, 2014] VISSIM (2014). "<http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>".
- [Williams et al., 2012] Williams, I., Kemp, S., Coello, J., Turner, D., and Wright, L. (2012). A beginner's guide to carbon footprinting. *Carbon*, 3:55–67.
- [Yang et al., 2004] Yang, Xiaoguang, Li, e Xue, X., and Kun (2004). A new traffic-signal control for modern roundabouts: Method and application. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
- [Zhu et al., 2009a] Zhu, M., Li, X., Huang, H., Kong, L., Li, M., and Wu, M.-Y. (2009a). Licp: A lookahead intersection control policy with intelligent vehicle. In *6th IEEE International Conference Mobile Adhoc and Sensor Systems*.
- [Zhu et al., 2009b] Zhu, Z. A., Mao, T., and Huang, Y. (2009b). Three steps to make the traffic circle go round. *The UMAP Journal*, pages 261–280.
- [Zohdy et al., 2012] Zohdy, I. H., Kamalanathsharma, R. K., and Rakka, H. (2012). Intersection management for autonomous vvehicle using icacc. In *15th Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems*.

## A. Anexos

### A.1. Tabela de Resultados Métodos Tradicionais nos simuladores *VISSIM* e *ISR-TrafSim*

	Fl. de Ent (veí/h)	Fl. de Saida (%)	T. Simulador(s)	Fl. de Saida (%)	T. Simulador(s)	Erro Fluxo (%)	Erro Tempo (s)
Rotunda	100	97,01	12,26	98,51	13,90	1,50	1,64
	200	97,00	14,63	97,75	14,25	0,75	0,38
	300	96,25	22,20	91,00	25,35	5,25	3,15
	400	87,64	26,78	72,26	33,27	15,38	6,49
	500	81,26	25,60	58,62	36,81	22,64	11,21
	600	75,63	26,34	49,38	36,61	26,25	10,27
	800	59,51	30,34	36,64	37,51	22,87	7,17
	1000	49,25	30,04	29,16	37,80	20,09	7,76
	1200	41,06	30,27	24,63	37,61	16,44	7,34
	1600	30,83	30,16	18,46	37,73	12,37	7,57
	2000	25,01	29,91	14,96	37,31	10,05	7,40
	2400	21,13	29,43	12,22	37,73	8,91	8,30
	3000	16,25	30,37	9,8	38,07	6,45	7,69
	3600	13,94	30,38	7,96	39,09	5,98	8,71
Cruzamento	100	93,28	35,82	92,54	37,44	0,75	1,62
	200	93,63	37,32	60,67	88,21	32,96	50,88
	300	90,00	38,82	41,25	93,58	48,75	54,76
	400	78,46	43,42	30,90	94,25	47,57	50,83
	500	70,16	46,26	24,59	96,38	45,58	50,12
	600	59,25	46,48	21,00	93,94	38,25	47,46
	800	44,89	46,69	15,56	95,27	29,33	48,59
	1000	36,51	46,29	12,29	96,19	24,21	49,90
	1200	30,56	46,41	10,38	93,39	20,19	46,98
	1600	22,91	46,61	7,73	98,73	15,18	52,12
	2000	18,37	46,59	6,15	95,44	12,22	48,84
	2400	15,34	46,55	5,28	97,11	10,06	50,55
	3000	12,28	46,58	4,23	93,97	8,05	47,39
	3600	10,23	46,59	3,48	98,00	6,75	51,41
	VISSIM			ISR-TrafSim		VISSIM-ISR-TrafSim	

Figura A.1.: Resultados do métodos tradicionais nos simuladores *VISSIM* e *ISR-TrafSim*.

## A.2. Tabelas de Resultados do Método *LEMITM*

Carros s/ V2I (%)	Fl. Entrada (veí/h)	Criados	Para Entrar	Ativos	Sairam	Fl. Saída (%)	Tempo Movimento (s)	Vel. Média (km/h)	Vel. Média Mov. (km/h)
10%	100	200	0	4	196	98,00	21,2554	22,8399	22,8399
	200	374	28	37	335	83,75	29,1190	14,1030	18,0263
	300	395	205	51	344	57,33	35,0088	11,1825	15,4567
15%	100	200	0	3	197	98,50	21,7618	20,5970	22,4923
	200	332	70	42	288	72,00	30,5959	11,8785	17,0215
	300	376	224	48	328	54,67	35,9155	9,5982	14,3741
20%	100	200	0	3	197	98,50	22,6564	19,1063	21,6335
	200	294	108	41	251	62,75	29,8827	11,5431	17,1283
	300	322	278	50	272	45,33	34,164	9,2388	14,4059
25%	100	200	0	5	195	97,50	22,7553	19,2735	21,4066
	200	310	92	45	263	65,75	33,3083	10,6052	15,8069
	300	338	262	46	292	48,67	32,6051	10,3848	15,408
30%	100	200	0	10	190	95,00	24,8173	15,0070	20,1932
	200	250	152	40	208	52,00	28,5360	11,7713	17,5198
	300	261	339	51	210	35,00	31,0837	10,0127	16,1783
35%	100	199	1	35	164	82,00	24,9333	14,4706	19,9666
	200	238	164	49	187	46,75	32,5688	8,8929	15,3028
	300	283	317	48	235	39,17	33,9195	7,6924	13,6713
40%	100	193	11	33	156	78,00	27,396	12,5274	18,7397
	200	230	172	44	184	46,00	30,6257	9,2511	16,4834
	300	272	328	45	227	37,83	31,9	8,627	14,6207
45%	100	188	16	38	146	73,00	27,4134	10,206	18,1441
	200	209	193	48	161	40,25	30,9725	7,969	15,3887
	300	213	387	48	165	27,50	35,0106	6,9689	14,16
50%	100	178	26	34	140	70,00	27,2851	13,3506	18,9515
	200	207	195	51	154	38,50	33,9616	7,1669	14,5999
	300	196	404	53	143	23,83	35,9941	6,3405	13,8849

Figura A.2.: Resultados do método *LEMITM* aplicado no cenário completo.

Métodos (Round + Cross)	Fl. Entrada (veí/h)	Criados	Para Entrar	Ativos	Sairam	Fl. Saída (%)	Tempo Movimento (s)	Vel. Média (km/h)	Vel. Média Mov. (km/h)
ITMD + STLS	100	190	10	23	167	83,5	22,6569	15,9475	24,1544
ITMD + STLS	200	300	100	53	247	61,8	30,2413	9,8217	17,9174
ITMD + STLS	300	319	281	52	267	44,5	34,8839	7,7365	15,6322
WMITM+STLS	100	200	0	5	195	97,5	14,7007	33,0784	33,272
WMITM+STLS	200	374	26	19	355	88,8	20,5174	25,0868	27,3638
WMITM+STLS	300	425	175	44	381	63,5	32,2278	16,6096	19,8055
EMITM+STLS	100	197	3	22	175	87,5	31,2828	15,3068	22,6535
EMITM+STLS	200	319	81	47	272	68,0	25,8258	11,7247	19,2445
EMITM+STLS	300	352	248	56	296	49,3	30,3	8,2234	16,2895

Figura A.3.: Resultados dos métodos comparados com o *LEMITM*.

### A.3. Tabela de Resultados dos Métodos para a Rotunda

Método	Fl. Entrada (veí/h)	Fl. Saída (%)	Tempo Movimento (s)	Vel. Média (km/h)	Cons. Gasolina (l/100km)
WMITM	100	97,01	11,7142	33,4074	5,1974
WMITM	200	97,75	11,9157	32,1766	5,7551
WMITM	300	70,50	16,1763	10,2362	13,0756
WMITM	400	61,42	15,0245	12,2944	12,2715
WMITM	500	48,88	16,3316	10,4388	13,5653
WMITM	600	36,38	16,0483	10,0493	12,9101
WMITM	800	29,15	16,4578	9,8302	13,6551
WMITM	1000	22,34	16,3635	9,5682	13,4659
WMITM	1200	18,69	16,7237	9,7533	13,3203
WMITM	1600	14,67	16,2796	10,0782	13,3514
WMITM	2000	12,41	16,0607	10,6903	13,3321
WMITM	2400	9,41	16,1266	9,6438	13,4131
WMITM	3000	8,05	15,8652	10,4717	13,4842
WMITM	3600	6,83	16,4163	10,2657	13,4716
EMITM	100	97,76	11,8782	33,3874	5,3322
EMITM	200	98,13	11,8403	32,4153	5,6132
EMITM	300	97,75	12,3841	30,2471	6,5372
EMITM	400	97,57	12,8145	28,2371	7,7196
EMITM	500	82,61	18,2151	13,5128	14,7758
EMITM	600	70,38	17,9142	13,6388	14,7904
EMITM	800	47,42	18,3410	12,2929	14,3577
EMITM	1000	38,31	18,5164	12,1232	15,0555
EMITM	1200	33,81	18,4040	12,6969	15,1121
EMITM	1600	25,35	18,5379	12,5736	14,9667
EMITM	2000	19,65	18,3582	12,4156	15,1125
EMITM	2400	17,94	18,1029	13,1420	14,99
EMITM	3000	12,98	18,6383	12,1591	15,1933
EMITM	3600	11,44	18,4835	12,6004	14,4927
FMITM	100	97,01	11,4977	34,3870	7,2031
FMITM	200	97,75	11,2615	34,8975	6,7383
FMITM	300	98,00	11,3195	34,2384	6,8037
FMITM	400	97,94	11,2269	34,2838	8,5306
FMITM	500	94,15	14,7836	19,7277	13,3620
FMITM	600	79,38	16,4078	15,5499	15,0177
FMITM	800	57,92	16,5827	14,8933	15,0077
FMITM	1000	49,78	16,7094	15,2721	14,8889
FMITM	1200	39,00	16,7649	14,8386	15,3052
FMITM	1600	30,08	16,7567	14,9934	15,3282
FMITM	2000	24,48	16,7292	15,0335	15,1232
FMITM	2400	20,75	16,9893	15,0527	15,3550
FMITM	3000	16,23	16,6263	14,9899	15,1710
FMITM	3600	13,79	16,8090	15,1838	15,2633

Figura A.4.: Resultados dos métodos com reserva espacio-temporal para a rotunda.

### A.4. Tabela de Resultados dos Métodos para o Cruzamento

Método	Fl. Entrada (veí/h)	Fl. Saída (%)	Vel. Média (km/h)	Cons. Gasolina (l/100km)	Método	Fl. Entrada (veí/h)	Fl. Saída (%)	Vel. Média (km/h)	Cons. Gasolina (l/100km)
CIITM	100	98,51	35,08	8,070	EMITM	100	98,51	35,36	7,241
CIITM	200	96,25	23,45	11,493	EMITM	200	97,75	36,26	5,815
CIITM	300	77,75	14,10	14,031	EMITM	300	98,25	35,53	8,296
CIITM	400	62,92	10,12	15,037	EMITM	400	98,13	35,57	7,936
CIITM	500	49,32	10,04	15,149	EMITM	500	98,20	36,04	9,426
CIITM	600	41,13	9,12	15,185	EMITM	600	81,25	13,64	14,790
CIITM	800	31,12	9,18	15,199	EMITM	800	78,07	17,32	15,052
CIITM	1000	25,56	9,56	15,222	EMITM	1000	60,87	16,28	15,361
CIITM	1200	21,00	8,79	15,255	EMITM	1200	49,81	16,11	15,377
CIITM	1600	15,65	10,17	15,271	EMITM	1600	39,41	16,44	15,441
CIITM	2000	12,56	9,00	15,269	EMITM	2000	31,12	16,48	15,386
CIITM	2400	10,47	9,21	15,278	EMITM	2400	17,94	13,14	14,990
CIITM	3000	8,48	9,05	15,300	EMITM	3000	12,98	12,16	15,193
CIITM	3600	6,85	9,36	15,220	EMITM	3600	11,44	12,60	14,493
WMITM	100	98,51	37,20	3,809	FMITM	100	98,51	37,50	4,012
WMITM	200	98,50	36,68	4,479	FMITM	200	98,50	37,24	4,338
WMITM	300	98,50	35,23	5,265	FMITM	300	98,50	37,07	4,825
WMITM	400	98,31	33,91	5,790	FMITM	400	98,50	37,01	5,981
WMITM	500	87,26	14,83	14,510	FMITM	500	98,35	35,55	6,667
WMITM	600	75,25	12,22	15,869	FMITM	600	89,00	16,47	15,504
WMITM	800	54,45	11,81	15,796	FMITM	800	68,79	13,62	17,049
WMITM	1000	44,75	11,59	16,155	FMITM	1000	55,62	13,66	16,856
WMITM	1200	36,81	11,68	15,999	FMITM	1200	45,56	12,91	17,347
WMITM	1600	27,18	10,96	16,589	FMITM	1600	33,13	12,68	17,189
WMITM	2000	20,51	10,78	16,092	FMITM	2000	28,20	13,35	17,151
WMITM	2400	18,34	11,16	16,461	FMITM	2400	22,97	13,01	17,357
WMITM	3000	14,43	12,16	15,193	FMITM	3000	18,98	13,36	17,341
WMITM	3600	12,00	10,87	16,541	FMITM	3600	16,02	13,44	17,283

Figura A.5.: Resultados dos métodos com reserva espaço-temporal para o cruzamento.

## A.5. Tabela de Resultados para Análise de Desempenho do Método *FMITM*

	vel_max	Layer_w	Layer_l	Rotunda	Nº Colisões Resol.	Tempo Movimento (%)	Cons. Gasolina (l/100km)
<b>Dataset 1</b>	40	1	5	FMITM	0,00	98,08	5,66
	45	1	5	FMITM	15,53	98,37	5,81
	50	1	5	FMITM	28,57	98,65	6,21
	55	1	5	FMITM	37,16	98,95	6,89
	60	1	5	FMITM	62,65	99,48	8,73
	65	1	5	FMITM	75,61	99,71	8,46
<b>Dataset 2</b>	40	1	2.5	FMITM	0,00	96,25	6,35
	45	1	2.5	FMITM	16,18	97,35	6,47
	50	1	2.5	FMITM	16,67	97,16	6,50
	55	1	2.5	FMITM	16,51	96,93	6,68
	60	1	2.5	FMITM	19,79	97,28	6,80
	65	1	2.5	FMITM	24,75	97,63	7,43

Figura A.6.: Resultados da Análise de Desempenho do Método *FMITM*.

### A.6. Trajecto para avaliar Ângulo Traseiro do Sistema 4WS

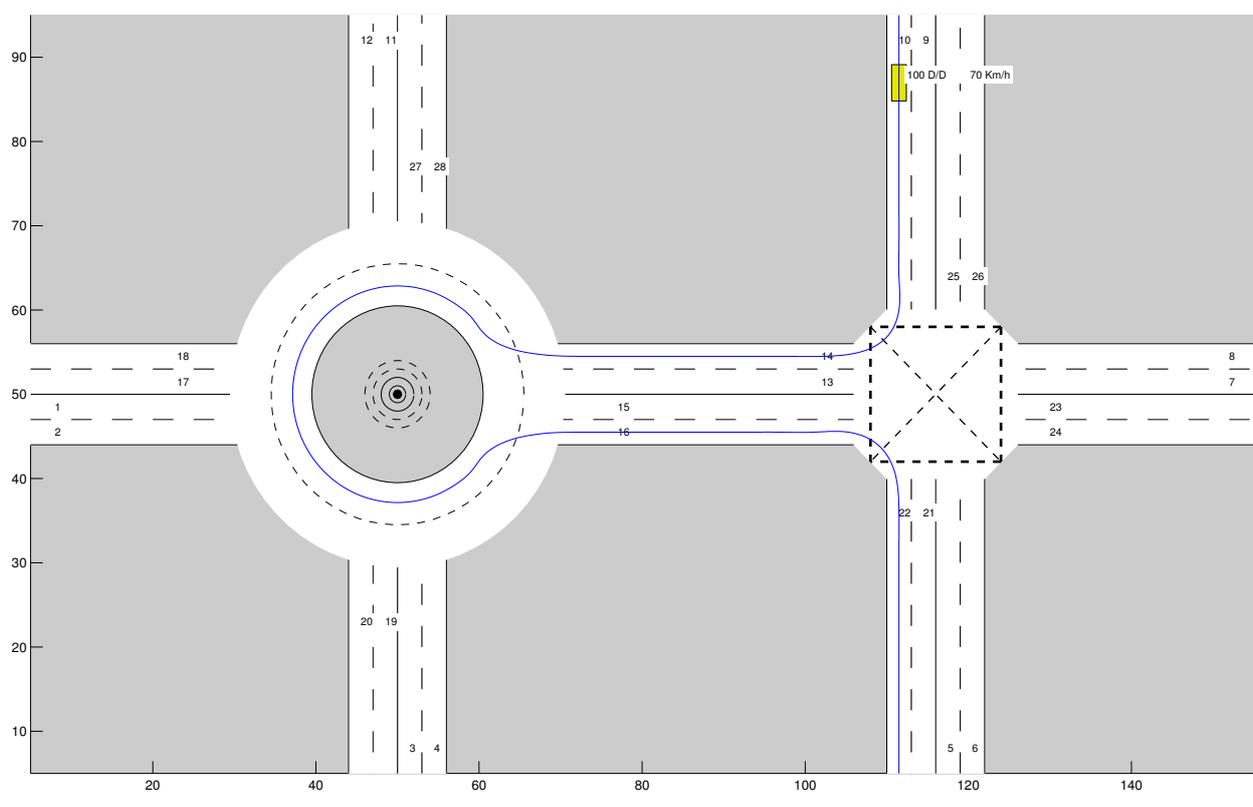


Figura A.7.: Trajecto para avaliar ângulo traseiro do sistema 4WS.