



Universidade de Coimbra

Faculdade de Ciências e Tecnologia

**Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores**

– Especialização em Automação –

# **Sistema de gestão de tráfego em rotundas e cruzamentos com integração sensorial dos veículos em ambiente de simulação**

Ricardo Jorge Pedrosa Parafita

**Orientador:** Professor Doutor Urbano José Carreira Nunes

**Co-orientador:** Mestre Luís Manuel Conde Bento

**Júri:**

**Presidente:** Professor Doutor Rui Alexandre de Matos Araújo

**Vogais:** Professor Doutor Urbano José Carreira Nunes

Professor Doutor Rui Paulo Pinto da Rocha

**Coimbra, Setembro de 2011**

"Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a electricidade e a energia atómica: a vontade."

Albert Einstein

## Agradecimentos

Embora exista um sem número de pessoas a quem devo agradecer e que contribuíram para que o meu percurso académico chegasse a bom termo, neste espaço apenas mencionarei as mais importantes ficando para todas as outras o mais sincero obrigado com a certeza de que não foram esquecidas.

No âmbito desta dissertação gostaria de agradecer ao Professor Doutor Urbano Nunes pela oportunidade de poder trabalhar sob a sua orientação, pela disponibilidade que sempre demonstrou e pelas críticas e opiniões dadas no intuito de melhoramento deste trabalho. Gostaria também de dar o meu agradecimento ao Mestre Luís Conde Bento pela disponibilidade e pelos valiosos contributos para a realização desta dissertação mas também pelas horas passadas em *brainstorming* que tantas vezes ajudaram a descobrir o caminho mais acertado. Uma palavra também ao ISR-Coimbra (Instituto de Sistemas e Robótica - Pólo de Coimbra) pelas excelentes condições de trabalho disponibilizadas.

Acima de tudo gostaria de agradecer aos meus pais pelo esforço realizado para me proporcionar a oportunidade de estudar e por todo o apoio demonstrado durante todo o meu percurso académico.

Um grande obrigado para os meus avós Manuel e Maria pelas constantes palavras de incentivo e por toda a ajuda prestada ao longo do curso.

Gostaria de agradecer aos meus amigos e colegas que encontrei durante a minha passagem pela maravilhosa cidade de Coimbra pelo seu apoio e amizade.

Uma palavra especial à Diana pela paciência, carinho, incentivo e apoio demonstrado em todos os momentos.

A todos o meu sincero obrigado!

## Resumo

A presente dissertação descreve um simulador que permite implementar e avaliar o desempenho de técnicas de gestão de tráfego. Para o referido simulador foram desenvolvidos/integrados diversos métodos de posicionamento, tais como, sistemas de navegação inercial, sistemas de navegação por satélite, odometria, fusão sensorial e fontes de informação auxiliar tais como medidores de distância laser e marcadores magnéticos.

Uma vez que a comunicação entre veículos e entre veículos e infra-estruturas constitui um importante avanço na área dos sistemas de transportes inteligentes, este aspecto foi também contemplado no simulador de forma a proporcionar uma maior versatilidade e capacidade de expansão.

Por forma a tornar o simulador o mais abrangente possível, foram incluídas duas das situações mais comuns usadas para regular intersecções, os cruzamentos e as rotundas. Foram ainda desenvolvidos métodos de gestão descentralizados para cada uma destas situações e os respectivos desempenhos foram avaliados através de diversos cenários simulados.

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projecto EVSIM09 – Modelos para a simulação de tráfego de veículos eléctricos com comunicações e capacidade de decisão dinâmica (Projecto PTDC/SEN-TRA/099413/2008, 2010-2012) financiado por Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

**Palavras-chave:** Sistemas de transporte inteligentes, simulador de tráfego, INS, GNSS, gestão de tráfego descentralizada.

## Abstract

This work aimed to the realization of a simulator that allows the implementation of traffic management techniques and evaluates their performance. To achieve this purpose various methods of positioning are simulated, such as inertial navigation systems, satellite navigation systems, odometry, sensorial fusion and auxiliary sources of information such as laser range finders and magnetic markers.

Since the communication V2V (vehicle-to-vehicle) and V2I (vehicle-to-infrastructure) are an important advancement in ITS (intelligent transport systems) area, this feature was also included in the simulator in order to provide a higher versatility and expandability.

In order to make the simulator as comprehensive as possible, two of the most common methods used in the regulation of intersections, the crossings and roundabouts were included. Decentralized gestion methods are developed for each of these situations and their impact was evaluated through several simulated scenarios.

This thesis was performed under the project EVSIM09 - Models for Traffic Simulation of Electric Vehicles with communications and dynamic decision capacity (Project PTDC/SEN-TRA/099413/2008, 2010-2012) funded by Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT).

**Keywords:** Intelligent transport systems (ITS), traffic simulator, INS, GNSS, decentralized traffic gestion

# Índice

Índice.....	i
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas.....	v
Lista de Abreviaturas.....	vi
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objectivos.....	1
1.3. Organização da Dissertação.....	1
2. Estado da arte.....	2
2.1. Simuladores de tráfego.....	2
2.2. Intersecções.....	3
2.2.1. Cruzamentos.....	3
2.2.2. Rotundas.....	3
3. Enquadramento Teórico.....	4
3.1. Sistema de navegação por satélite.....	4
3.2. Sistema de navegação inercial.....	5
3.3. Medidor de distâncias laser.....	6
3.4. Marcadores magnéticos.....	7
3.5. Modelo do veículo.....	8
3.5.1. Modelo cinemático.....	8
3.5.2. Modelo dinâmico.....	10
4. Implementação e modelação do simulador.....	11
4.1. Requisitos e arquitectura do simulador.....	11
4.2. Cenário da simulação e planeamento de trajectórias.....	13
4.3. Modelação.....	15
4.4. Controlo do veículo.....	18
4.5. Sistema de navegação por satélite.....	19
4.6. Sistema de navegação inercial.....	21
4.7. Marcadores magnéticos.....	23
4.8. Medidor de distâncias laser.....	24
4.9. Sistemas de gestão de tráfego automóvel descentralizados.....	26
4.9.1. Circulação automóvel sem sistemas de gestão.....	26

4.9.2.	Rotunda com sistema de gestão .....	27
4.9.3.	Gestão do cruzamento .....	30
4.10.	Sistema de comunicação .....	31
4.11.	Erros laterais .....	33
4.12.	Fusão sensorial.....	34
5.	Resultados .....	36
5.1.	Sistemas de posicionamento .....	36
5.1.1.	Posicionamento usando odometria.....	36
5.1.2.	Sistema de navegação por satélite.....	37
5.1.3.	Sistema de navegação inercial.....	38
5.1.4.	Marcadores Magnéticos .....	39
5.1.5.	Fusão sensorial (GPS + INS) .....	40
5.2.	Sistemas de gestão de tráfego .....	42
5.2.1.	Testes individuais.....	43
5.2.2.	Testes em conjunto.....	45
6.	Conclusão.....	49
7.	Trabalho futuro.....	50
8.	Referências Bibliográficas .....	51
9.	Anexos.....	54
A.	Fases do desenvolvimento do simulador .....	54
B.	Tabela de roteamento .....	55
C.	Vector de estados usado na fusão sensorial .....	56
D.	Cenários usados nos testes individuais .....	57
E.	Interface .....	57
F.	Notas sobre o simulador.....	59
G.	Teste com medidor de distâncias laser.....	60

## Lista de Figuras

Figura 1: Princípio da navegação via satélite, com distância obtida através de <i>pseudoranges</i> [25].	4
Figura 2 – a) Exemplo de um LRF, o LMS200; b) Representação ilustrativa do varrimento de um LRF [28].	6
Figura 3 – Componente vertical do campo magnético (eixo-x e eixo-y em [cm] e eixo-z em [mT] com o sensor a uma altura de 6,75cm) [32].	7
Figura 4 – Geometria do veículo modelizado.	8
Figura 5 – Fluxograma sintetizado ilustrativo da arquitectura do simulador.	12
Figura 6 – Cenário do simulador.	13
Figura 7 – Segmentos constituintes do cenário do simulador.	14
Figura 8 – Etapas da construção da trajectória: a) <i>Setpoints</i> dos segmentos 1, 35 e 19; b) Etapa intermédia do processo de suavização; c) Trajectória obtida após o processo de suavização.	15
Figura 9 - Mecanismo de verificação de colisão: a) Situação I; b) Situação II.	18
Figura 10 – Satélites visíveis num dado instante para a posição $x \approx 4,8344 \times 10^6$ , $y \approx 0,7001 \times 10^6$ e $z \approx 4,0874 \times 10^6$ .	20
Figura 11 – Procedimento executado pelo módulo GPS (DGPS).	20
Figura 12 – Procedimento executado pelo módulo INS.	22
Figura 13 – Posicionamento no veículo da régua de sensores magnéticos.	23
Figura 14 – Procedimento executado pelo módulo MM.	23
Figura 15 – Procedimento usado para simulação de um LRF.	25
Figura 16 – Representação simplificada de uma parte da grelha de ocupação usada na simulação de um LRF que emite 9 raios laser com um ângulo de abertura de $180^\circ$ .	25
Figura 17 – Cruzamento implementado no simulador.	26
Figura 18 – Etapas do processo de gestão de tráfego na rotunda.	27
Figura 19 – Exemplo da matriz tridimensional usada pelo sistema de gestão para reserva de espaço.	28
Figura 20 – Exemplo das grelhas de ocupação: a) Instante $t=a$ ; b) Instante $t=a+T$ ; c) Instante $t=a+2T$ .	29
Figura 21 – Exemplo de uma situação de gestão no cruzamento: a) Situação simulada com desenho de trajectórias; b) Exemplo da grelha de ocupação para a situação simulada.	30
Figura 22 – Percurso de um pacote de dados: a) Sistema simulado; b) Sistema simplificado.	32
Figura 23 – Cálculo dos erros de posição.	33

Figura 24 – Procedimento executado pelo módulo de fusão sensorial. ....	35
Figura 25 – Comparação entre a trajectória efectuada e a estimativa obtida através de odometria com erro introduzido sobre 10% dos pulsos gerados.....	36
Figura 26 – Amostras do erro obtido para diferentes metodologias de GPS e média das amostras: a) <i>Pseudoranges</i> ; b) DGPS; c) RTK-GPS. ....	37
Figura 27 – Resultados da simulação usando o INS: a) Comparação entre a trajectória efectuada e a estimativa obtida via INS; b) Erro de posicionamento ao longo da trajectória..	39
Figura 28 – Erro de posição da estimativa obtida por INS em função do número de marcadores magnéticos de cada segmento. ....	40
Figura 29 – Resultados obtidos pela fusão sensorial (GPS + INS) para diferentes tipos de GPS: a) <i>Pseudoranges</i> ; b) DGPS; c) RTK-GPS.....	41
Figura 30 – Análise individual dos sistemas de gestão de tráfego: a) Rotunda; b) Rotunda; c) Cruzamento; d) Cruzamento. ....	44
Figura 31 – Análise conjunta dos sistemas de gestão de tráfego. ....	46
Figura 32 – Velocidade dos veículos no trajecto entre os segmentos 1 e 25 para um dado intervalo de tempo com uma taxa de amostragem de 5 HZ para uma simulação com fluxo de entrada de 100 veículos/hora e com o sistema de gestão do cruzamento activo.....	47
Figura 33 – Nível de ocupação da grelha durante uma simulação com fluxo de entrada de 150 veículos/h, sem sistemas de gestão activos. ....	48
Figura 34 – Primeira versão do simulador. ....	54
Figura 35 - Tabela de roteamento. ....	55
Figura 36 – Cenários utilizados para avaliação individual dos sistemas de gestão: a) Rotunda; b) Cruzamento. ....	57
Figura 37 – <i>Interface</i> do simulador.....	58
Figura 38 – Resultados obtidos para o feixe a 90 <sup>0</sup> do LRF sem outros carros no simulador. .	60
Figura 39 - Resultados obtidos para o feixe a 90 <sup>0</sup> do LRF com outros carros no simulador. .	60

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tipos de erros verificados na odometria e possíveis causas [33].....	9
Tabela 2 – Probabilidades de destino.....	16
Tabela 3 – Dimensões dos veículos. ....	17
Tabela 4 – Erros finais obtidos usando odometria para diferentes taxas de erro introduzido..	36
Tabela 5 – Erros médios, máximos e mínimos das diferentes metodologias de GPS.....	38
Tabela 6 – Erro médio da estimativa obtida pelo INS em função do número de marcadores magnéticos de cada segmento. ....	40
Tabela 7- Resultados obtidos para a fusão sensorial (INS e GPS) para diferentes tipos de GPS. .....	42
Tabela 8 – Resultados da avaliação individual do sistema de gestão da rotunda. ....	43
Tabela 9 - Resultados da avaliação individual do sistema de gestão do cruzamento. ....	44
Tabela 10 - Resultados da avaliação em colectiva dos sistemas de gestão.....	45

## **Lista de Abreviaturas**

DGPS – *Differential Global Positioning System*  
DOP – *Dilution of precision*  
DR – *Dead Reckoning*  
ENU – *East-North-Up*  
GNSS – *Global Navigation Satellite System*  
GPS – *Global Positioning System*  
I2V – *Infrastructure to Vehicle*  
IMU – *Inertial Measurement Unit*  
INS – *Inertial Navigation System*  
ISA – *Inertial Sensor Assembly*  
ITS – *Intelligent Transportations Systems*  
KF – *Kalman Filter*  
LRF – *Laser Range Finder*  
MM – *Magnetic Markers*  
NED – *North-East-Down*  
RTK-GPS – *Real Time Kinematic Global Positioning System*  
V2I – *Vehicle to Infrastructure*  
V2V – *Vehicle to Vehicle*

# **1.Introdução**

## **1.1. Motivação**

Numa sociedade em que o tempo é valioso e em que o automóvel continua a ser o principal meio adoptado para efectuar deslocações, torna-se necessário criar sistemas capazes de fazer fluir a circulação automóvel, para que seja minimizado o tempo gasto pelos condutores nas suas deslocações, minimizando assim o custo ambiental da circulação automóvel causado pelo crescente número de veículos a circular nos centros urbanos. Se possível os sistemas criados devem contribuir para aumentar a segurança rodoviária minimizando assim o impacto social e económico dos acidentes. Actuar por forma a influenciar positivamente estes aspectos reveste-se de grande importância económica, veja-se por exemplo o caso da Inglaterra onde foram estimados para o ano de 2010 custos anuais de aproximadamente 34 biliões de euros derivados da ocorrência de congestionamentos [1].

## **1.2. Objectivos**

Esta dissertação teve como objectivo desenvolver um simulador de tráfego automóvel onde devem estar integrados diversos sistemas de suporte às novas tecnologias de sistemas de transportes inteligentes para que seja possível aplicar técnicas de gestão de tráfego automóvel e avaliar o seu impacto em ambiente simulado.

As ferramentas integradas devem dar suporte a sistemas de posicionamento e possibilitar a simulação de comunicações entre veículos e entre veículos e infra-estruturas. O simulador deve também possuir interface para que seja possível ao utilizador configurar diversos cenários de forma expedita.

## **1.3. Organização da Dissertação**

No Capítulo 1 são abordados os objectivos da dissertação assim como a sua motivação e estrutura. No Capítulo 2 da dissertação é realizada uma revisão da literatura onde são abordados trabalhos já realizados na área de desenvolvimento de simuladores assim como na área de gestão de tráfego. O enquadramento teórico sobre as ferramentas incorporadas no simulador é realizado no Capítulo 3. No Capítulo 4 são descritos os detalhes da implementação das ferramentas utilizadas, os modelos utilizados e os algoritmos utilizados na gestão de tráfego. De seguida, no Capítulo 5, são apresentados um conjunto de simulações bem como os resultados obtidos.

## 2.Estado da arte

### 2.1. Simuladores de tráfego

O aumento de população nas áreas urbanas tem um forte impacto no número de veículos em circulação e pode conduzir em último caso à necessidade da criação de novas infra-estruturas (estradas, sinalização, pontes, etc.) o que se torna indesejável devido aos elevados custos associados e ao impacto negativo de obras e de desvios de trânsito no fluxo do tráfego.

Devido à ineficiência dos sistemas convencionais em resolver os problemas inerentes ao aumento de tráfego, a área de *Intelligent Transportations Systems* (ITS) passou a ser alvo de atenção redobrada. Os desenvolvimentos nesta área têm sido promissores e mostram capacidade para atenuar a rápida deterioração do sistema de transportes actual, contudo, a implementação dos sistemas desenvolvidos implica geralmente um forte investimento, o que levou ao inevitável aparecimento de simuladores de tráfego automóvel para avaliação da relação custo/benefício dos sistemas desenvolvidos.

Os simuladores existentes são, regra geral, divididos em três categorias de acordo com o nível de representação dos veículos [2] [3] [4]:

- *Macroscopic* – Neste tipo de simuladores os veículos são geralmente tratados como agregados em que o seu movimento é modelizado através de equações matemáticas, o que leva a que sejam computacionalmente mais rápidos. Os parâmetros analisados são: fluxo, densidade e velocidade. São utilizados em situações em que se pretende simular um elevado número de veículos por um longo período de tempo. São exemplos deste tipo de simuladores o KRONOS [5] ou o METACOR [6].
- *Microscopic* - Ao contrário do tipo anteriormente referido, nesta categoria de simuladores cada veículo é tratado individualmente. Tal metodologia leva a que possam ser considerados os diferentes tipos de condutores, tipos de veículos e a interação entre eles e o ambiente que os rodeia. Devido ao facto de serem uma aproximação mais realista estes são os mais utilizados na área de ITS. Existem actualmente vários simuladores deste tipo tais como o TSIS-CORSIM [7], PARAMICS [8], VISSIM [9], e podem também ser encontradas *on-line* pequenas aplicações [10].
- *Mesosopic* – Este tipo de simuladores possuem algumas das características individuais dos modelos *microscopic*, mas regra geral o fluxo de tráfego continua a ser

tratado como um agregado de veículos de maneira análoga aos modelos *macroscopic*. Um exemplo deste tipo de simuladores é o DynaMIT [11].

## 2.2. Intersecções

As rotundas<sup>1</sup> e cruzamentos<sup>2</sup> são duas das infra-estruturas mais usadas para a regulação de intersecções. Em ambiente urbano são susceptíveis de causar maiores transtornos aos condutores, sendo por isso alvo de atenção por parte das novas tecnologias de ITS.

### 2.2.1. Cruzamentos

Com objectivo de regular o trânsito nos cruzamentos e resolver conflitos entre condutores causados pela regulação através de sinais de *stop* e pela regra de perda de prioridade à direita, surgiram em 1868, pela primeira vez, sinais luminosos em Westminster, Londres. Anos mais tarde (1920, surgiram em Detroit os primeiros semáforos utilizando três cores [12].

Actualmente, os semáforos são na sua maioria actuados de duas maneiras, através do tráfego ou através de temporizações pré-definidas. O primeiro método de controlo é usado sobretudo em países desenvolvidos pois a sua implementação necessita de infra-estruturas adicionais, que países pouco desenvolvidos não podem suportar. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos com vista à optimização do controlo dos sinais luminosos sendo o seu principal foco a optimização do tempo de cada ciclo nomeadamente, através de sistemas de lógica difusa [13] [14] [15] [16] [17].

### 2.2.2. Rotundas

As rotundas foram testadas como solução para regular intersecções em 1904 (Nova Iorque), mas apenas anos mais tarde, em 1966, foi adoptado o sistema de prioridade para quem circula dentro da rotunda [18].

Actualmente existem diversos tipos de rotundas que diferem em tamanho, número de faixas e *design*. Estas podem ser agrupadas em três grandes categorias: Mini-rotundas, rotundas de faixa única e rotundas de múltiplas faixas [19].

Rapidamente esta solução revelou problemas em períodos de elevado fluxo de tráfego, sendo por isso alvo de estudo e várias soluções foram propostas, como por exemplo, o uso de sinalização [20] [21] [22] ou soluções alternativas em termos de *design* [23].

---

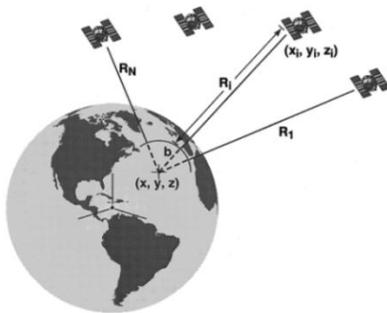
<sup>1</sup> Praça formada por cruzamento ou entroncamento onde o trânsito se processa em sentido giratório e sinalizada como tal [37].

<sup>2</sup> Zona de intersecção de vias públicas ao mesmo nível [37].

## 3. Enquadramento Teórico

### 3.1. Sistema de navegação por satélite

O GPS (*Global Positioning System*) é um sistema de navegação por satélite (GNSS), desenvolvido inicialmente com propósitos militares em meados de 1970, que foi disponibilizado posteriormente para uso civil [24]. Este método de posicionamento consiste na medição de *pseudoranges*<sup>3</sup> para obter a distância entre o receptor e pelo menos quatro satélites (Figura 1). Teoricamente seriam necessários apenas três satélites, mas do ponto de vista prático é necessário um quarto satélite para resolver o problema de sincronização dos relógios.



$$\begin{aligned} & \{R_j\}: \text{Pseudoranges} \\ & \{(x_i, y_i, z_i)\}: \text{Posições dos satélites (conhecidas)} \\ & R_j = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - b, \\ & \quad i = 1, 2, \dots, N \\ & \text{Necessário } N \geq 4 \text{ para determinar} \\ & \text{a posição } (x, y, z) \text{ e o bias do relógio } b \end{aligned}$$

Figura 1: Princípio da navegação via satélite, com distância obtida através de *pseudoranges* [25].

Outra metodologia consiste na análise do número de ciclos recebidos de uma onda portadora (*carrier-phase*), que multiplicados pelo comprimento de onda, permitem efectuar uma medição da distância com maior precisão do que a obtida através de *pseudoranges*.

Contudo estas metodologias são afectadas por um conjunto de factores, entre eles, atrasos no sinal provocados pela ionosfera/troposfera, erros de relógio, reflexões do sinal (*multipath*) ou geometria deficiente no posicionamento dos satélites. Com o intuito de aumentar a precisão (3m a 5m com *pseudoranges*) surgiram técnicas, que através de diferenciação dos sinais recebidos pelo receptor e por uma estação adicional fixa de localização conhecida, permitem obter precisões de 1-0.5m no caso de *Differential GPS* (DGPS) ou até na ordem de alguns centímetros com o uso de *Real-Time Kinematic GPS* (RTK-GPS) [26]. Estas técnicas baseiam-se no facto dos erros sofridos serem idênticos para dois receptores muito próximos, o que permite que estes possam ser parcialmente anulados aumentando assim a precisão no posicionamento. Mais detalhes sobre este assunto podem ser encontrados em [24] [27] [26].

<sup>3</sup> Medição da diferença temporal entre o código digital gerado no receptor e o recebido via satélite.

### 3.2. Sistema de navegação inercial

O conceito que serve de base a este tipo de sistema é matematicamente descrito de forma simples pela seguinte equação,

$$x(T) = x(0) + \int_0^T \int_0^T a(t) dt dt \quad (1)$$

onde  $x(T)$  é a posição no instante  $t=T$ ,  $x(0)$  a posição no instante  $t=0$  e o duplo integral traduz o deslocamento entre os instantes  $t=0$  e  $t=T$  em função da aceleração, ou seja, através da dupla integração da aceleração é possível obter o deslocamento. Mas para obter um sistema de navegação inercial ou *inertial navigation system* (INS) existe a necessidade de medir também rotações para que as acelerações medidas possam ser referenciadas. Um INS usa três tipos de sensores:

- Acelerómetros – Medem acelerações causadas pela aplicação de uma força. A sua relação é dada pela segunda lei de Newton, ou seja, a resultante das forças aplicadas sobre um ponto material é igual ao produto da sua massa pela aceleração adquirida.
- Giroscópios – Medem rotações de um referencial, podendo medir taxas de rotação, *rate gyros*, ou medir os ângulos de rotação acumulados, *whole-angle gyros*.
- Giro-compassos – Instrumento que indica o norte. Difere das tradicionais bússolas magnéticas pois este baseia-se na rotação da terra em detrimento do polo magnético.

Para efeitos de navegação estes sensores são colocados numa montagem conhecida como *Inertial Sensor Assembly* (ISA), onde são colocados numa plataforma comum três acelerómetros e três giroscópios com uma orientação relativa específica. No entanto, estes sensores necessitam de electrónica de suporte para calibração e controlo. A associação desta electrónica com a ISA é conhecida por *Inertial Measurement Unit* (IMU).

### 3.3. Medidor de distâncias laser

Um *Laser Range Finder* (LRF) é um dispositivo utilizado para a formação de um plano de medição 2D (Figura 2) através da aquisição de um conjunto de distâncias. Podem ser também adquiridos vários planos 2D de forma a obter um varrimento 3D.

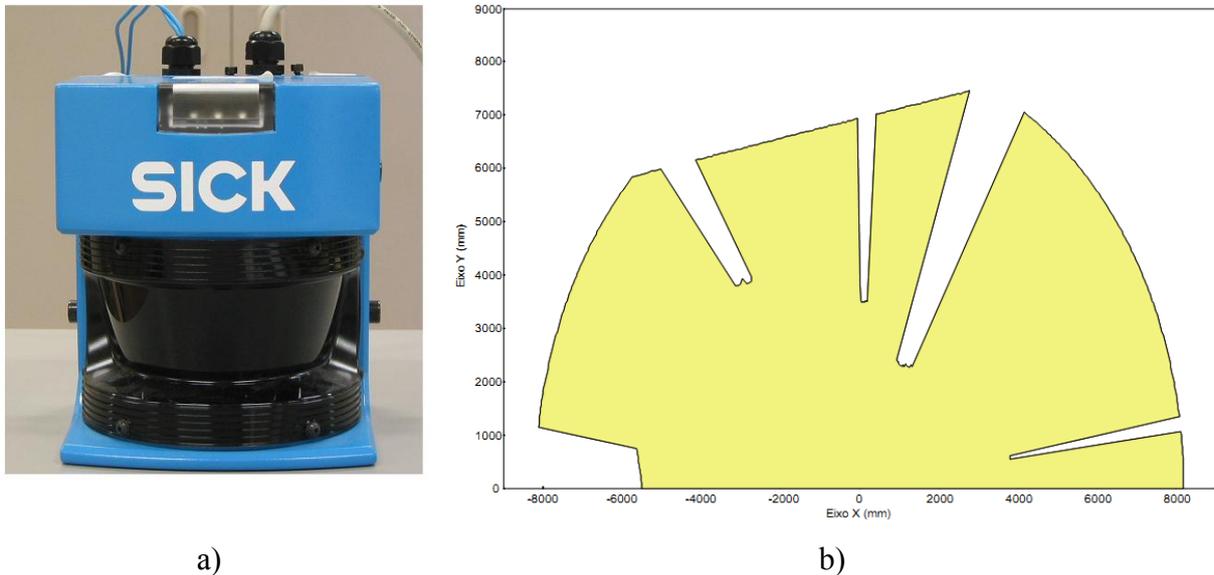


Figura 2 – a) Exemplo de um LRF, o LMS200; b) Representação ilustrativa do varrimento de um LRF [28].

Os LRF podem ser classificados de acordo com a técnica usada na medição, sendo duas as técnicas fundamentais [29] [30]:

- Tempo de voo – Para efectuar uma medição, este tipo de LRF's emite um pulso de luz que é reflectido de volta até um receptor. A distância é determinada com base no tempo de voo do pulso e na velocidade da luz.
- Mudança de fase – Consiste na emissão contínua de um feixe de uma onda sinusoidal com parâmetros conhecidos. A distância é obtida com base na frequência do sinal e no desfasamento entre o sinal emitido e o sinal reflectido.

### 3.4. Marcadores magnéticos

Para que seja possível implementar um sistema de posicionamento baseado em marcadores magnéticos (*magnetic markers*, MM) usando magnetos permanentes, é necessário caracterizar o campo radiado pelo magneto, pois um bom modelo torna-se fundamental para distinguir o campo detectado de ruídos que possam existir. Investigadores do PATH (*Partners for Advanced Transit and Highways*) modelizaram um MM como um dipolo magnético [31] [32]. Temos então que o campo magnético  $B(x,y,z)$ , num qualquer ponto  $P(x,y,z)$  pode ser calculado através da equação ( 2 ),

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

onde  $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  e  $M$  é momento magnético do MM e o eixo-x corresponde à direcção do movimento, o eixo-y corresponde ao desvio lateral e  $z$  é função da altura em relação ao centro do MM. Como é possível verificar na Figura 3 obtida através da aplicação da equação ( 2 ), a componente vertical do campo atinge o seu máximo quando o sensor está exactamente sobre o centro do MM.

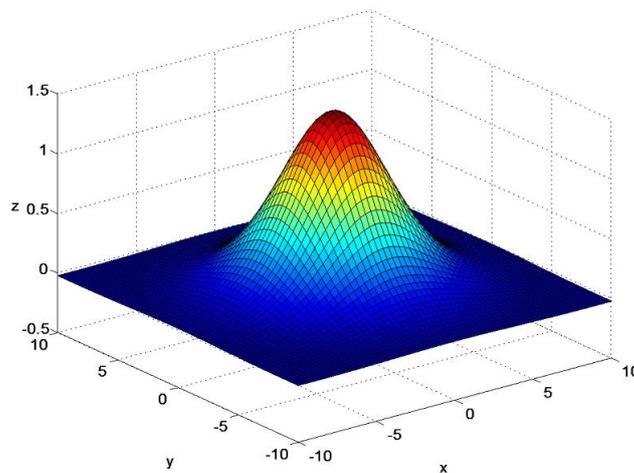


Figura 3 – Componente vertical do campo magnético (eixo-x e eixo-y em [cm] e eixo-z em [mT] com o sensor a uma altura de 6,75cm) [32].

Trata-se de uma técnica bastante adequada aos ambientes rodoviários pois as medições são efectuadas sem qualquer tipo de contacto físico (usando réguas de sensores magnéticos) e não são afectadas pelas condições meteorológicas. Apresenta como principal desvantagem o facto de os sensores poderem captar campos magnéticos com outra proveniência introduzindo assim ruído nas medições.

## 3.5. Modelo do veículo

### 3.5.1. Modelo cinemático

Num simulador do tipo microscópico, onde os aspectos individuais dos veículos são considerados, é necessário modelizar os veículos. Para essa representação uma das alternativas é o uso do modelo cinemático. Este tipo de modelo descreve matematicamente, o movimento de um veículo de forma discreta através de rotações e translações puras.

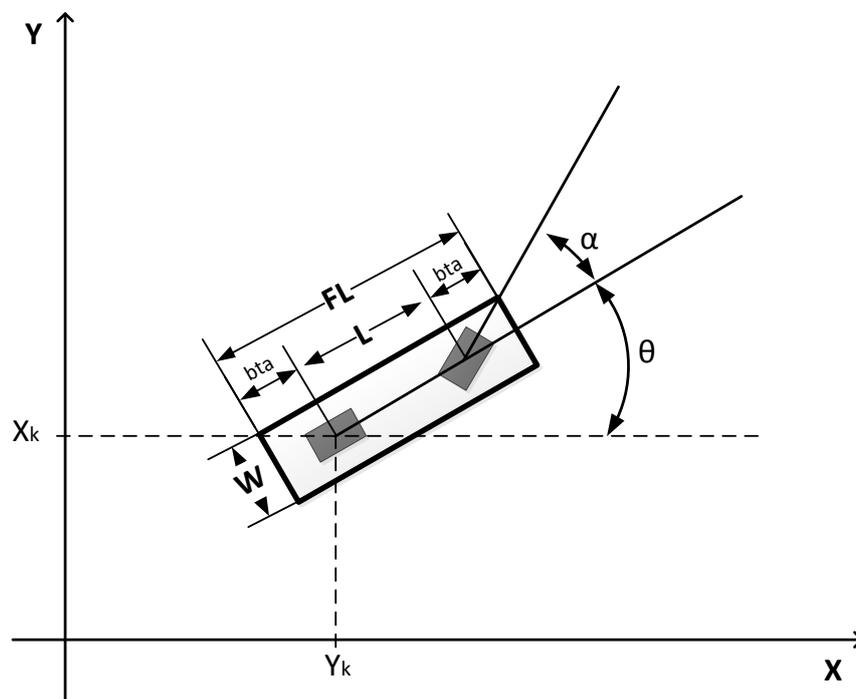


Figura 4 – Geometria do veículo modelizado.

Com o objectivo de simplificar o modelo cinemático de um veículo com condução de Ackerman e de minimizar os custos computacionais, foi usado na modelação dos veículos um modelo cinemático do tipo bicicleta, onde as duas rodas de cada eixo de um veículo com condução de Ackerman são aproximadas por uma única roda.

A pose do veículo no instante  $k$  é descrita por  $[x_k, y_k, \theta_k]^T$ . O controlo é feito em coordenadas cartesianas onde as variáveis de controlo,  $v_c$  e  $w_c$ , representam a velocidade linear e a velocidade angular, respectivamente. As equações ( 3 ) e ( 4 ) expressam a relação entre a pose e as variáveis de controlo (em conformidade com a Figura 4),

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ w_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \Delta t \times v_c \times \cos(\theta) \\ y(k+1) = y(k) + \Delta t \times v_c \times \sin(\theta) \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \Delta t \times v_c \times \frac{\tan(\alpha)}{L} \end{cases} \quad (4)$$

onde  $\Delta t$  representa o intervalo de integração,  $L$  a distância entre eixos e  $\alpha$  é o ângulo de condução em relação ao referencial do robot, dado em função das variáveis de controlo por,

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{L \times \Delta t \times w_c}{\Delta t \times v_c}\right) \quad (5)$$

## Odometria

A pose do veículo pode ser estimada usando odometria, um processo de estimação de pose do tipo *Dead Reckoning* (DR) pois este procedimento estima a posição actual com base na posição anterior e no deslocamento efectuado durante um certo intervalo de tempo. O deslocamento é medido com o uso de *encoders* que são acoplados ao eixo das rodas. Os *encoders* utilizados podem ser de vários tipos (ópticos, magnéticos, indutivos, capacitivos), e podem medir o deslocamento absoluto ou relativo.

Visto que se trata de um método de posicionamento DR este vai apresentar um erro crescente devido ao facto de qualquer pequeno erro de orientação causar um erro de posição crescente. Os erros neste tipo de método de posicionamento estão habitualmente divididos em duas categorias, sistemáticos e não sistemáticos. De seguida são apresentadas na Tabela 1 algumas das causas desses erros.

Tabela 1 – Tipos de erros verificados na odometria e possíveis causas [33].

Erros sistemáticos	Erros não-sistemáticos
Diâmetros das rodas desiguais	Pisos irregulares
Distância entre rodas diferente da nominal	Contacto com objectos inesperados
Resolução finita dos <i>encoders</i>	Deslizamentos

No entanto, os erros sistemáticos podem ser reduzidos de várias formas, por exemplo, os parâmetros utilizados podem ser alvo de processos de calibração ou pode até ser acoplado ao veículo um atrelado com um conjunto de rodas com *encoders*.

A equação ( 6 ) descreve o deslocamento linear da roda  $i$ ,  $\Delta s_i$ ,

$$\Delta s_i = \frac{2\pi \times R_i \times N_i}{N_{rev}} \quad (6)$$

onde  $N_i$  traduz o número de pulsos medidos, enquanto  $N_{rev}$  é o número de pulsos por revolução e  $R_i$  é o raio da roda  $i$ . Os pulsos gerados por amostra são dados por,

$$N_i = \Delta w_i \frac{N_{rev}}{2\pi} \quad (7)$$

onde  $\Delta w_i$  é o deslocamento angular da roda  $i$  e  $N_{rev}$  é o número de pulsos por revolução.

Os erros de odometria não sistemáticos,  $E_{ns}$ , são adicionados na equação ( 7 ) e são definidos por,

$$E_{ns} = N_i \times p \times wgn \quad (8)$$

onde o erro é função de uma determinada percentagem do número de pulsos gerados,  $p$ , que é afectada por ruído branco gaussiano,  $wgn$ .

### 3.5.2. Modelo dinâmico

Este tipo de modelo caracteriza o estado de um ou mais objectos com base num conjunto de eventos ou estímulos, por exemplo, a posição angular de uma roda num dado instante pode ser determinada a partir do binário produzido pelo motor e pela relação da caixa de velocidades, ou seja, este tipo de modelo relaciona o movimento com os estímulos que lhe dão origem.

No intuito de tornar o simulador mais realista, foi usado para a construção de um modelo dinâmico o código da simulação de corridas automóveis TORCS<sup>4</sup>. Esta plataforma foi escolhida devido ao facto de ser *open-source* e de os modelos utilizados para os veículos possuírem o grau de realismo considerado necessário pois este simulador tem em conta aspectos tão diversos, como por exemplo, as características das rodas e pneus (molas, amortecedores, etc.), aspectos aerodinâmicos e consumos de combustível em função do funcionamento do motor (engrenagem, rotações, etc.).

---

<sup>4</sup> TORCS – “The Open Racing Car Simulator” [40]

## 4. Implementação e modelação do simulador

### 4.1. Requisitos e arquitectura do simulador

#### Requisitos:

Para executar o simulador deve existir no computador o seguinte *software*:

- MATLAB
- Satellite Navigation Toolbox 3.0 for MATLAB - GPSoft
- Inertial Navigation System Toolbox 3.0 for MATLAB – GPSoft
- Navigation System Integration and Kalman Filter Toolbox – GPSoft
- Wireless Network Simulator in Matlab
- Microsoft Visual Studio 2010 (Windows)
- GNU GCC – 4.3.4 (Linux)

#### Arquitectura do simulador:

Durante o desenvolvimento foi estabelecido o compromisso de tornar o simulador o mais versátil e rápido quanto possível. Deste modo, a sua arquitectura é baseada em módulos, onde cada módulo é um compartimento fechado, responsável por uma tarefa específica com parâmetros de entrada e saída bem definidos. Esta metodologia foi usada de modo a proporcionar a fácil integração de outros módulos, como por exemplo, os módulos responsáveis pelo GPS, INS e fusão sensorial cuja construção é feita a partir das ferramentas disponibilizadas pelas *toolboxes* acima mencionadas.

No que diz respeito a ambiente de desenvolvimento, após alguns testes efectuados com plataformas tais como Simrobot, Netlogo e Opensteer, a escolha recaiu sobre o *software* Matlab (versão R2010b de 64-bit) devido à enorme capacidade desta ferramenta.

Devido ao facto de serem uma aproximação mais fidedigna à realidade, optou-se pelo desenvolvimento de um simulador do tipo microscópico. O facto deste tipo de simuladores efectuar uma aproximação com um maior nível de detalhe, leva a que o custo computacional seja elevado. Isto fez com que durante o desenvolvimento do simulador, o tempo consumido no processamento fosse uma preocupação constante, levando muitas vezes a que os módulos fossem novamente desenvolvidos (ou desenvolvidos em outras linguagens) utilizando novas metodologias, para que o tempo de processamento permanecesse dentro dos limites do razoável, ver anexo A.

O fluxograma da Figura 5 sintetiza a arquitectura do simulador.

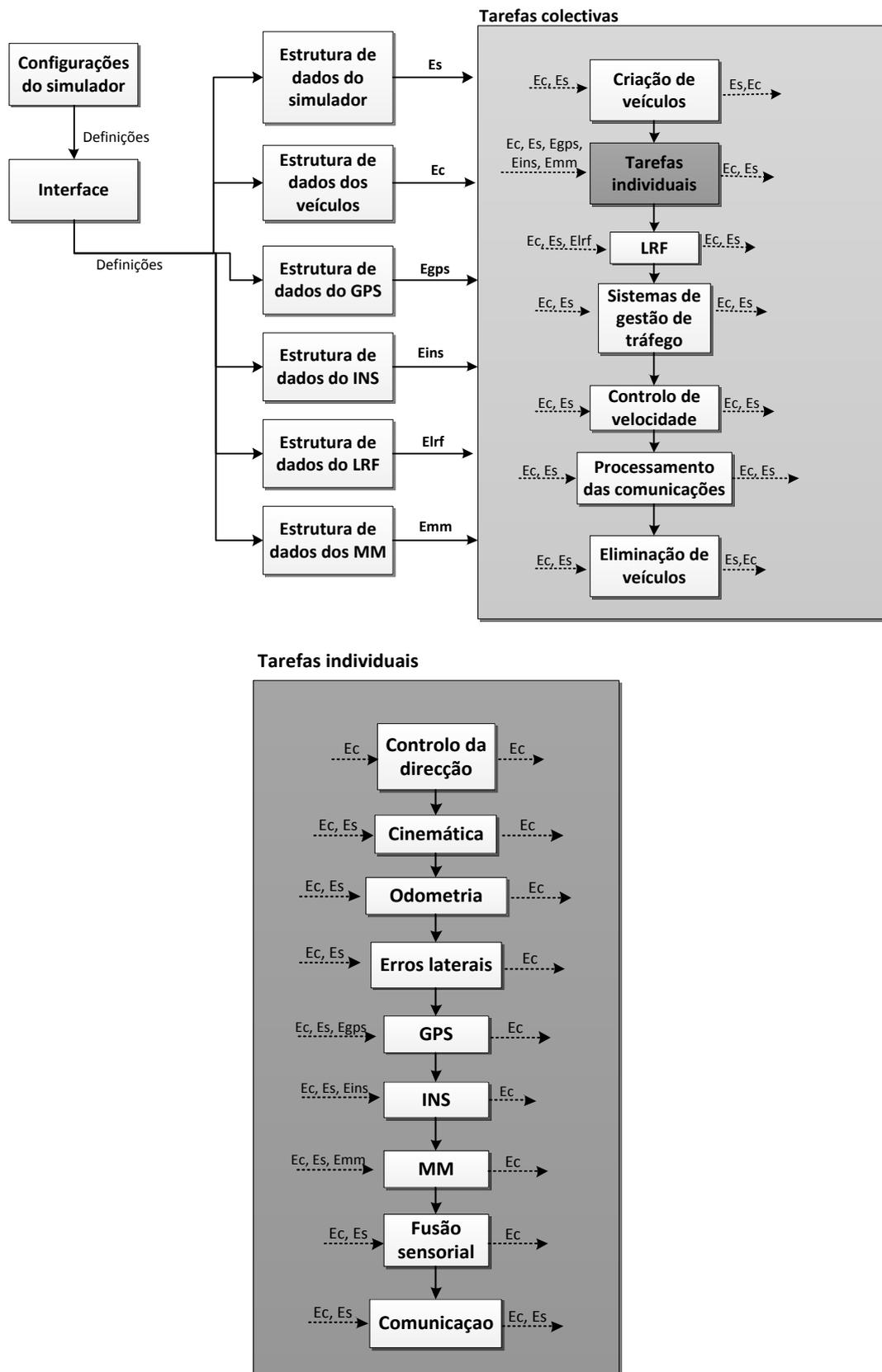


Figura 5 – Fluxograma sintetizado ilustrativo da arquitectura do simulador.

No que diz respeito à metodologia usada para o armazenamento dos dados optou-se pelo uso de um pequeno número de estruturas ( $E_c$ ,  $E_s$ ,  $E_{gps}$ ,  $E_{ins}$ ,  $E_{mm}$ ,  $E_{lrf}$ ) onde estão armazenados os parâmetros relativos às configurações do simulador, dados relativos a cada veículo, parâmetros do GPS, etc. No que diz respeito à estrutura responsável por armazenar os dados relativos a cada veículo ( $E_c$ ), esta é formada por sub-estruturas, onde cada sub-estrutura armazena os dados de um único veículo e todas elas formam uma única lista ligada a partir da qual é feito o acesso para leitura/escrita.

Foram também incluídas no simulador ferramentas que permitem a extração de gráficos e valores de forma automática, possibilitando assim ao utilizador uma rápida análise dos resultados obtidos. Para uma maior comodidade do utilizador, o simulador possui também um *interface* (Anexo E) onde é possível aceder às configurações de maior relevo (sendo que para isso o utilizador deve possuir conhecimento de alguns termos relevantes na área de ITS) para que seja possível de forma expedita ao utilizador alterar parâmetros e executar simulações com diferentes configurações. Outras notas importantes sobre o simulador podem ser encontradas no anexo F.

## 4.2. Cenário da simulação e planeamento de trajectórias

### Cenário da simulação:

Ao construir o cenário da simulação pretendeu-se elaborar um ambiente onde fosse possível testar várias situações passíveis de ocorrer em ambiente urbano. Nesse sentido, a opção recaiu sobre um cenário que contemplasse uma rotunda e um cruzamento. No que diz respeito a dimensões, o cenário utilizado tem 160 metros por 100 metros e seu aspecto pode ser visualizado na Figura 6. As estradas de acesso são constituídas por quatro faixas, duas em cada sentido, em que a circulação se efectua pelo lado direito.

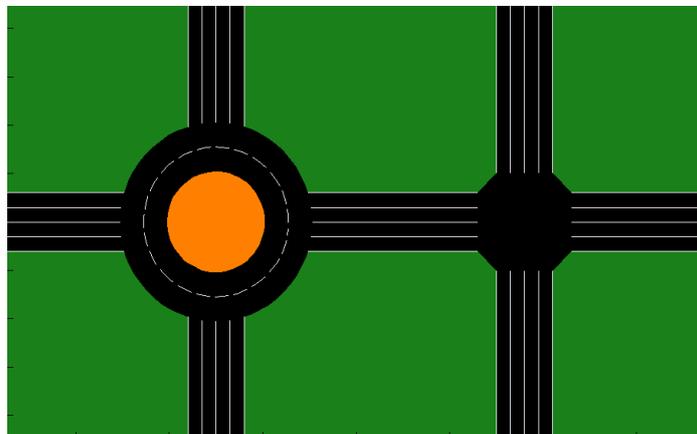


Figura 6 – Cenário do simulador.

O cenário é construído com base na definição de um conjunto de segmentos (Figura 7). A definição dos segmentos contempla diversos parâmetros tais como os pontos iniciais e finais de cada faixa, comprimento, orientação, etc.

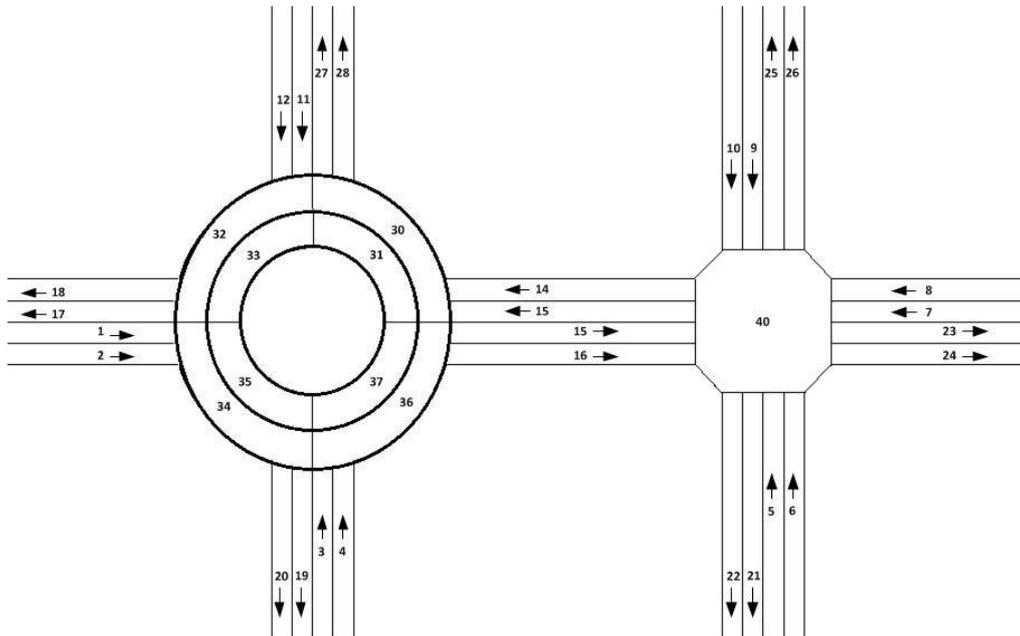


Figura 7 – Segmentos constituintes do cenário do simulador.

### **Planeamento de trajectórias:**

Para seleccionar quais os segmentos que vão definir a trajectória optou-se pela construção de uma tabela de encaminhamento (no anexo B encontram-se mais detalhes sobre a metodologia usada para a construção da tabela de roteamento) para que seja possível expandir o simulador futuramente de forma expedita.

Após a definição da faixa de entrada do veículo e correspondente faixa de saída do simulador, o módulo responsável por gerar a trajectória consulta a tabela de roteamento para definir os segmentos que constituem todo o percurso. Após a definição dos segmentos que constituem a trajectória, são agrupados os *setpoints* de cada segmento, que são gerados automaticamente com base apenas no ponto inicial e final de cada segmento e no número de *setpoints* pretendidos. Uma trajectória definida apenas por estes *setpoints* levou a que o movimento efectuado pelos veículos experimentasse mudanças abruptas de direcção. Para resolver este problema optou-se por suavizar a trajectória com recurso à remoção dos pontos com menor raio de curvatura e com interpolação usando *splines*<sup>5</sup>. As etapas fundamentais deste processo podem ser visualizadas na Figura 8.

<sup>5</sup> Método que consiste na divisão do intervalo de interesse em intervalos menores, que são interpolados, de forma a criar uma curva o mais suave possível em que a função é contínua até à segunda derivada.

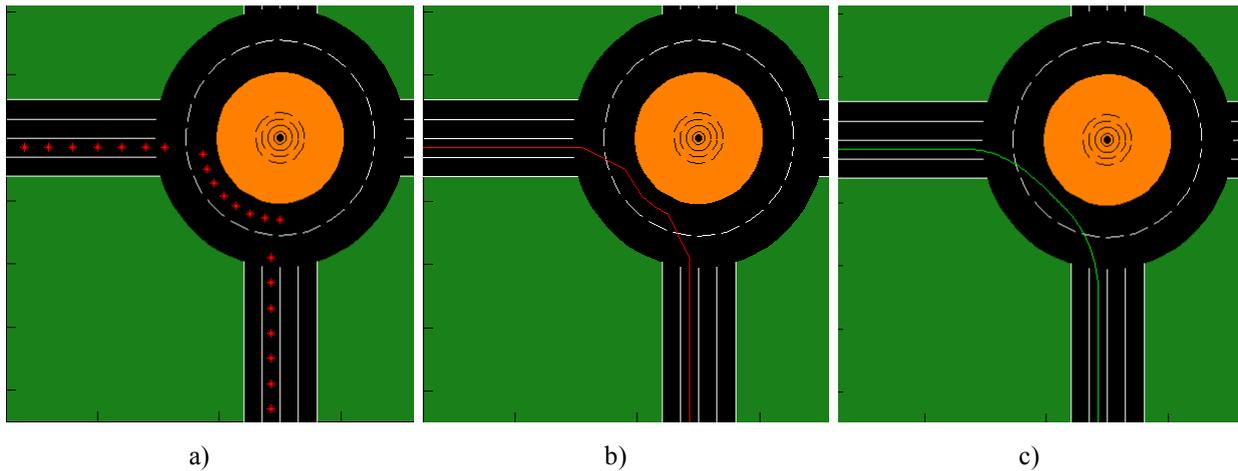


Figura 8 – Etapas da construção da trajectória: a) *Setpoints* dos segmentos 1, 35 e 19; b) Etapa intermédia do processo de suavização; c) Trajectória obtida após o processo de suavização.

### 4.3. Modelação

#### Modelação do tráfego:

O fluxo de tráfego ou volume de tráfego,  $Q$ , pode ser definido por,

$$Q = \frac{n}{T} [\text{veículos/hora}] \quad (9)$$

onde  $n$  representa o número de veículos que atravessa uma dada secção de estrada num dado intervalo de tempo,  $T$  [34].

Já a densidade de tráfego ou concentração,  $K$ , pode ser definida por,

$$K = \frac{n}{X} [\text{veículos/metro}] \quad (10)$$

onde  $n$  representa o número de veículos presentes numa dada secção de comprimento  $X$  [34].

De forma a tornar o simulador o mais versátil possível para que possa ser simulado um conjunto variado de cenários, o tráfego é modelado através de três atributos:

- Fluxo de entrada – Para os segmentos do cenário que correspondem a faixas de entrada (segmentos 1 a 12) pode ser definido um qualquer fluxo de entrada. Se a parte inicial do segmento se encontrar livre, o veículo entra no ambiente da simulação com a velocidade máxima (definida pelo tipo de condutor). No caso do início do segmento se encontrar congestionado, impossibilitando assim a entrada de um novo veículo, os veículos vão-se acumulando numa fila de espera até surgir a oportunidade de entrada no segmento, neste caso o veículo entra no simulador com velocidade nula.

- Desfasamento – Para proporcionar ao simulador um maior realismo, pode ser definido um tempo de desfasamento entre os segmentos de entrada para o lançamento do primeiro veículo. Esta característica foi introduzida no simulador para evitar que os carros provenientes de diferentes segmentos surgissem no simulador em simultâneo caso o fluxo de entrada seja o mesmo para todos os segmentos.
- Probabilidade de destino – A cada veículo lançado no simulador é atribuído previamente um segmento de destino, que em conjunto com o segmento de origem, permite gerar a trajectória completa. A selecção do segmento de destino é realizada através da consulta de uma tabela que especifica a probabilidade de um dado segmento de destino ser seguido por um veículo em função do segmento de entrada.

Por exemplo, a linha correspondente ao segmento de entrada 1, pode ser definida da seguinte forma,

Tabela 2 – Probabilidades de destino.

Entrada	Saída						
	1,...,16	17	18	19	20	...	N
1	-1	$P_{1,17}$	$P_{1,18}$	$P_{1,19}$	$P_{1,20}$	...	$P_{1,N}$
2,...,N	...						

onde é necessário que

$$\sum_{j=1}^N P_{i,j} = 1, \forall i \quad (11)$$

onde  $P_{i,j}$  representa a probabilidade de um veículo com origem no segmento  $i$  ter como destino o segmento  $j$ . Os espaços da tabela preenchidos com o elemento -1 reflectem a impossibilidade do destino ser seleccionado.

Ao seguir esta metodologia para a atribuição de um destino, o simulador fica dotado de uma enorme versatilidade para que possam ser simuladas diversas situações. Com a simples alteração da tabela de probabilidades de destino podem ser estudados os efeitos de todos os veículos seguirem para o mesmo destino ou até mesmo impedir que um determinado segmento possa ser usado como saída do simulador para verificar o impacto de obras de conservação rodoviária nesse segmento.

### **Modelação dos condutores:**

O comportamento individual dos condutores é um dos aspectos que afecta a circulação rodoviária. Deste modo, foram especificadas diferentes velocidades máximas em função do tipo de condutor. As velocidades adoptadas foram 30 Km/h, 40 Km/h e 50 Km/h para os condutores do tipo I, II e III, respectivamente. Foram ainda considerados os parâmetros referentes à aceleração e travagem, fixando um limite para o incremento/decremento da velocidade em função do comando gerado pelo controlo em velocidade, por omissão os valores definidos são de 5 m/s para o incremento e -10 m/s para o decremento, mas estes parâmetros podem ser alterados através do ficheiro de configurações gerais do simulador assim como as velocidades máximas de cada tipo de condutor.

Para uma mais fácil visualização do tipo de condutores presentes no ambiente da simulação foi atribuída uma cor diferente aos veículos conforme o seu tipo de condutor, sendo as cores utilizadas o verde, amarelo e vermelho, para condutores do tipo I, tipo II e tipo III, respectivamente.

### **Modelação dos veículos:**

Uma vez que o tráfego que circula nas estradas não é homogéneo no que diz respeito ao tipo de veículos utilizados torna-se importante ter esta variável em consideração. Com o objectivo de simular a diversidade de veículos presente nas estradas foram criados dois modelos de veículos, ligeiro e pesado.

Na Tabela 3 estão listadas as dimensões dos modelos utilizados em conformidade com a Figura 4. De notar que os parâmetros FL (*Full Length*) e W (*Width*) podem ser alterados através do ficheiro de configurações gerais do simulador (“*isr\_tfs\_confisim*”).

Tabela 3 – Dimensões dos veículos.

Tipo de Veículo		Ligeiro	Pesado
Dimensões (metros)	Full-length (FL)	1,5	3
	Width (W)	1	2
	Bumper-to-axis (bta)	0,4	

## 4.4. Controlo do veículo

### Condução:

Para efectuar o controlo do veículo em orientação (condução) adoptou-se uma solução desenvolvida por Vikram Mutneja [35]. Trata-se de um sistema que usa lógica difusa para o controlo da direcção. Esta solução foi usada no simulador sem que tenha sido alvo de estudo e apenas foi adoptada após ter sido testada e ter apresentado resultados satisfatórios. Este módulo recebe apenas dois parâmetros de entrada, o erro angular e uma distância, que reflectem o erro entre a pose do veículo e a trajectória seguida, devolvendo um comando de direcção. A direcção foi ainda limitada num ângulo máximo de viragem de  $30^\circ$  e a uma taxa de viragem máxima de  $180^\circ/s$  com o objectivo de integrar algumas restrições para uma maior aproximação à realidade. De notar que os valores definidos podem ser alterados através do ficheiro de configurações.

### Controlo em velocidade:

Para obter um controlo em velocidade o mais realista possível, a velocidade seguida pelo condutor é inferida por um processo de análise do ambiente que rodeia o veículo.

Na primeira etapa deste processo são identificados os veículos que estão nas proximidades do veículo cuja velocidade se pretende controlar, através da análise de uma grelha de ocupação. Esta zona pode ser de três tipos diferentes: elipsoidal, circular ou rectangular (com tamanhos configuráveis).

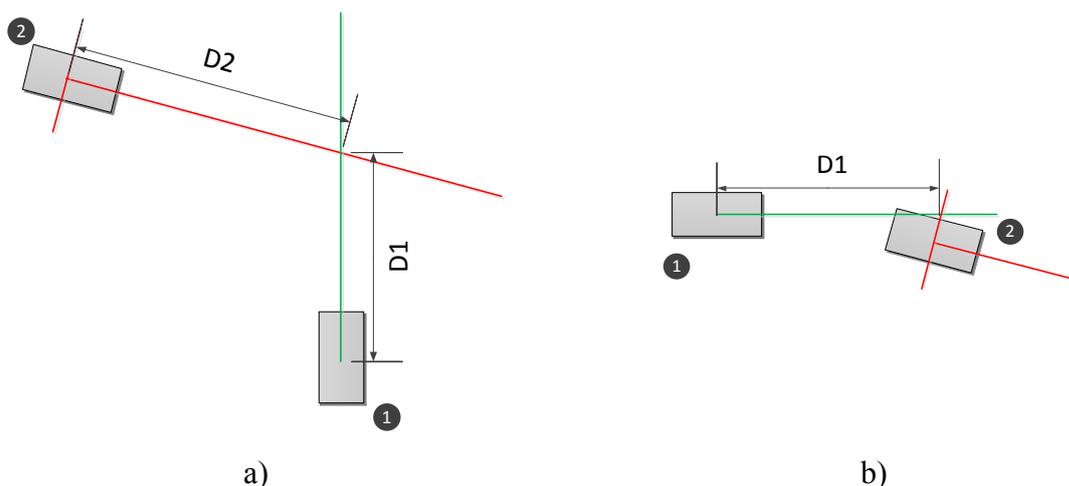


Figura 9 - Mecanismo de verificação de colisão: a) Situação I; b) Situação II.

Na segunda etapa deste processo, o movimento do veículo é intersectado com o movimento dos veículos detectados na vizinhança com o propósito de verificar a existência de perigo de colisão. Na Figura 9 estão apresentados dois exemplos do funcionamento do mecanismo de detecção de colisão, em que o veículo cuja velocidade se pretende controlar é identificado com o número 1 e o veículo detectado nas proximidades é identificado com o número 2. Este mecanismo funciona de forma simples pois inicialmente é detectado o ponto de intersecção entre os segmentos de recta, coincidentes com orientação de cada veículo e será usado um terceiro segmento de recta, perpendicular à orientação do veículo detectado, caso não seja verificada intersecção entre os segmentos de recta usados inicialmente. De seguida são calculadas as distâncias ao ponto de intersecção,  $D1$  e  $D2$  e esta informação é cruzada com a velocidade de cada veículo, o que permite obter um tempo de chegada ao ponto de intersecção. Se a diferença entre os dois tempos obtidos estiver abaixo de um dado limiar é considerado que existe perigo de colisão e um dos carros vai ter que diminuir a sua velocidade. Esta decisão é tomada com base numa série de parâmetros, como por exemplo, o segmento do cenário em que o veículo se encontra. Desta forma é possível simular o comportamento dos condutores de forma a que estes evitem a colisão com o carro que segue à sua frente ou até fazer com que estes respeitem a regra que concede prioridade a quem já circula dentro da rotunda.

#### **4.5. Sistema de navegação por satélite**

Para integrar no simulador toda a temática associada a um sistema de navegação por satélite foi usada uma *toolbox* para MATLAB (Satellite Navigation Toolbox 3.0) que permite dotar o simulador de muitos dos aspectos essenciais ao GPS. A *toolbox* considera aspectos tão diversos como a influência dos erros devido a ruído térmico, os atrasos causados pela ionosfera e troposfera e erros devido ao facto do sinal sofrer reflexões antes de atingir a antena receptora, também conhecidos como erros devido a *multipath*. A inclusão destes erros no simulador permite obter um maior realismo na simulação do GPS. Com a utilização da *toolbox* é ainda possível obter uma estimativa para a localização dos veículos usando diferentes metodologias, tais como, *pseudorange*, RTK-GPS e DGPS. Estes dois últimos modos requerem a existência de uma estação fixa (de localização conhecida) de forma a minimizar os erros através de uma técnica denominada *double-differencing* que consiste no cancelamento dos erros através do processamento das observações realizadas por dois receptores sobre o mesmo conjunto de satélites [36].

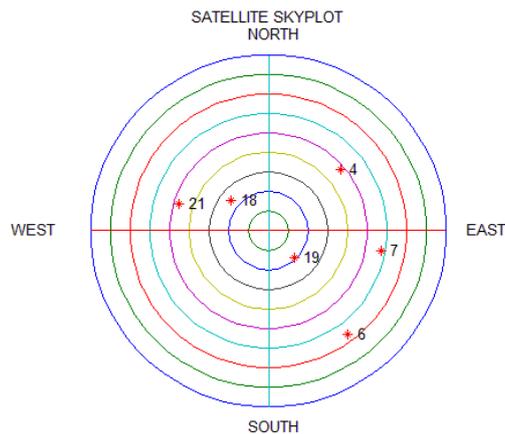


Figura 10 – Satélites visíveis num dado instante para a posição  $x \approx 4,8344 \times 10^6$ ,  $y \approx -0,7001 \times 10^6$  e  $z \approx 4,0874 \times 10^6$

O aspecto relativo à comunicação entre os receptores não é tido em linha de conta pela *toolbox* utilizada, uma vez que esta assume que existe sempre comunicação entre ambos os receptores. Para proporcionar um maior realismo ao simulador, os aspectos relativos às comunicações foram contemplados e o assunto é discutido na secção 4.10 deste documento.

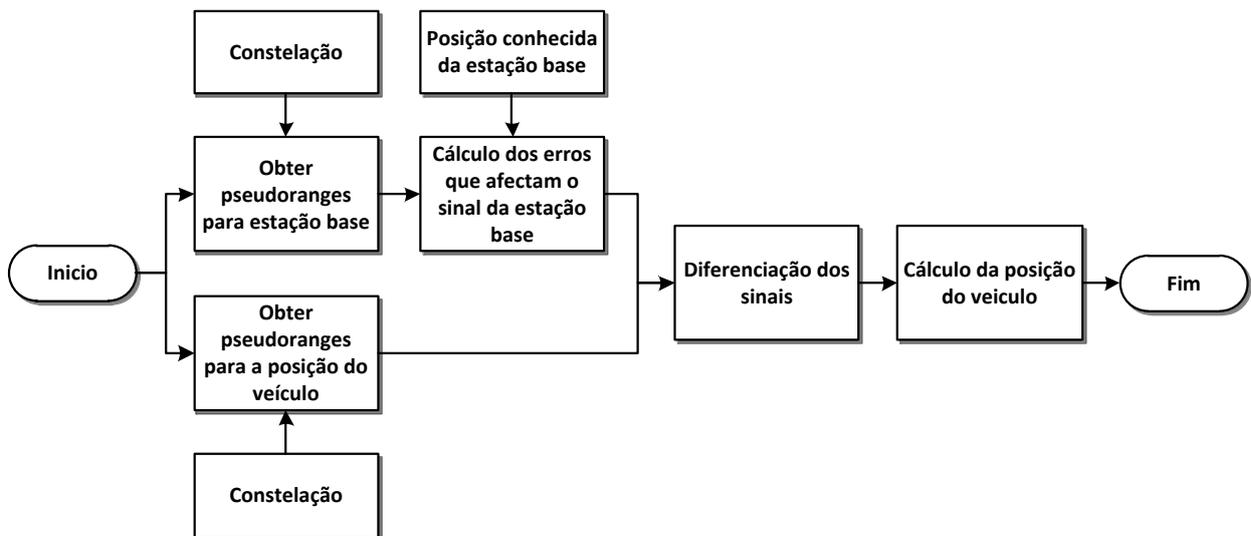


Figura 11 – Procedimento executado pelo módulo GPS (DGPS).

A Figura 11 mostra com maior detalhe o funcionamento do módulo responsável pela simulação do GPS (Figura 5) em modo DGPS. Para uma maior simplicidade, não são consideradas na figura 11 as transformações de coordenadas necessárias entre o referencial local do simulador e o geóide WSG-84, assim como o suporte de comunicação necessário para a troca de dados entre a infra-estrutura e o veículo.

## 4.6. Sistema de navegação inercial

Para uma melhor compreensão do funcionamento de um sistema de navegação inercial é necessário contextualizar alguns dos tipos de referenciais existentes. Segue a descrição de cada um deles de acordo com a nomenclatura usada pela *toolbox* Inertial Navigation System Toolbox 3.0.

Referencial Terrestre – Este referencial é centrado e fixo no planeta Terra. Os eixos têm origem no centro do planeta e o eixo do x cruza a intersecção do meridiano primário (meridiano de Greenwich) com o equador, o eixo do z aponta na direcção do pólo norte e o eixo do y completa o referencial segundo a regra da mão direita.

Referencial de navegação – Trata-se de um referencial usado como solução para referenciar o corpo em relação às direcções Norte, Este e vertical local. O centro do referencial viaja com a plataforma, o eixo do x está direccionado para norte, o eixo do z para o centro do elipsóide e o eixo do y completa o referencial apontando para Este. Devido a este sistema de eixos o referencial é também designado por NED (*North-East-Down*).

Referencial Local – Um referencial local ou referencial do plano tangente é um referencial cujo plano formado pelo eixo do x e pelo eixo do y é tangente à superfície do elipsóide de referência no ponto (0,0,0). Os eixos deste referencial são organizados de tal forma que o eixo do x seja orientado para Este, o eixo do y seja orientado segundo o norte e o eixo do z tenha uma direcção oposta ao centro do elipsóide, este referencial é também designado por ENU (*East-North-Up*).

Referencial do corpo – Este referencial é centrado e fixo no veículo. O que significa que o referencial segue a atitude<sup>6</sup> do veículo. O eixo do x tem a mesma direcção da frente do veículo, o eixo do y aponta para o lado direito e o eixo do z está direccionado para a superfície onde circula o veículo. As rotações destes eixos são designadas por ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw*, respectivamente.

Referencial inercial – É geralmente um referencial com a sua origem coincidente com o centro da Terra onde o seu eixo do z intersecta o pólo norte, o eixo do x aponta para o Sol e o eixo do y completa o referencial formando o plano equatorial.

Este tipo de referenciais podem ser simplesmente definidos como referenciais onde é válida a primeira lei de Newton, também conhecida como princípio da inércia, que afirma que um corpo tende a manter o seu movimento se sobre ele não actuarem quaisquer forças.

---

<sup>6</sup> Posição de um corpo que é determinada pela inclinação dos seus eixos relativamente a um sistema de referência.

A noção do que constitui ou não um referencial inercial é particularmente importante, imagine-se por exemplo um condutor que tende a ir de encontro ao volante quando efectua uma travagem brusca. Se a localização do condutor for obtida usando um referencial que se desloca com o veículo, o referencial usado é considerado não inercial, pois o movimento do condutor de encontro ao volante não tem uma causa aparente. Se a posição do condutor for descrita por uma pessoa que se encontre sentada num banco de jardim a observar a travagem, então já é usado um referencial inercial pois para a pessoa que visualiza o condutor a ir de encontro ao volante a causa do movimento é descrita pelo princípio da inércia.

Para simular um INS foi usada a *toolbox* Inertial Navigation System Toolbox 3.0, concebida para gerar uma estimativa para a pose do veículo através das medidas efectuadas pelos acelerómetros e pelos giroscópios para uma trajectória pré-definida, como tal, os algoritmos implementados por esta *toolbox* foram alvo de modificação por forma a tornar o seu uso no simulador possível, apesar da parte respectiva ao processamento das medidas efectuadas não ter sido alvo de qualquer modificação.

A metodologia usada pela *toolbox* para obter uma posição através de um sistema inercial é descrita de maneira condensada na Figura 12.

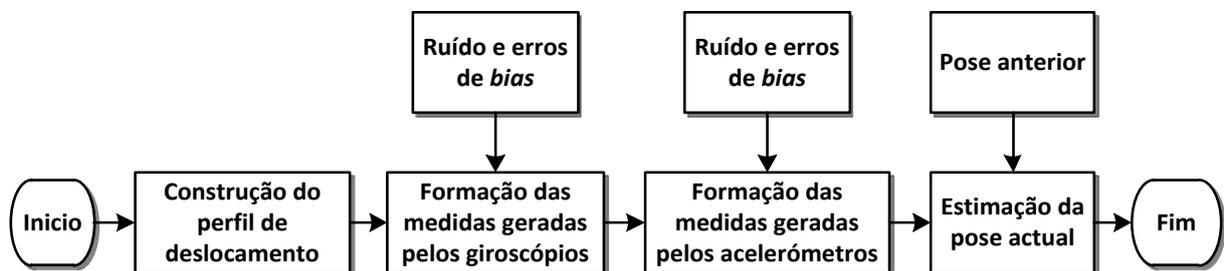


Figura 12 – Procedimento executado pelo módulo INS.

De notar que durante o processo o ruído e os erros de *bias* adicionados às medidas efectuadas pelos giroscópios e acelerómetros podem ser ajustados pelo utilizador a partir do *interface* do simulador.

## 4.7. Marcadores magnéticos

Foi incorporado no simulador um módulo que simula a existência de MM no cenário para que estes possam ser usados para efectuar correcções no posicionamento obtido através de outros métodos. Para que estes MM sejam detectados é necessário simular a existência de uma régua de sensores magnéticos acoplada ao veículo. Optou-se então por posicionar a régua na frente do veículo conforme demonstrado na Figura 13.

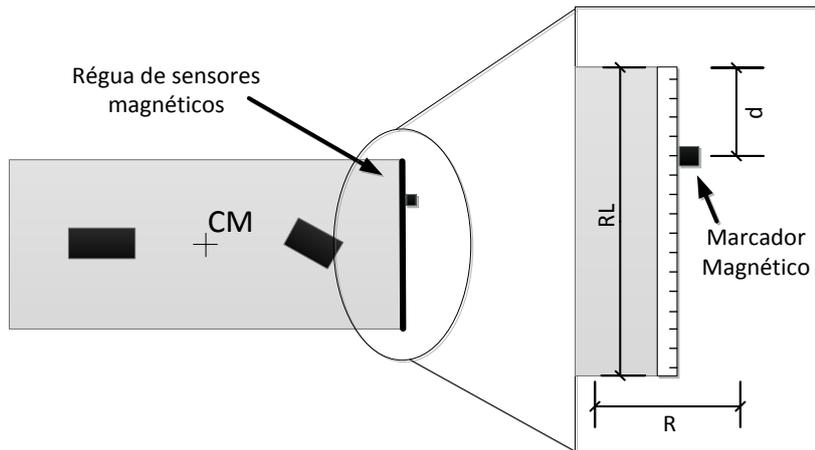


Figura 13 – Posicionamento no veículo da régua de sensores magnéticos.

Na Figura 13, além da localização da régua de sensores magnéticos, é também exemplificada uma situação em que um MM é detectado pela régua (de comprimento  $RL$ ) a uma distância  $d$  do início da régua. Devido ao facto do simulador desenvolvido fundamentar a sua operação no processamento de eventos discretos, é necessário considerar um limiar de detecção,  $R$ , dentro do qual se considera que o MM foi detectado.

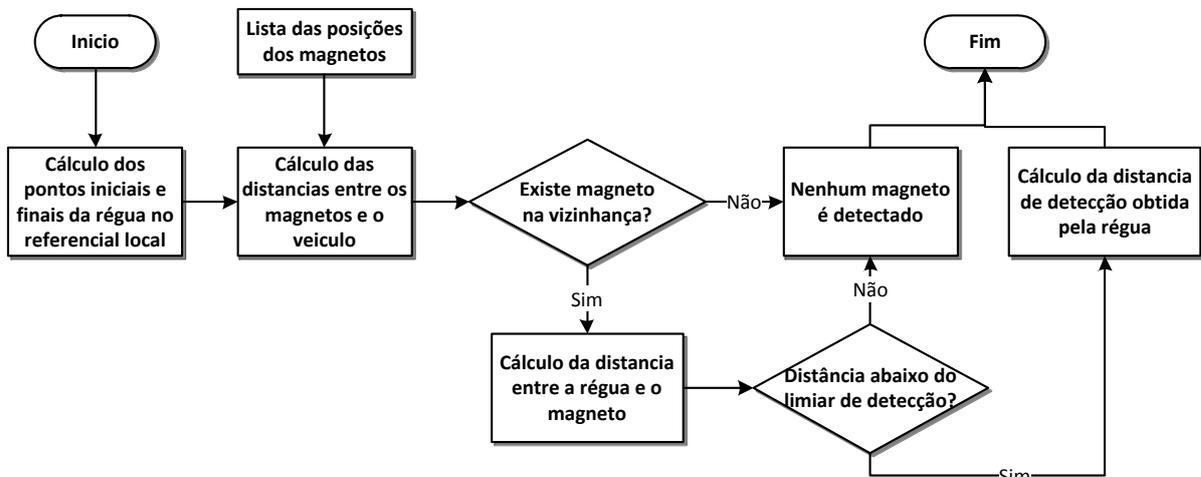


Figura 14 – Procedimento executado pelo módulo MM.

Na Figura 14 estão ilustradas, sobre a forma de diagrama, as principais etapas do funcionamento do módulo de detecção de MM (Figura 5) que permite a obtenção da distância  $d$ , que é usada posteriormente para o cálculo da posição do centro de massa, CM. Numa primeira fase o módulo requer a existência de uma lista com a posição no referencial local dos MM. Para uma maior comodidade do utilizador este não precisa construir a lista manualmente pois esta é gerada automaticamente, em função do número de MM definidos para cada segmento (apenas disponível nos segmentos 1 a 28). Uma vez definido o número de MM, o simulador gera a localização dos MM de maneira a que estes tenham igual espaçamento entre si. As suas coordenadas são então armazenadas numa lista para que possam ser consultadas quando assim for necessário. Outro aspecto importante é o facto do módulo devolver apenas a distância do magneto na régua, o processamento desta medida é realizado numa fase posterior de forma a obter as coordenadas do centro de massa do veículo através das coordenadas do magneto e da orientação do segmento da trajectória.

#### **4.8. Medidor de distâncias laser**

Para simular um medidor de distâncias laser foi desenvolvido um módulo em que a metodologia aplicada consistiu na utilização de uma grelha de ocupação onde cada célula representa uma área de pequenas dimensões que pode ser considerada ocupada ou desocupada em função da presença de um veículo naquela zona. A grelha é depois utilizada com o objectivo de simular as medições efectuadas pelos LRF's acoplados aos veículos.

Devido às dimensões do mapa (160x100 metros) a realização desta tarefa em MATLAB revelou-se extremamente ineficiente, pois para uma resolução centimétrica a matriz necessária para representar o mapa teria um tamanho de aproximadamente 1220 MB (cada elemento da matriz ocupa 8 bytes). Outro aspecto importante foi o facto de todo o processo ser demorado devido à enorme quantidade de dados analisados. Para resolver este problema foi necessário desenvolver um novo módulo, inteiramente em linguagem C, onde foram introduzidas várias alterações relativamente ao processo desenvolvido em MATLAB. No novo módulo foi utilizado um mapa em que cada célula seria representada por um bit em vez de 8 bytes (diminuindo assim significativamente o tamanho de dados a manipular) e para simular os raios emitidos por um LRF passou a ser utilizado o algoritmo de Bresenham (para o “desenho” de linhas). Estas alterações permitiram alcançar um desempenho superior ao conseguido com o MATLAB.

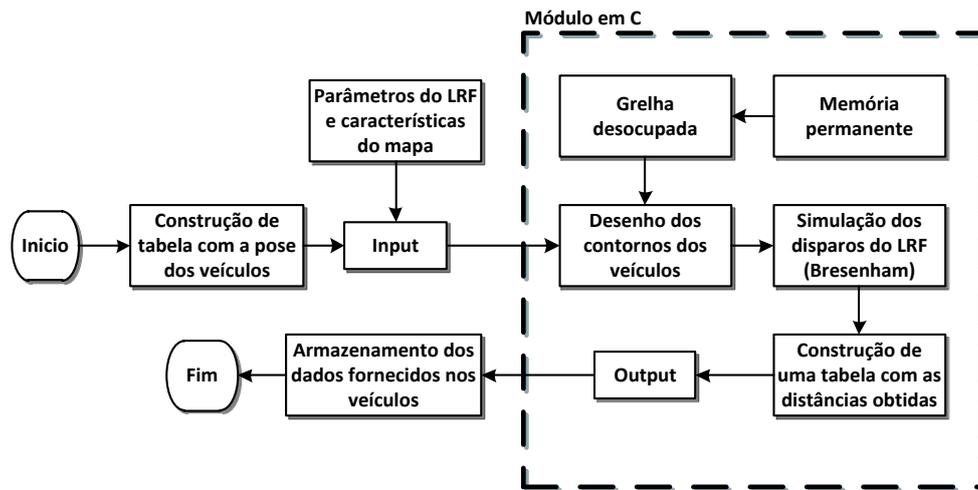


Figura 15 – Procedimento usado para simulação de um LRF.

Na Figura 15 encontra-se descrito de forma resumida o módulo LRF (Figura 5). Importa salientar que as linhas que simulam as emissões de um LRF (representadas pelas células ocupadas a cinzento claro da Figura 16) não são desenhadas no mapa, ao contrário dos contornos dos veículos (representados na Figura 16 pelas células ocupadas num tom mais escuro). A partir do *interface* é possível configurar a resolução da grelha utilizada assim como o número de raios emitidos, o alcance de cada emissão e a abertura entre os raios emitidos. No anexo G é possível visualizar um pequeno teste do módulo LRF.

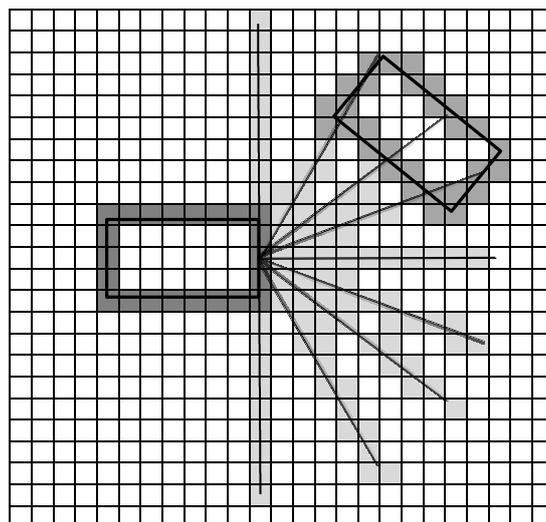


Figura 16 – Representação simplificada de uma parte da grelha de ocupação usada na simulação de um LRF que emite 9 raios laser com um ângulo de abertura de 180°.

## 4.9. Sistemas de gestão de tráfego automóvel descentralizados

### 4.9.1. Circulação automóvel sem sistemas de gestão

Antes de uma explicação mais detalhada sobre os sistemas de gestão implementados é necessário apresentar a forma em que o tráfego opera nas duas situações integradas no simulador (rotunda e cruzamento) sem acção dos sistemas de gestão.

No que diz respeito à rotunda, o trânsito faz-se por forma a dar a esquerda à parte central da mesma, pelo que o trânsito se efectua no sentido giratório anti-horário, em conformidade com o artigo 16º do código da estrada [37]. Os veículos que se aproximam da rotunda devem ceder passagem a quem nela circula de acordo com o artigo 31º do código da estrada [37] que regulamenta as cedências de passagem.

O cruzamento integrado no simulador foi sinalizado como facilmente congestionável através da delimitação do mesmo por linhas contínuas de cor amarela. Esta sinalização implica a proibição de entrar na área demarcada se for previsível que a intensidade do trânsito obrigue à imobilização do veículo dentro daquela área, mesmo a sinalização luminosa autorize a avançar. Foi ainda considerado que os condutores não entram no cruzamento se existir um veículo dentro da zona delimitada cujo acesso ao cruzamento se efectuou pela mesma via em que o veículo se encontra em espera. Este 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 direcção a cada ciclo. A Figura 17 mostra o cruzamento implementado no simulador, onde existem dois segmentos adjacentes que permitem a passagem dos condutores estando a passagem interdita nos restantes segmentos.

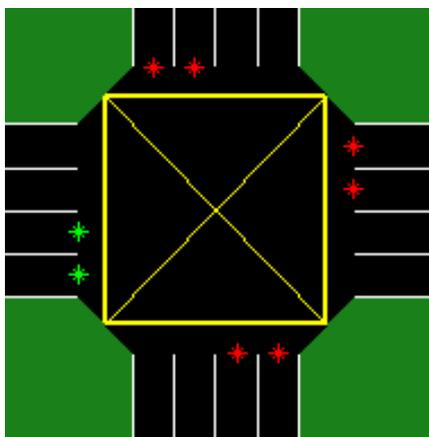


Figura 17 – Cruzamento implementado no simulador.

#### 4.9.2. Rotunda com sistema de gestão

O sistema de gestão desenvolvido teve como objectivo otimizar a circulação dentro da rotunda e minimizar o tempo que os condutores demoram a efectuar o trajecto na zona circundante. Para o efeito é realizada uma alocação de espaço quando um veículo notifica o sistema da sua presença que é depois libertado quando o veículo abandona a zona. A reserva de espaço sem que a variável tempo seja considerada é impraticável, pois o tempo que um veículo demora a circular em torno da rotunda é significativo, nomeadamente se um condutor tiver como destino a terceira ou quarta saída. Para fazer face a este problema, optou-se pela utilização de uma grelha de ocupação onde é adicionada uma outra dimensão por forma a alocação ser realizada no tempo e no espaço, Figura 19.

Na Figura 18 são representadas as principais etapas do processo de gestão, para um qualquer veículo que se aproxime da rotunda.

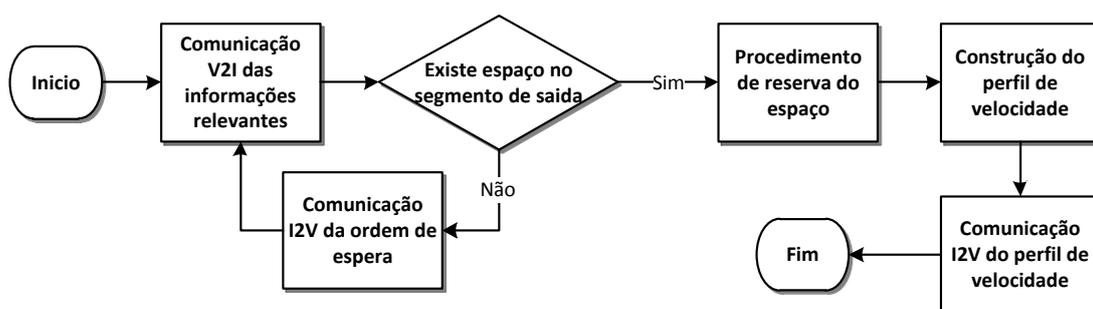


Figura 18 – Etapas do processo de gestão de tráfego na rotunda.

Este procedimento pode ser dividido em quatro etapas distintas:

1. Numa fase inicial o veículo tenta comunicar com o sistema de gestão da rotunda até que este se encontre ao seu alcance. Uma vez estabelecida a comunicação o veículo envia um conjunto de dados. No conjunto de dados enviados é imperativo que estejam contidas informações relativas à posição do veículo (a informação pode ser proveniente de GPS, INS, odometria, etc.), qual o tipo de veículo (pesado ou ligeiro) e qual o segmento de entrada e de saída da rotunda que o condutor pretende utilizar.
2. Na etapa seguinte o sistema de gestão processa as informações recebidas e verifica se o segmento seguido pelo condutor logo após a saída da rotunda está livre de maneira a que seja possível o veículo sair da rotunda. Se o segmento não se encontrar livre o condutor é avisado de que deve esperar, evitando assim um possível congestionamento que se verificaria se o condutor fosse forçado a parar enquanto circulava dentro da rotunda. Os aspectos relativos à verificação acima referida não foram simulados mas foi presumido

que existiriam um conjunto de sensores que teriam a capacidade de detectar a passagem de veículos nos segmentos imediatamente após a saída da rotunda. Se o segmento de saída seguido pelo condutor se encontrar livre o processo avança para a etapa seguinte.

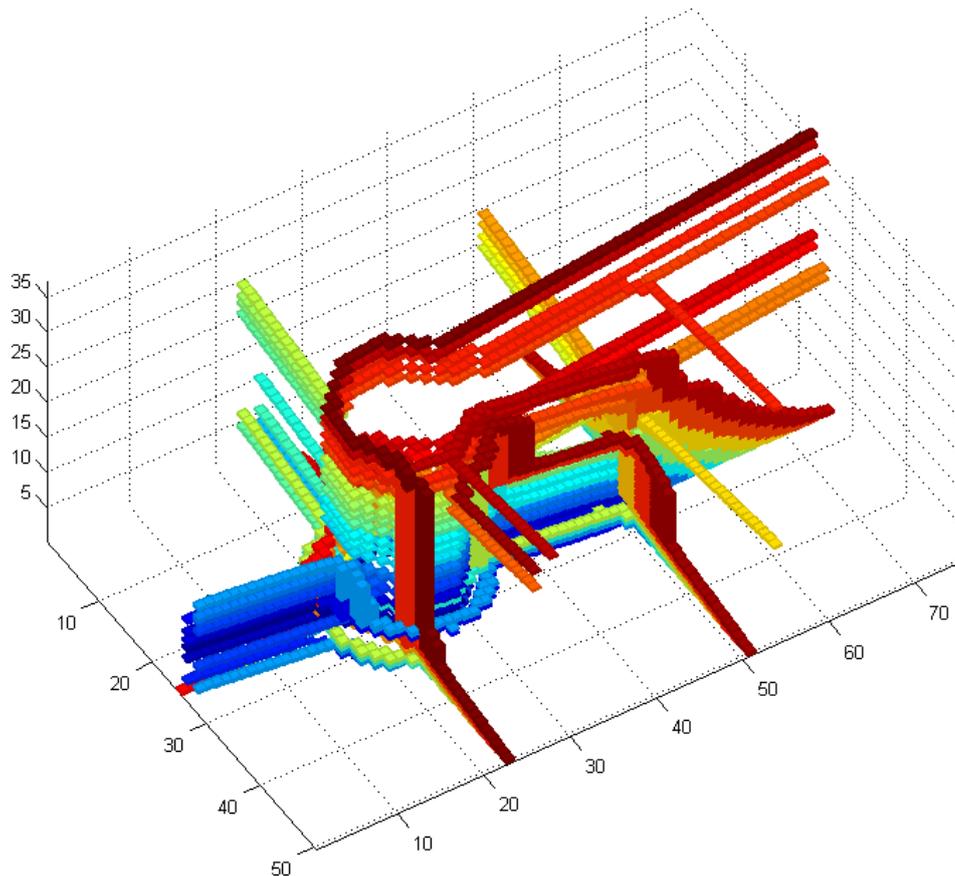


Figura 19 – Exemplo da matriz tridimensional usada pelo sistema de gestão para reserva de espaço.

3. Após as informações serem recebidas, o sistema de gestão inicia o processo de reserva de espaço replicando a trajetória seguida pelo veículo com base nas informações fornecidas por este. De seguida a trajetória é truncada entre o ponto mais próximo da localização estimada do veículo e o ponto imediatamente seguinte à circulação na rotunda de forma a obter o percurso para o qual vai ser reservado espaço. O espaço é então reservado no mapa tridimensional já referido, mas devido ao facto de os condutores poderem não efectuar o percurso a uma velocidade constante e para garantir que não existem colisões, ao espaço do veículo é acrescentado uma margem de segurança (Figura 20). Devido à diversidade de tipos de condutores optou-se por estabelecer como velocidade máxima dentro da rotunda a menor das velocidades máximas dos três tipos de condutores existentes.

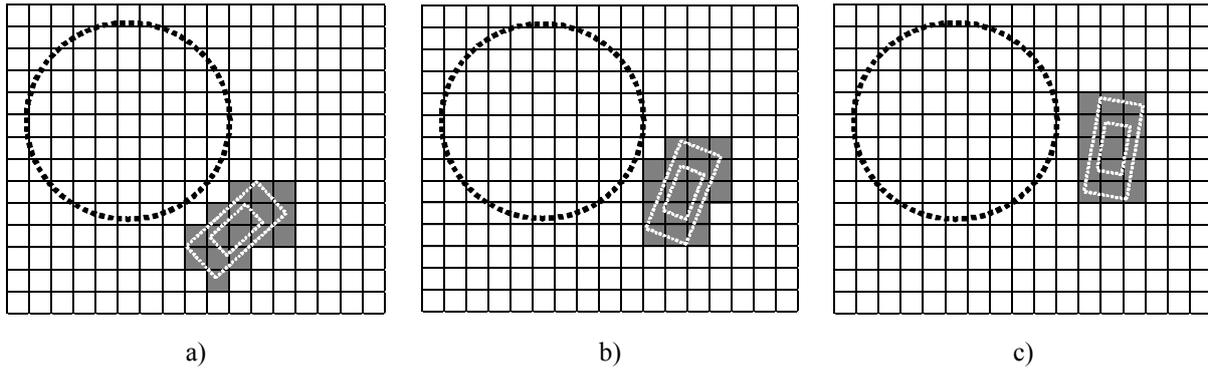


Figura 20 – Exemplo das grelhas de ocupação: a) Instante  $t=a$ ; b) Instante  $t=a+T$ ; c) Instante  $t=a+2T$ .

Na Figura 20 está representado um exemplo onde é possível visualizar mecanismo de reserva de espaço. O exemplo mostra as células ocupadas (em cor cinza) para a localização prevista do veículo (com margens de segurança) em três instantes diferentes. Se durante o procedimento de reserva de espaço existir algum conflito entre o espaço que o algoritmo tenta reservar e o espaço já reservado, o algoritmo verifica qual o instante a partir do qual o espaço fica livre e o perfil de velocidade é manipulado para que o veículo apenas alcance o espaço (ocupado) após o instante determinado.

4. O perfil de velocidade usado na execução da reserva de espaço que indica ao condutor a velocidade que este deve seguir num dado instante é então enviado ao veículo através de comunicação V2I. O condutor passa então a seguir o perfil de velocidade gerado para o seu veículo.

### 4.9.3. Gestão do cruzamento

Embora existam muitos estudos onde o foco incide sobre a optimização do tempo que coordena a alteração dos sinais luminosos [13] [14] [15] [16] [17], neste trabalho optou-se por realizar uma abordagem diferente a todo o problema, tendo em consideração o trajecto particular de cada condutor. Deste modo idealizou-se que acoplado ao sistema de sinalização luminosa estaria acoplado um sistema de detecção, baseado num conjunto de câmaras capazes de identificar, automaticamente e em tempo útil, qual a direcção que o condutor pretende seguir ao aproximar-se da intersecção através da detecção das luzes de mudança de direcção. Foi assumido que o sistema de detecção cumpre sempre o seu objectivo e que os condutores accionam sempre as luzes de mudança de direcção, caso pretendam mudar de direcção. O sistema de gestão implementado baseia o seu funcionamento na utilização de uma grelha de ocupação, aplicada à zona do cruzamento, em que o espaço é reservado sempre que é dada autorização a um veículo para avançar.

#### Exemplo do funcionamento do sistema de gestão do cruzamento

Na Figura 21 é possível analisar uma situação em que o trânsito sofre acção do sistema de gestão. Como é possível visualizar em a), foi concedida passagem aos veículos vindos de Este (trajectórias a branco e azul) e ao verde (trajectória a vermelho) vindo de Sul. A passagem apenas é concedida a estes veículos pois o espaço que estes vão ocupar no cruzamento não se sobrepõe, espaço simbolizado pelas células de cor branca, azul e vermelha em b) da Figura 21.

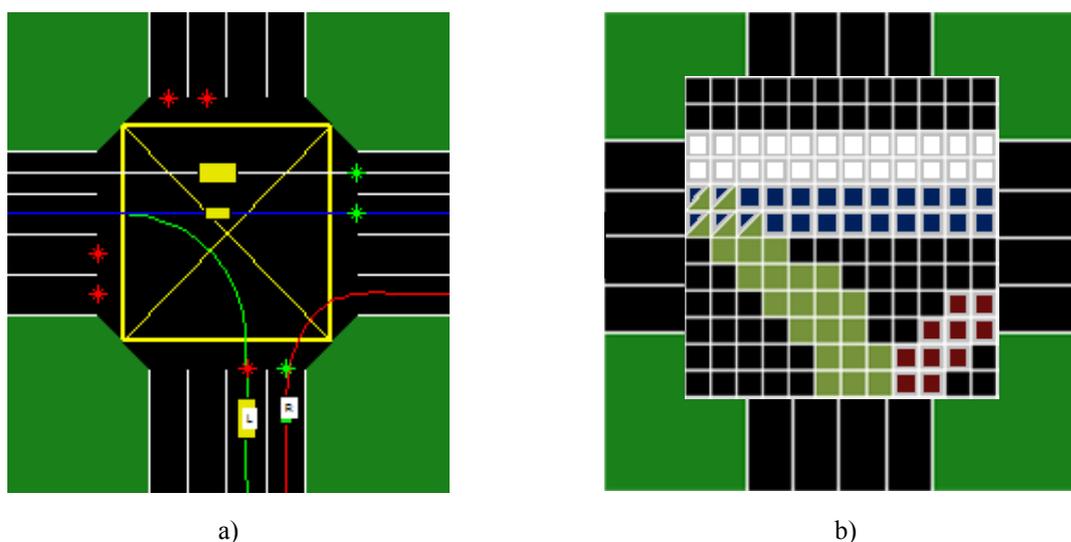


Figura 21 – Exemplo de uma situação de gestão no cruzamento: a) Situação simulada com desenho de trajectórias; b) Exemplo da grelha de ocupação para a situação simulada.

Quando um quarto veículo se aproxima (veículo vindo de sul com trajectória marcada a verde), o sistema de detecção verifica que este pretende ir para Oeste (devido à luz de mudança de direcção para o lado esquerdo se encontrar ligada, facto simbolizado pela letra L sobre o veículo). O sistema de gestão ao verificar a grelha de ocupação detecta um conflito, pois o espaço alocado pela passagem deste veículo, células de cor verde em b), entra em conflito com o espaço ocupado pelos veículos a que já foi concedida passagem, nomeadamente com espaço ocupado pelo veículo com a trajectória marcada a azul. Assim sendo, não é concedida passagem ao veículo que se aproxima e o sinal luminoso permanece vermelho. O sinal luminoso apenas irá comutar o seu estado quando o veículo com o qual a sua trajectória entra em conflito (veículo com trajectória marcada a azul) abandonar a zona de intervenção do sistema de gestão.

#### **4.10. Sistema de comunicação**

Para que seja possível o veículo usar os métodos de posicionamento DGPS e RTK-GPS e para que o sistema de gestão da rotunda possa ser implementado é necessário existir um sistema de comunicação que possibilite a comunicação V2I. Foi então incluído no simulador um módulo responsável por simular os aspectos relativos à comunicação (força do sinal, interacção com outros sinais, tamanho máximo dos pacotes, etc.).

No entanto, o módulo integrado no simulador, devido à sua complexidade e realismo, apresentava um grande custo computacional quando comparado com os restantes módulos do simulador. Para contornar este problema foi desenvolvido um segundo módulo de comunicação onde a comunicação é sempre realizada logo após o processamento dos pedidos de comunicação, obtendo assim um sistema de comunicação no qual os dados são recebidos/enviados instantaneamente desde que a distância entre os nós que pretendem comunicar esteja abaixo de um dado limite. Para uma melhor percepção das diferenças entre os dois módulos disponíveis no simulador segue-se uma explicação mais detalhada sobre cada um deles.

##### **Sistema simulado**

Para simular o sistema de comunicações foi integrado um simulador de redes *wireless* denominado Wireless Network Simulator in Matlab, desenvolvido pelo grupo SIMELEVEN [38]. Trata-se de um simulador *open-source* e pode ser encontrado em [39]. Com o uso desta ferramenta podem ser seleccionadas uma série de opções e definido um conjunto de parâmetros por forma a configurar o sistema de comunicação.

Os aspectos configuráveis mais importantes são:

- Padrão: IEEE 802.11b, IEEE 802.11g ou IEEE 802.11a;
- Modelo de propagação rádio: Friis, *two-ray ground* ou *log shadow*;
- Número máximo de RTS (*request to send*).

O simulador de comunicações integrado baseia a sua operação no processamento de eventos discretos, ou seja, por cada tentativa de comunicação é gerado um evento numa determinada camada da pilha protocolar que após o seu processamento vai conduzir a um agendamento de um outro evento numa outra camada, até que o pacote alcance o seu destino ou o número de reenvios seja esgotado. Os eventos gerados são armazenados numa lista onde cada um dos eventos tem definido o seu tempo de início permitindo assim, que estes sejam processados por ordem cronológica.

Na Figura 22 a) está demonstrado o percurso realizado por um pacote de dados quando este é recebido com sucesso. Por exemplo, quando uma aplicação pretende efectuar o envio de dados, vai ser gerado um evento na camada de aplicação que de seguida vai ser processado e gerar um outro evento na camada de rede. O evento na camada de rede vai ser processado e vai gerar um evento na camada de acesso ao meio, o processo continua até que todo percurso mostrado na Figura 22 a) seja realizado.

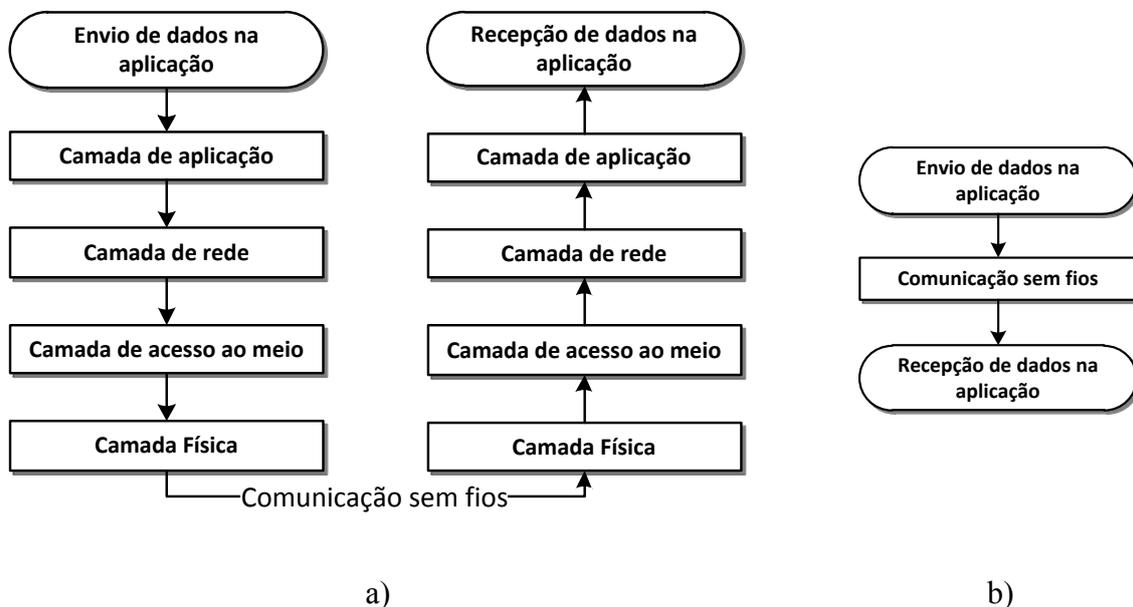


Figura 22 – Percurso de um pacote de dados: a) Sistema simulado; b) Sistema simplificado.

### Sistema simplificado

Para permitir ao utilizador gerir a rapidez do simulador em função do nível de detalhe pretendido foi adicionado ao simulador uma opção que permite ao utilizador comutar o funcionamento do módulo de comunicação entre o simulador de comunicações referido anteriormente e uma metodologia simplificada.

Tal como demonstra a Figura 22 b), a metodologia utilizada consiste numa total abstracção dos conceitos envolvidos na criação de uma ligação entre dois nós da rede. Neste modo de operação, os dados são enviados instantaneamente sem restrições e sem falhas, desde que a distância entre os dois nós se encontre dentro de um determinado alcance que é definido pelo utilizador.

#### 4.11. Erros laterais

Embora os dados gerados sejam apenas para avaliar o desempenho do controlador responsável pela condução, existe no simulador um módulo responsável pelo cálculo do erro entre a pose do veículo e a trajectória. Os erros são calculados em dois pontos de aplicação diferentes, no centro de massa e num ponto situado a uma dada distância (distância de *look-ahead*), conforme o demonstrado na Figura 23.

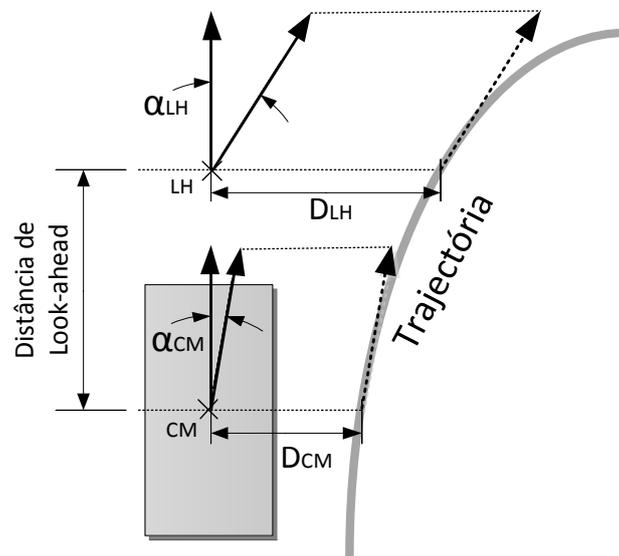


Figura 23 – Cálculo dos erros de posição.

Na Figura 23 são visíveis os parâmetros calculados para cada um dos pontos de aplicação. Para o centro de massa é calculado o erro lateral  $D_{CM}$  e o erro angular,  $\alpha_{CM}$ , obtido pela diferença entre a orientação do veículo e a orientação da tangente à trajectória. De maneira análoga são calculados para o ponto de *look-ahead* os parâmetros  $D_{LH}$  e  $\alpha_{LH}$ .

## 4.12. Fusão sensorial

Uma vez que o posicionamento obtido através de GPS e INS está sujeito a erros, a informação produzida por estes módulos pode ser tratada de forma agregada para obter uma maior precisão no posicionamento. Para a realização da fusão sensorial dos dados de posição absoluta do GPS com a informação inercial proveniente do INS, foram utilizadas as ferramentas da Navigation System Integration and Kalman Filter Toolbox.

A *toolbox* utilizada usa filtro de Kalman (Kalman *filter*, KF), que pode ser visto como um filtro recursivo óptimo (no sentido de minimização do erro quadrático) para estimar o estado de um processo, neste caso o processo é descrito por um conjunto de dezoito parâmetros (Anexo C) que descrevem a posição, velocidade, ângulo de rotação assim como os erros de *bias* nos giroscópios, acelerómetro e nas estimativas do GPS.

O algoritmo do KF pode ser decomposto em duas etapas distintas: Predição e Correção.

Na predição o objectivo passa por obter uma primeira estimativa do estado presente,  $\hat{x}(k|k-1)$ , e da sua incerteza,  $P(k|k-1)$ , com base unicamente na estimativa e incerteza anterior.

$$\hat{x}(k|k-1) = \Phi \hat{x}(k-1|k-1) \quad (12)$$

$$P(k|k-1) = \Phi P(k-1|k-1) \Phi^T + Q(k-1) \quad (13)$$

A fase posterior, denominada correção, tem como objectivo corrigir a estimativa do estado e da sua incerteza através das medidas efectuadas,  $y(k)$ , para obter uma estimativa corrigida para o estado presente,  $\hat{x}(k|k)$ , e para a incerteza,  $P(k|k)$ .

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k)[y(k) - C\hat{x}(k|k-1)] \quad (14)$$

$$P(k|k) = P(k|k-1) - K(k)C P(k|k-1) \quad (15)$$

$$K(k) = P(k|k-1)C^T [C P(k|k-1)C^T R(k)]^{-1} \quad (16)$$

onde,  $R(k)$  é a matriz de covariância associada aos erros de medida e  $K(k)$  representa o ganho do KF.

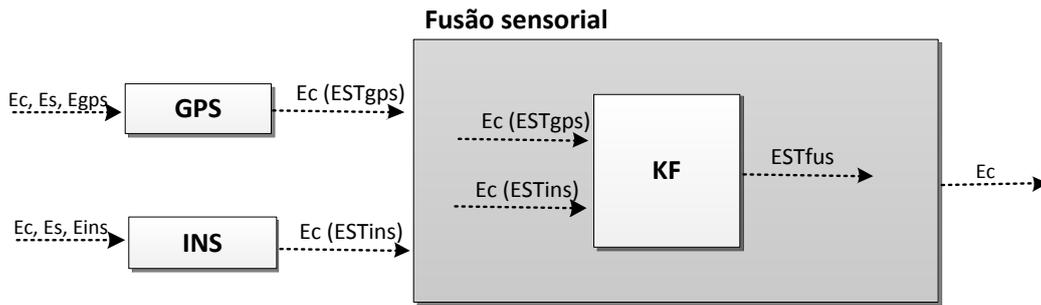


Figura 24 – Procedimento executado pelo módulo de fusão sensorial.

Na Figura 24 está representado de maneira resumida o procedimento efectuado pelo módulo responsável por efectuar fusão sensorial (Navigation System Integration and Kalman Filter Toolbox) que recebe as estimativas provenientes dos módulos de INS e GPS ( $EST_{gps}$  e  $EST_{ins}$ ), assim como outros dados necessários para o processamento, que são guardados individualmente na estrutura de cada veículo ( $E_c$ ). Após a leitura destes dados o módulo procede ao cálculo de uma nova estimativa corrigida para a pose do veículo.

## 5. Resultados

### 5.1. Sistemas de posicionamento

#### 5.1.1. Posicionamento usando odometria

Com o objectivo de analisar a qualidade do posicionamento através da odometria foi realizado um teste onde o veículo ligeiro (com condutor do tipo II) efectua o percurso que liga o segmento 10 ao segmento 28. Os dados gerados foram processados a uma taxa de 100Hz e o erro introduzido consistiu na simulação de erros não sistemáticos onde a percentagem de pulsos afectada por ruído branco foi de 10%.

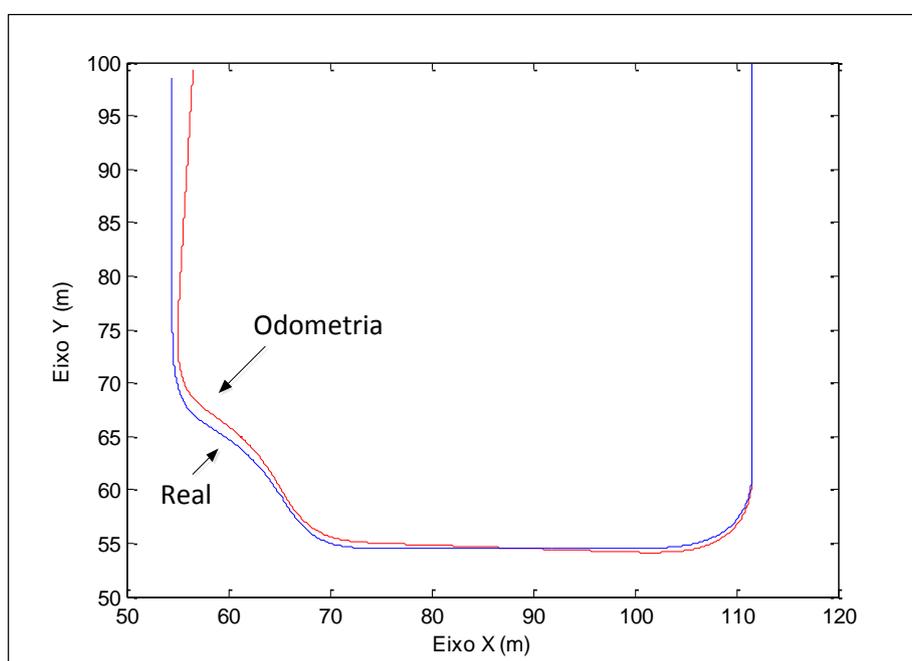


Figura 25 – Comparação entre a trajetória efectuada e a estimativa obtida através de odometria com erro introduzido sobre 10% dos pulsos gerados.

Foram ainda realizados outros testes sobre as mesmas condições, onde a única diferença consistiu no facto do ruído introduzido actuar sobre diferentes percentagens de pulsos gerados. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 – Erros finais obtidos usando odometria para diferentes taxas de erro introduzido.

Erro (% de pulsos)	10 %	15 %	20 %
Pose real [X Y $\theta$ ] (m,m,rad)	(54,50 ; 98,51 ; 1,57)		
Pose estimada [X Y $\theta$ ] (m,m,rad)	(56,54 ; 99,27 ; 1,51)	(56,79 ; 99,56 ; 1,50)	(57,04 ; 99,85 ; 1,49)
Erro de posição (m)	2,18	2,52	2,87
Erro de orientação (rad)	-0,06	-0,07	-0,08

Na Tabela 4 o erro de posição é calculado através da distância euclidiana entre a posição real e a posição estimada. O erro de orientação é obtido através da diferença entre a orientação estimada e a orientação real.

### Análise de resultados

Ao observar a Figura 25 podemos verificar que o erro de posição dado pela odometria tende a aumentar ao longo do percurso, como seria de esperar, pois trata-se de um método de posicionamento DR. Os erros (de posição e orientação) são ainda influenciados pelos erros não sistemáticos e tendem a aumentar conforme aumenta a severidade do erro injectado (Tabela 4).

#### 5.1.2. Sistema de navegação por satélite

Para obter uma posição via GPS foram integrados no simulador várias metodologias de posicionamento (*pseudorange*, DGPS e RTK-GPS). Para analisar seu desempenho foram executados um conjunto de simulações. Os resultados podem ser visualizados na Figura 26.

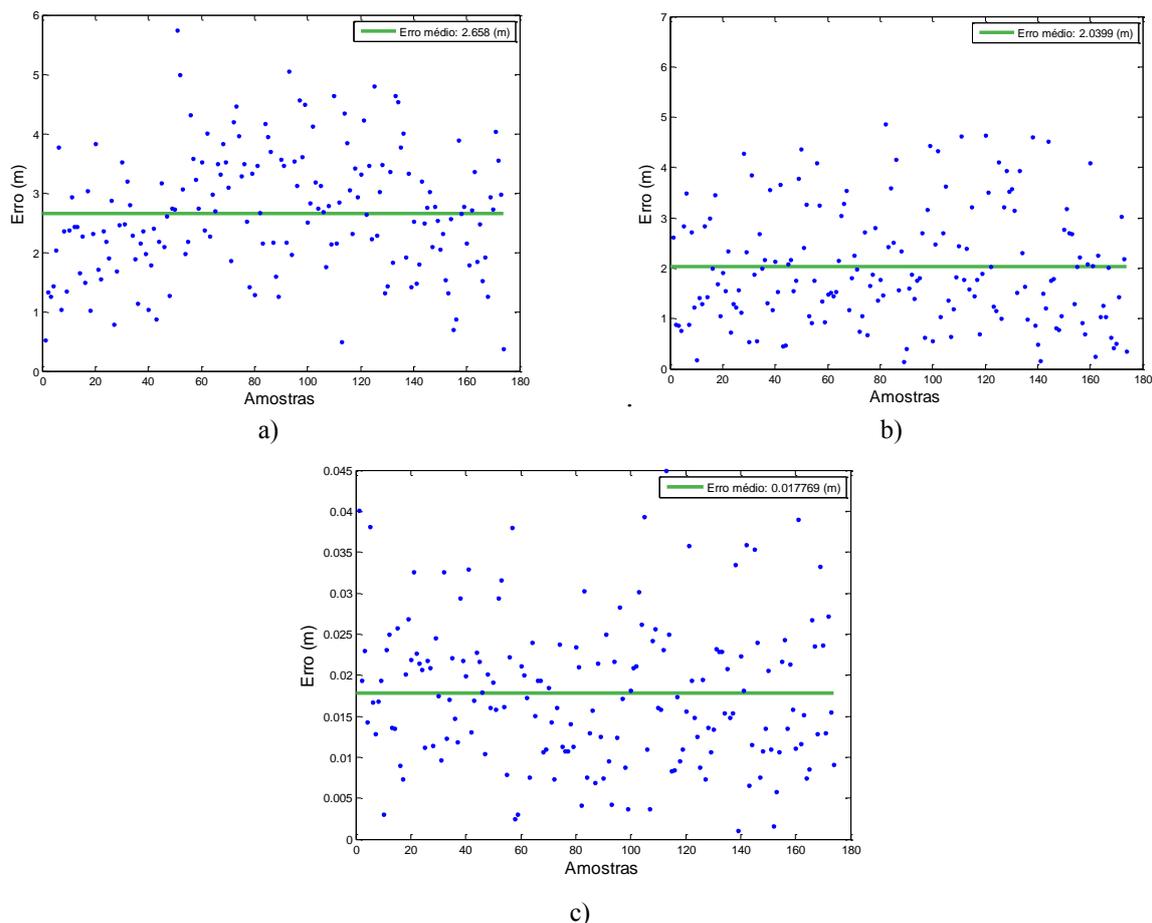


Figura 26 – Amostras do erro obtido para diferentes metodologias de GPS e média das amostras: a) *Pseudorange*; b) DGPS; c) RTK-GPS.

Tabela 5 – Erros médios, máximos e mínimos das diferentes metodologias de GPS.

Método	<i>Pseudoranges</i>	DGPS	RTK-GPS
Erro médio (m)	2,6580	2,0399	0,0178
Erro máximo (m)	5,7472	6,6348	0,0450
Erro mínimo (m)	0,3771	0,1388	0,0010

Os dados da Figura 26 e da Tabela 5 foram originados pela realização do percurso (por um veículo ligeiro com condutor do tipo II) entre os segmentos 1 e 25. O GPS foi utilizado a uma taxa de 10 Hz e foram inseridos erros devido à Troposfera/Ionosfera, *multipath* e ruído térmico. As amostras reflectem o erro no posicionamento que consiste na distância euclidiana entre a verdadeira posição do veículo e a posição obtida via GPS.

### **Análise de resultados**

Através dos dados obtidos foi possível concluir que o método de posicionamento RTK-GPS oferece uma melhor precisão quando comparado com os restantes. Facto comprovado pelos 1,8 cm de erro médio medido no teste realizado. A qualidade deste método pode também ser aferida quando se tem em linha de conta o intervalo entre os erros máximos e mínimos.

#### **5.1.3. Sistema de navegação inercial**

Para aferir a qualidade das estimativas obtidas pelo sistema de navegação inercial foi realizado um teste que consistiu na realização da trajectória entre os segmentos 4 e 20 por um veículo do tipo ligeiro com um condutor do tipo II. O sistema de posicionamento foi usado a uma taxa de 100 Hz e o ruído introduzido nas medidas passou pela inclusão de erros de *bias* nos giroscópios, cerca de 10°/hora, 15°/hora e 5°/hora no eixo-X, eixo-Y e eixo-Z. Foram ainda introduzidos erros de *bias* nos acelerómetros, cerca de -500 µG, 400 µG e 100 µG no eixo-X, eixo-Y e eixo-Z do referencial do corpo, respectivamente.

Na Figura 27 a) é comparada a trajectória efectuada pelo veículo com as estimativas obtidas, no referencial do simulador (referencial local). O erro da Figura 27 b) é obtido através do cálculo da distância euclidiana entre a posição do veículo e estimativa obtida para a pose do veículo.

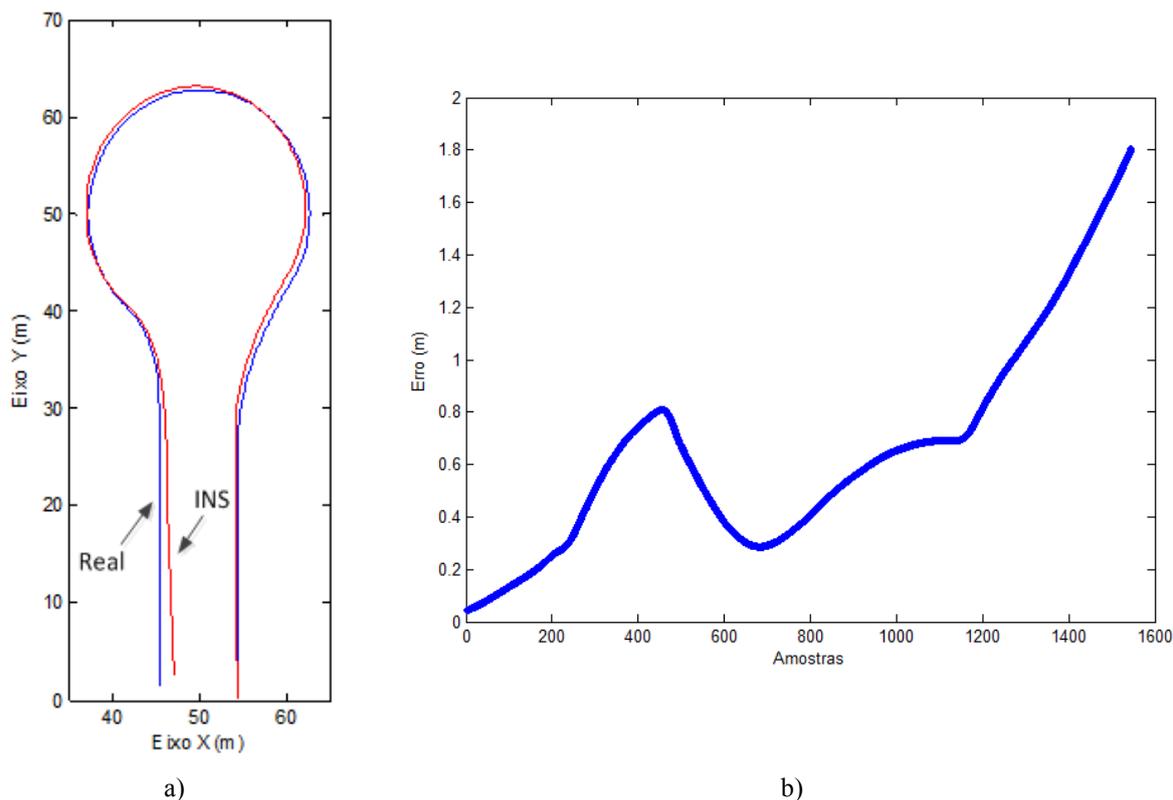


Figura 27 – Resultados da simulação usando o INS: a) Comparação entre a trajectória efectuada e a estimativa obtida via INS; b) Erro de posicionamento ao longo da trajectória.

### **Análise de resultados**

Tal como esperado, o INS não oferece uma solução robusta para o posicionamento pois trata-se de um método do tipo DR, o que significa que as estimativas da pose do veículo dependem de estimativas anteriores e que pequenos erros de orientação provocam erros de posição crescentes, tal como o mostrado em b) da Figura 27.

#### **5.1.4. Marcadores Magnéticos**

Uma vez que foi integrado no simulador um módulo que simula a existência de MM no cenário é apropriado estudar a influência deste mecanismo. Para o efeito a informação produzida pelos MM foi injectada na estimativa obtida pelo INS. As configurações do INS são semelhantes às usadas na secção 5.1.3. O percurso efectuada liga o segmento 6 ao segmento 21 e é realizado por um veículo ligeiro (com condutor do tipo II) e são simulados diferentes números de MM por segmento.

Tabela 6 – Erro médio da estimativa obtida pelo INS em função do número de marcadores magnéticos de cada segmento.

Número de MM por segmento	0	1	3
Erro médio (m)	1,1502	0,5282	0,3753

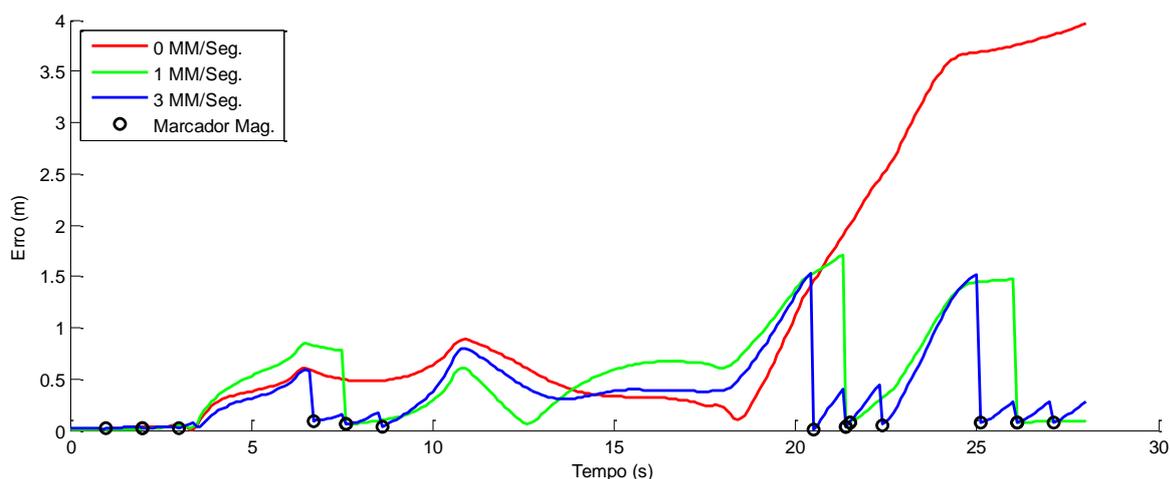


Figura 28 – Erro de posição da estimativa obtida por INS em função do número de marcadores magnéticos de cada segmento.

### **Análise de resultados**

Como é possível verificar pelos resultados obtidos (Figura 28 e Tabela 6), o erro médio das estimativas obtidas, que sem o uso de MM cresce ao longo do tempo, é atenuado com o uso de MM.

Foi também possível verificar o facto de o erro continuar a aumentar após ser detectado um MM. Isto deve-se ao facto de estes apenas corrigirem a estimativa da pose do veículo em posição e não em orientação, para este efeito seria necessário simular agregados de MM. O número de MM tem uma clara influência no erro médio das estimativas obtidas. O erro médio é tanto menor, quanto maior for o número de MM utilizado em cada segmento, conforme é possível verificar na Tabela 6.

#### **5.1.5. Fusão sensorial (GPS + INS)**

Para corrigir ou atenuar os erros das estimativas obtidas através de INS, a informação produzida por este método pode ser combinada com a informação produzida pelo GPS. Para testar o módulo integrado no simulador foram realizados testes usando um veículo do tipo ligeiro (com um condutor do tipo II) que realiza uma trajectória entre os segmentos 4 e 24.

O INS foi usado a uma taxa de 100 Hz e o ruído introduzido nas medidas passou pela inclusão de erros de *bias* nos giroscópios, cerca de 40°/hora, -50°/hora e -30°/hora no eixo-X, eixo-Y e eixo-Z do referencial do corpo, respectivamente. Foram ainda introduzidos erros de *bias* nos acelerómetros, cerca de 600 µG, -700 µG e 100 µG no eixo-X, eixo-Y e eixo-Z do referencial do corpo, respectivamente.

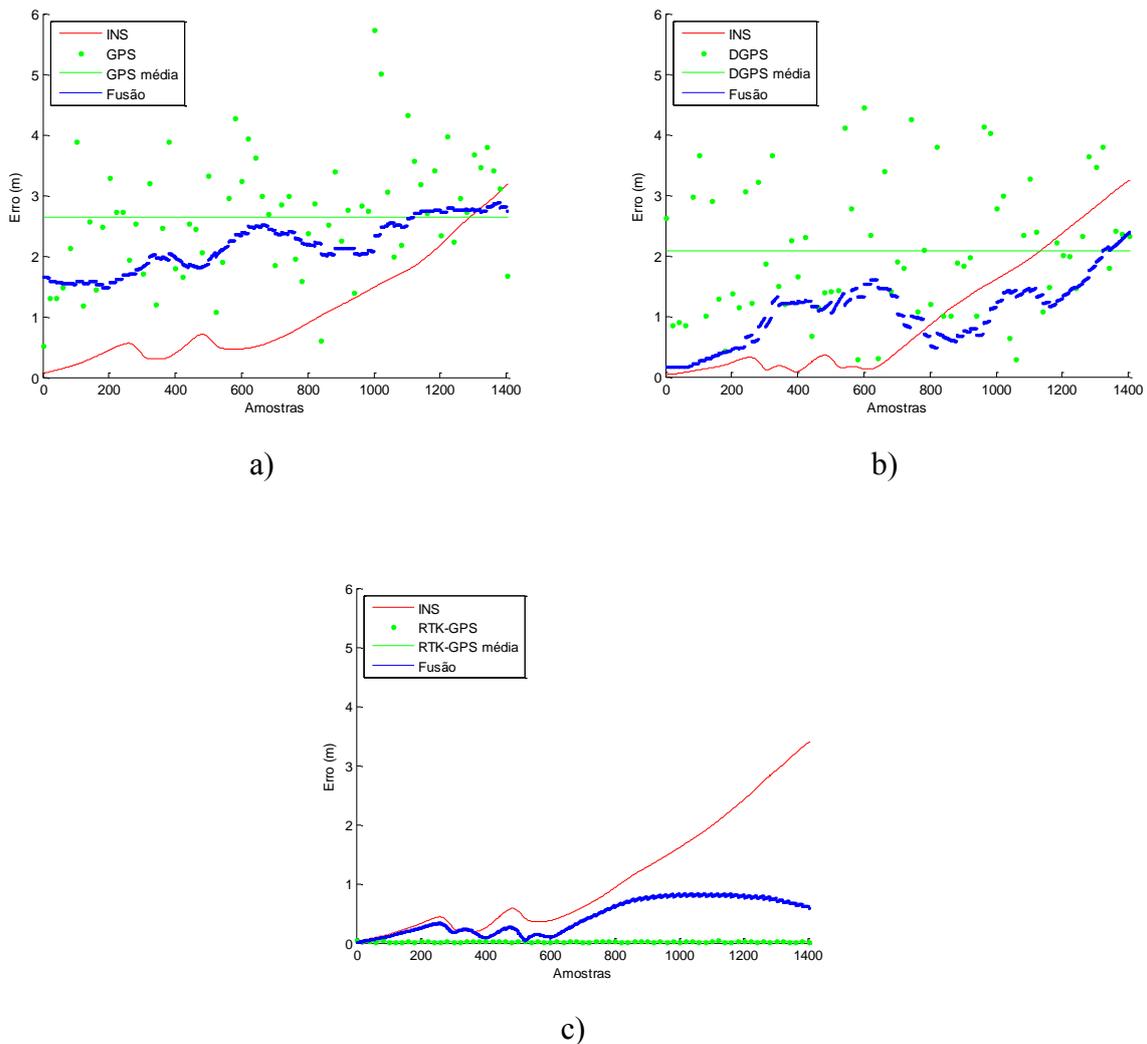


Figura 29 – Resultados obtidos pela fusão sensorial (GPS + INS) para diferentes tipos de GPS: a) *Pseudoranges*; b) DGPS; c) RTK-GPS.

O GPS foi usado a uma taxa de 5 Hz e foram simulados os erros causados pelos efeitos da Troposfera/Ionosfera, *multipath* e ruído térmico. Nos testes realizados foram usadas separadamente as três técnicas de GPS disponíveis, sem quaisquer restrições a nível do alcance da comunicação entre o veículo e a estação base (necessária no caso de DGPS e RTK-GPS).

Tabela 7- Resultados obtidos para a fusão sensorial (INS e GPS) para diferentes tipos de GPS.

Método GPS	<i>Pseudorange</i>	DGPS	RTK-GPS
Erro médio GPS (m)	2,6490	2,0734	0,0189
Erro médio INS (m)	1,0730	1,0031	1,1012
Erro médio fusão (m)	2,1843	1,0784	0,4534

A Tabela 7 reflecte os erros médios de posição (distância euclidiana entre a posição real e estimada) do conjunto de amostras obtidas nos testes realizados. A evolução dos erros ao longo do tempo pode ser visualizada na Figura 29.

### **Análise de resultados**

O conjunto de testes efectuados espelha o facto de precisão da fusão sensorial estar fortemente ligada à precisão da estimativa do GPS. As estimativas com melhor precisão são obtidas quando é utilizada a técnica de RTK-GPS, tornando assim a informação produzida pela fusão sensorial redundante, pois as estimativas de RTK-GPS fornecem uma melhor precisão por si só uma vez que não são contaminadas pelos erros do INS.

## **5.2. Sistemas de gestão de tráfego**

Com vista à avaliação do desempenho de ambos os sistemas de gestão desenvolvidos foi realizado um conjunto de testes onde numa primeira fase o simulador foi alterado para que fosse possível estudar os sistemas de gestão separadamente. De seguida os sistemas de gestão foram avaliados em conjunto. O carácter aleatório das simulações foi eliminado (através das opções disponibilizadas no *interface*) para que todo o tráfego fosse homogéneo sendo constituído por veículos ligeiros com condutores do tipo II. Para que o funcionamento do sistema de gestão da rotunda seja possível é necessário conhecer a posição do veículo. Em todas as simulações foi usada na notificação do sistema de gestão da rotunda a posição obtida por RTK-GPS a uma taxa de 10 Hz devido à precisão demonstrada por este método de posicionamento nos testes realizados anteriormente. A recolha dos dados que são usados na avaliação dos sistemas de gestão é realizada a uma taxa de 5 Hz, excepto o parâmetro que traduz a velocidade média (obtido com base no tempo gasto pelo veículo no simulador e na distância do seu percurso). Os dados apenas são recolhidos para os veículos que executam a totalidade do seu percurso.

Foi usado um alcance de 45 metros no sistema de comunicações V2I e a zona de intervenção do sistema de gestão da rotunda tem um raio de 40 metros. Este usa uma margem de segurança de 2 metros para a largura e de 6 metros para o comprimento, permitindo que apenas sejam direccionados cerca de 3 veículos para cada saída no caso dos testes em conjunto, enquanto nos testes individuais este parâmetro não tem restrições.

No caso em que o cruzamento não tem o sistema de gestão activo, a sinalização luminosa permite a passagem (em segmentos adjacentes) de veículos a cada 22 segundos.

Para o controlo em velocidade, os condutores avaliam uma área em seu redor do tipo circular com um raio de 30 metros.

### 5.2.1. Testes individuais

No conjunto de testes individuais o objectivo passou por estudar individualmente a influência de cada um dos sistemas desenvolvidos. Para tal o cenário da simulação foi modificado (Anexo D, Figura 36) por forma a que apenas fossem considerados os segmentos que dão acesso a cada uma das soluções usadas para regular intersecções (rotunda e cruzamento). O período de tempo simulado foi de cerca de 20 minutos.

#### Rotunda

Tabela 8 – Resultados da avaliação individual do sistema de gestão da rotunda.

Fluxo	(Veículos/hora)	100		150		200	
Gestão	(Sim/Não)	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Veículos processados	(Veículos)	264	264	395	396	220	526
Velocidade média	(Km/h)	33,8	34,8	25,9	30,6	13,6	31,1
Tempo médio em paragem	(s)	0,0	0,0	1,2	1,0	12,2	0,8
Percentagem de tempo em movimento	(%)	100	100	94,2	93,6	71,4	94,7

■ Sem gestão ■ Com Gestão

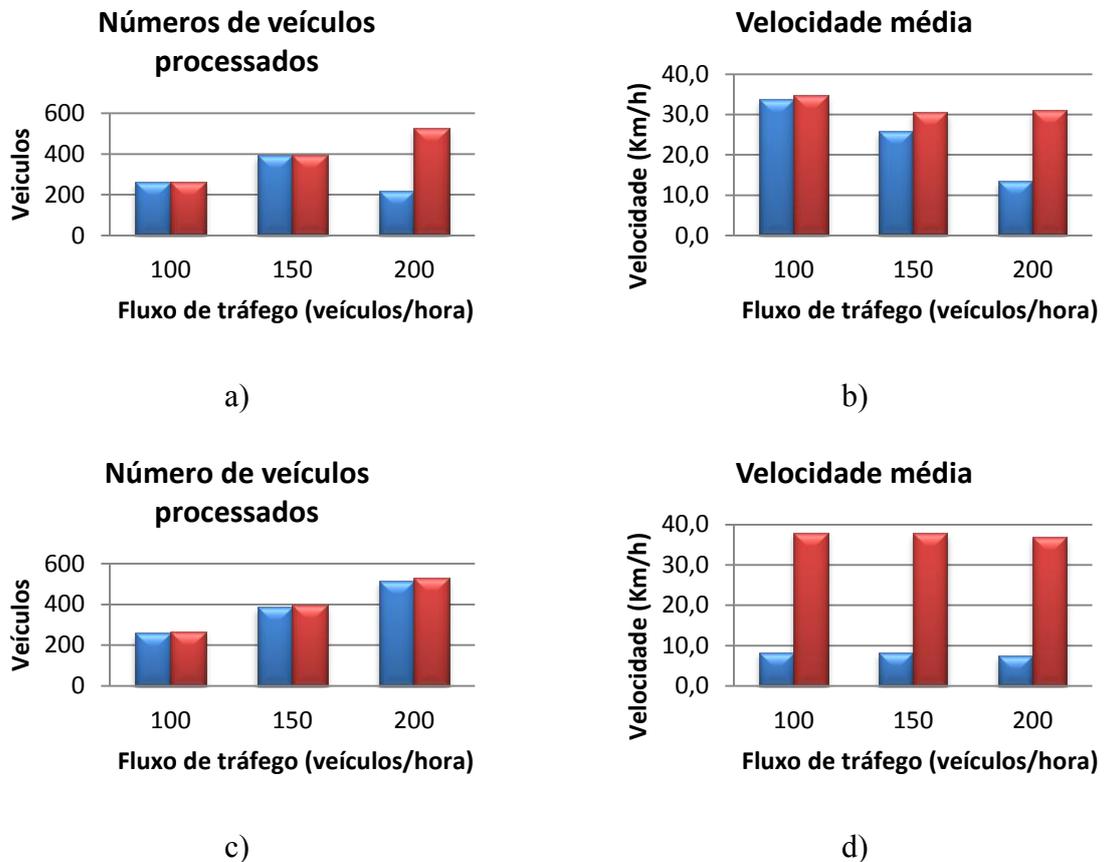


Figura 30 – Análise individual dos sistemas de gestão de tráfego: a) Rotunda; b) Rotunda; c) Cruzamento; d) Cruzamento.

## Cruzamento

Tabela 9 - Resultados da avaliação individual do sistema de gestão do cruzamento.

Fluxo	(Veículos/hora)	100		150		200	
		Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Gestão	(Sim/Não)						
Veículos processados	(Veículos)	259	265	388	397	514	530
Velocidade média	(Km/h)	8,3	38,0	8,4	37,8	7,6	36,9
Tempo médio em paragem	(s)	28,7	0,0	27,7	0,0	30,9	0,0
Percentagem de tempo em movimento	(%)	44,1	100	45,8	100	42,2	99,9

## Análise de resultados

Com as simulações efectuadas foi possível verificar problemas no desempenho na operação normal da rotunda em todos os parâmetros avaliados com elevados fluxos de tráfego. Através da análise dos dados recolhidos é possível verificar que o sistema de gestão desenvolvido para a rotunda, actua positivamente sobre todos os parâmetros avaliados tornando o tráfego mais fluido e maximizando a capacidade da infra-estrutura. Embora os efeitos do sistema de gestão (rotunda) sejam praticamente imperceptíveis para baixos fluxos de tráfego, o seu impacto positivo vai aumentando de forma proporcional ao aumento do fluxo de tráfego.

No caso do cruzamento é possível verificar (para qualquer fluxo de tráfego) a eficácia do sistema de gestão pois é notória a capacidade do mesmo em reduzir o tempo de espera a que os veículos estão sujeitos antes de entrar na zona facilmente congestionável fazendo assim com que os veículos apresentem uma velocidade média para o percurso efectuado muito superior ao verificado quando o cruzamento não sofre acção do sistema de gestão.

Quando comparados, o sistema de gestão do cruzamento prova ser uma melhor solução para regular este tipo de intersecções sobretudo em situações de elevado fluxo de tráfego.

### 5.2.2. Testes em conjunto

Para aferir o impacto dos sistemas de gestão de tráfego na circulação, foram realizados um conjunto de simulações (12 no total) com 10 minutos de duração, onde foram testadas várias configurações do simulador com diferentes níveis de fluxo de tráfego. Nos testes realizados foram utilizados três níveis de fluxo diferentes que variam entre os 50 e os 150 veículos/hora. Para cada um dos níveis de fluxo foram utilizadas todas as combinações possíveis com as opções disponíveis para a gestão de tráfego, ou seja, para cada taxa de fluxo foram utilizadas as configurações: Sem sistemas de gestão activos, apenas sistema de gestão do cruzamento activo, apenas sistema de gestão da rotunda activo e ambos os sistemas de gestão activos.

Tabela 10 - Resultados da avaliação em colectiva dos sistemas de gestão.

Fluxo	(Veí/h)	50				100				150			
		Não	Sim										
Gestão Rotunda	(Sim/Não)	Não	Sim										
Gestão Cruzamento	(Sim/Não)	Não	Não	sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim	Não	Não	Sim	Sim
Percentagem de veículos processados	(%)	92	92	98	98	92	92	98	98	49	83	97	98
Velocidade média	(Km/h)	14	14	36	36	11	11	31	33	9	8	28	31
Tempo médio de paragem	(s)	19	19	0	0	27	29	1	1	32	41	2	1
Percentagem de tempo em movimento	(%)	94	64	100	100	58	57	98	97	52	41	93	94

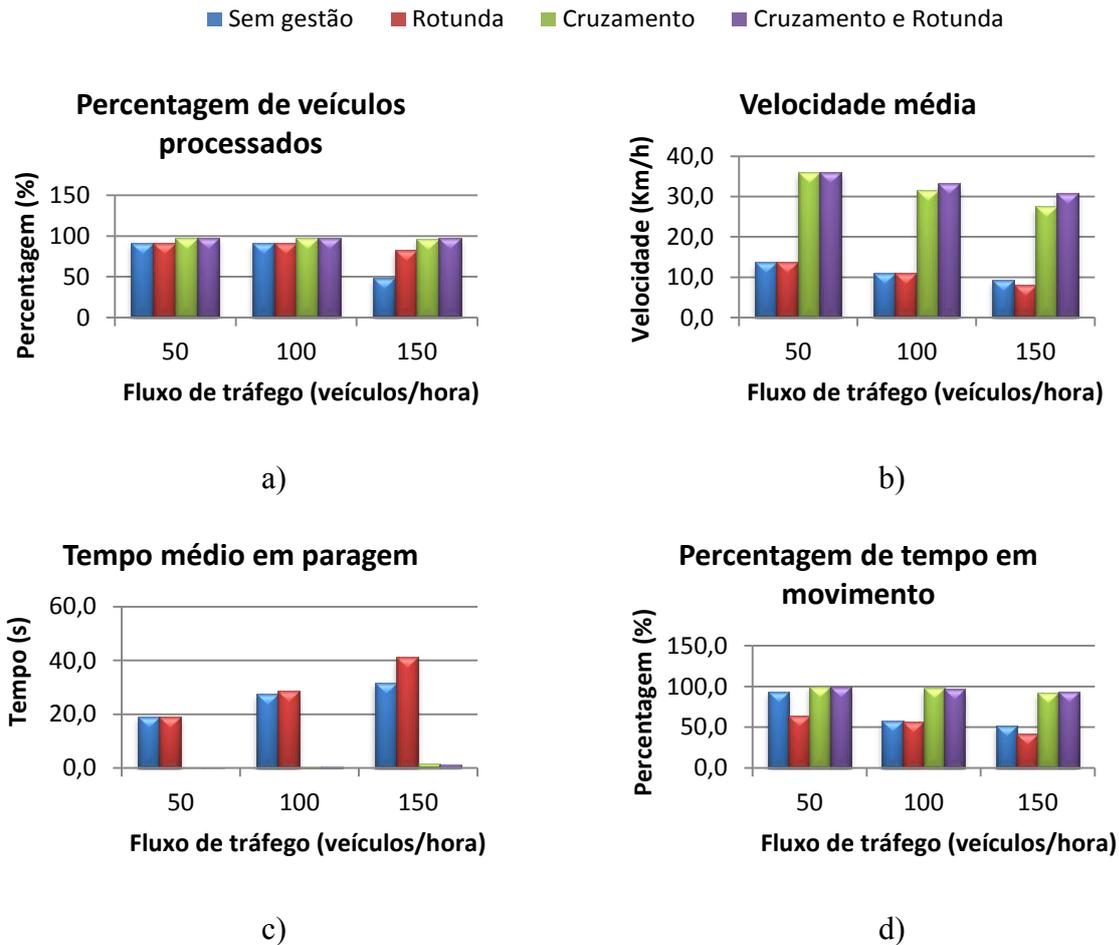


Figura 31 – Análise conjunta dos sistemas de gestão de tráfego.

Na Tabela 10 estão contidos os dados recolhidos do conjunto de simulações realizadas. O conjunto de dados recolhidos teve como objectivo a avaliação de vários parâmetros tais como, a velocidade média, a percentagem de tráfego escoada, o tempo que os veículos permanecem imobilizados e a percentagem de tempo em movimento. Os dados podem também ser visualizados na Figura 31.

Na Figura 32 e na Figura 33 são mostrados os resultados obtidos, para configurações específicas, por duas ferramentas desenvolvidas com o objectivo de proporcionar ao utilizador outras formas de analisar os resultados.

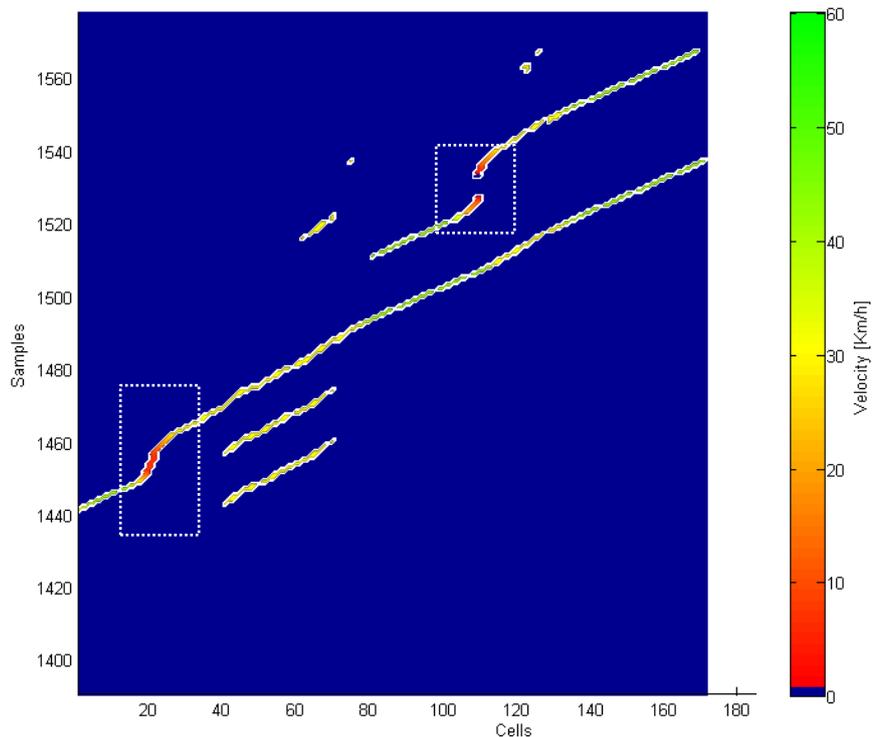


Figura 32 – Velocidade dos veículos no trajecto entre os segmentos 1 e 25 para um dado intervalo de tempo com uma taxa de amostragem de 5 HZ para uma simulação com fluxo de entrada de 100 veículos/hora e com o sistema de gestão do cruzamento activo.

Uma das ferramentas incluídas no simulador para análise de resultados consiste na possibilidade de visualizar a velocidade dos veículos num determinado percurso. Na Figura 32 é possível visualizar o resultado produzido por esta ferramenta, neste caso o percurso entre os segmentos 1 e 25 ocupa 172 células da grelha de ocupação, que são monitorizadas de forma a gerar um gráfico que representa a velocidade dos veículos em função da sua localização no percurso ao longo do tempo. Na figura é visível o facto de um carro proveniente do segmento 1 abrandar nas proximidades da rotunda assim como facto de outro veículo com diferente origem efectuar uma paragem na zona do cruzamento (zonas delimitadas a tracejado).

Outra das ferramentas introduzidas no simulador consiste na possibilidade de visualizar um mapa de ocupação (Figura 33) resultante da acumulação dos mapas de ocupação que vão sendo gerados ao longo da simulação. Desta forma é possível visualizar de forma rápida quais as zonas do cenário com maior densidade de tráfego, facilitando assim a compreensão das

causas dos congestionamentos. No mapa da Figura 33 são visíveis em tons de vermelho as zonas que foram pouco ocupadas, que representam as zonas pelas quais os veículos circularam, e as células em tons mais claro representam as zonas que experimentaram um maior nível de ocupação. No caso representado da Figura 33 é possível verificar que os congestionamentos ocorreram nos segmentos de entrada no simulador e nos segmentos que ligam a rotunda ao cruzamento.

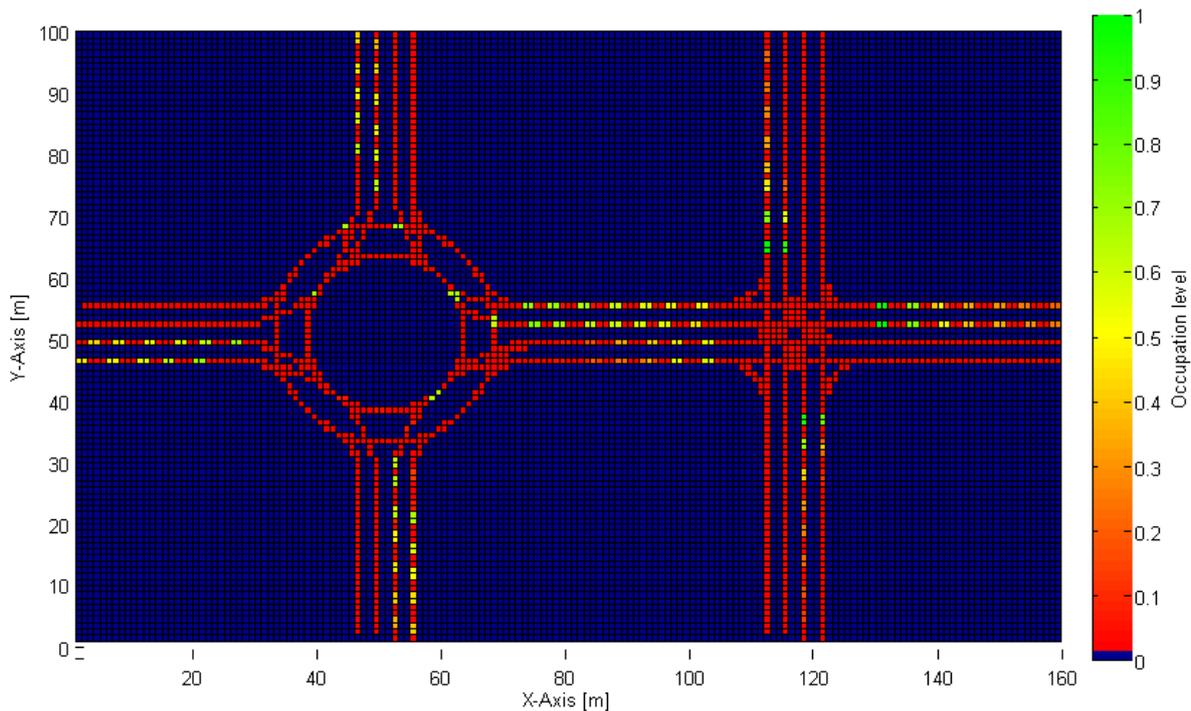


Figura 33 – Nível de ocupação da grelha durante uma simulação com fluxo de entrada de 150 veículos/h, sem sistemas de gestão activos.

### **Análise de resultados**

Após a realização dos testes em que foram usadas combinações dos dois sistemas de gestão desenvolvidos foi possível verificar que quando o sistema de gestão da rotunda actua isoladamente este agrava o tempo médio que os veículos permanecem imobilizados e consequentemente a sua velocidade média embora permita escoar uma maior quantidade de tráfego.

Outra conclusão importante consiste no facto do desempenho obtido quando apenas está activo o sistema de gestão do cruzamento ser muito próximo do obtido quando estão os dois sistemas de gestão activos, fazendo assim com que a escolha recaia sobre este sistema (cruzamento) no caso de ocorrer uma situação em que fosse necessário optar por um deles.

## **6. Conclusão**

### **Métodos de posicionamento**

De todos os métodos de posicionamento implementados no simulador verificou-se que a alternativa que fornece um posicionamento de maior precisão é o sistema de navegação por satélite usando a técnica de RTK-GPS. Os outros métodos revelaram-se pouco eficazes pois embora em períodos de tempo curtos a qualidade do posicionamento seja razoável, para períodos de maior duração a qualidade do posicionamento vai-se degradando (mesmo com técnicas auxiliares tais como o uso de marcadores magnéticos), circunstância que se deve ao facto da estimativa de pose do veículo para um dado momento depender de estimativas anteriores o que faz com que os erros se vão acumulando ao longo do tempo. Embora a precisão do posicionamento obtido via RTK-GPS revele uma enorme qualidade, o uso desta técnica em situações reais deve ter em conta alguns aspectos tais como a distância entre os receptores e a estação de referência e a necessidade de sistemas de comunicação fiáveis.

### **Sistemas de gestão**

Com base na análise dos dados recolhidos é possível concluir que o sistema de gestão do cruzamento se revelou bastante eficaz sobre todas as condições em que foi testado, tendo um impacto significativo na diminuição do tempo em que os carros permanecem imobilizados o que se traduz num aumento significativo da velocidade média, mostrando assim ser uma técnica bastante promissora para a regulação deste tipo de intersecções.

Já no caso do sistema de gestão implementado para gerir o tráfego na zona da rotunda, os testes efectuados mostraram a redundância deste sistema com baixos níveis de fluxo de tráfego. O seu impacto positivo apenas é verificado com um elevado nível de fluxo de tráfego, tal como revelaram os testes realizados.

## 7.Trabalho futuro

Devido à magnitude da tarefa que consistia na importação de todo o código em C (relativo ao modelo dinâmico do veículo) para MATLAB e ao facto de não ser essencial para o funcionamento do simulador, esta tarefa foi deixada para último lugar. Devido ao tempo disponível ser limitado, a tarefa não foi concluída, contudo, esta já se encontra num estado de desenvolvimento avançado, pois todo o código já foi importado sendo apenas necessário efectuar a depuração dos erros existentes e consequente correcção dos mesmos.

A metodologia utilizada na gestão de tráfego na rotunda pode ser revista de forma a melhorar a *performance* já alcançada. Uma futura melhoria pode ter como alvo o aproveitamento dos intervalos entre a passagem de veículos ou então a modificação de todo o paradigma para que o perfil de velocidade definido para cada veículo possa ser redefinida e novamente enviada para o veículo correspondente.

Relativamente a futuras ferramentas que possam ser integradas no simulador um estudo interessante seria avaliação do impacto de um único sistema de gestão centralizado que pode fazer uso dos sistemas desenvolvidos ou até mesmo recorrer à expansão do método implementado para gerir o tráfego na rotunda para que este consiga abranger uma maior área de modo a englobar a zona do cruzamento.

## 8.Referências Bibliográficas

- [1] P. B., Goodwin., *The Economic Costs of Road Traffic Congestion*.
- [2] Patrick, A. M. Ehlert e Leon, J. M. Rothkrantz., *Microscopic Traffic Simulation with Reactive Driving Agents*. Oakland (CA), USA : IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2001.
- [3] Wilco, Burghout, Koutsopoulos, Haris N. e Andreasson, Ingmar., *A Discrete-Event Mesoscopic Traffic Simulation Model for Hybrid Traffic Simulation*. Toronto, Canada : IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2006.
- [4] Potuzak, Tomas e Herout, Pavel., *Use of Distributed Traffic Simulation in the JUTS Project*. Warsaw, Poland : The International Conference on "Computer as a Tool", 2007.
- [5] Know, Eil e Michalopoulos, Panos., *Macroscopic Simulation of Traffic Flows in Complex Freeway Segments on a Personal Computer*. s.l. : Vehicle Navigation and Information Systems Conference, 1995.
- [6] Braban-Ledoux, Corinne., *METACOR - A Macroscopic Modelling Tool for Corridor Application to the Stockholm Test Site*. s.l. : Center for Traffic Engineering & Traffic Simulation, 2000.
- [7] McTrans., Traffic Software Integrated System - Corridor Simulation. [Online] [Citação: 12 de 07 de 2001.] <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/>.
- [8] QuadstoneParamics., PARAMICS. [Online] [Citação: 12 de 07 de 2011.] <http://www.paramics-online.com/>.
- [9] PTV., VISSIM. [Online] [Citação: 12 de 7 de 2011.] <http://www.vissim.de>.
- [10] Treiber, Martin e Kesting, Arne., *An Open-Source Microscopic Traffic Simulator*. Dresden, Germany : IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2010.
- [11] Ben-Akiva, Moshe, et al., *DynaMIT: A Simulation-based System for Traffic Prediction*. Delft, The Netherlands : DACCORD Short Term Forecasting Workshop, 1998.
- [12] Mueller, Edward A., *Aspects of the History of Traffic Signals*. s.l. : IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-19, 1970.
- [13] Lim, Gi Young, Kang, Jeong Jin e Hong, You Sik., *The optimization of Traffic Signal Light using Artificial intelligence*. Melbourne, Australia : The 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2001.
- [14] Wannige, C. T. e Sonnadara, D. U. J., *Adaptive Neuro-Fuzzy Traffic signal Control for Multiple Junction*. Sri Lanka : 14th International Conference on Industrial and Information, 2009.

- [15] Tan, Kok Khiang, Khalid, Marzuki e Yusof, Rubiyah., *Intelligent Traffic Lights Control by Fuzzy Logic*. s.l. : Malaysian Journal of Computer Science, Vol. 9, 1996.
- [16] Girija, H. Kulkarni e Waingankar, Poorva G., *Fuzzy Logic Based Traffic Light Controller*. Sri Lanka : 2th International Conference on Industrial and Information Systems, 2007.
- [17] Hewage, Kasun N. e Ruwanpura, Janaka Y., *Optimization of Traffic Signal Light Timing Using Simulation*. s.l. : Simulation Conference, 2004.
- [18] Jacquemart, Georges., *Modern Roundabout Practice in the United States*. Washington, D. C. : Synthesis of Highway Practice 264, 1998.
- [19] Rodegerdts, Lee August., *Roundabouts: An Information Guide (2nd Edition)*. 2010.
- [20] Yang, Xiaoguang, Li, Xiugang e Xue, Kun., *A New Traffic-Signal Control for Modern Roundabouts: Method and Application*. s.l. : IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 5, 2004.
- [21] Bu, Shujian, Zhang, Tong e Du, Li., *Approximations and Simulation of the Optimal Change Interval for Roundabout*. s.l. : 2nd International Workshop on Database Technology and Applications, 2010.
- [22] Bai, Yu e Xue, Kun., *Association of Signal-Controlled Method at Roundabout and Stop Rate*. Wuhan, China : 2nd WRI Global Congress on Intelligent Systems, 2010.
- [23] Tollazi, Tomaz, Rencelj, Marko e Turnsek, Saso., *Slovenian Experiences with Alternative Types of Roundabouts - "Turbo" and "Flower" Roundabouts*. Vilnius, Lithuania : The 8th International Conference on Environmental Engineering, 2011.
- [24] Tsui, James Bao-Yen., *Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach, 1st Edition*. s.l. : Jonh Wiley and Sons, 2000.
- [25] Enge, Per e Misra, Pratap., *Scanning the Issue/Technology - Special Issue on Global Positioning System*. s.l. : Proceedings of the IEEE, Vol. 87, 1999.
- [26] Gleason, Scott e Gebre-Egziabher, Demoz., *GNSS Applications and Methods*. s.l. : Editors, 2009.
- [27] Xu, Guochang., *GPS Theory, Algorithms and Applications, 2nd Edition*. s.l. : Springer, 2007.
- [28] Surrécio, António J. P., *Fusão Multisensorial para Navegação Autónoma de Veículos Inteligentes*. Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, FCTUC, Coimbra, Portugal : Tese de Mestrado, 2007.

- [29] Gueuning, F., et al., *Accurate Distance Measurement by an Autonomous Ultrasonic System Combining Time-of-Flight and Phase-Shift Methods*. s.l. : Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1996.
- [30] FARO., *Phase Shift Measurement and Time of Flight Measurement*. 2011.
- [31] Barata, M., et al., *Data Fusion of Wheel Encoders and Magnetic Sensors for Autonomous Vehicles Navigation*. Faro, Portugal : 6th Portuguese Conference on Automatic Control, 2004.
- [32] Bento, L. C. e Nunes, Urbano., *Autonomous Navigation Control with Magnetic Markers Guidance of a Cybernetic Car Using Fuzzy Logic*. s.l. : Machine Intelligence & Robotic Control, Cyber Scientific, 2004.
- [33] Bostan, I., et al., *Systematic Odometry Errors Compensation for Mobile Robot Positioning*. s.l. : CAD Systems in Microelectronics, 2003.
- [34] Silva, Paulo Cesar Marques da., *Teoria do Fluxo de Tráfego*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília : s.n., 2007.
- [35] Mutneja, Vikram., Matlab Central. *File Exchange*. [Online] [Citação: 23 de 07 de 2011.] <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17432-autonomous-navigation>.
- [36] Zhang, Q. J. e Schwarz, K. P., *Estimating double difference GPS multipath under kinematic conditions*. s.l. : Position Location and Navigation Symposium, 1996.
- [37] , *Diário da República, Decreto-Lei 44/2005 de 23 de Fevereiro*. s.l. : Artigo 1º.
- [38] Ray, S., Carruthers, J. B. e Starobinski, D., *RTS/CTS-Induced Congestion in Ad-Hoc Wireless LANs*. s.l. : Wireless Communications and Networking, 2003.
- [39] , *Wireless Network Simulator in Matlab*. [Online] [Citação: 27 de 07 de 2011.] <http://wireless-matlab.sourceforge.net/>.
- [40] TORCS. *The Open Racing Car Simulator*. [Online] [Citação: 11 de 07 de 2011.] <http://torcs.sourceforge.net/>.

## 9. Anexos

### A. Fases do desenvolvimento do simulador

Devido ao facto de o simulador ter sido um projecto desenvolvido de raiz, foi necessário efectuar opções relativas a toda arquitectura do simulador assim como ao funcionamento dos módulos integrados. Durante o desenvolvimento foi necessário refazer alguns desses módulos devido sobretudo à permanente procura do aumento de performance ou então a resultados não satisfatórios no funcionamento dos módulos.

Toda a espinha dorsal do simulador que dá corpo à arquitectura implementada foi também alvo de uma significativa melhoria durante o desenvolvimento, sobre pena do simulador se tornar demasiado complexo e ineficiente, o que colocaria sérios entraves a futuras expansões do próprio simulador e à integração de novos módulos.

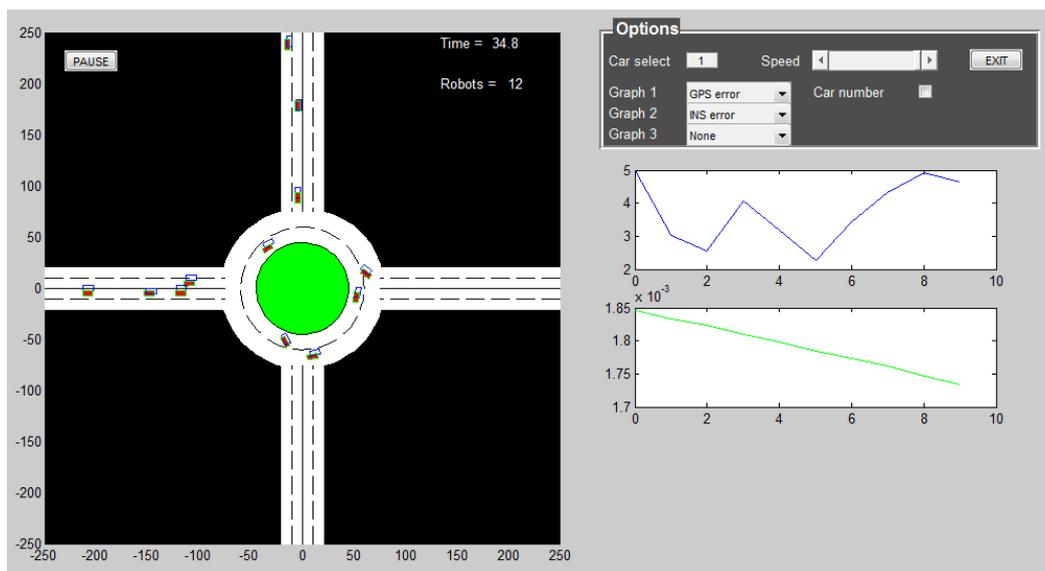


Figura 34 – Primeira versão do simulador.

Um dos aspectos que foi alvo de uma significativa melhoria foi o facto da trajetória efectuada por um condutor ser previamente definida, uma vez que inicialmente esta não existia e o veículo navegava pelo cenário seguindo *setpoints* com o objectivo de alcançar o destino desejado. Outro aspecto que teve de ser de uma profunda remodelação foi a utilização de grelhas de ocupação, pois estas tiveram de ser refeitas de modo a existir uma única grelha para todo o cenário, uma vez que inicialmente as células das grelhas representavam secções transversais de um segmento.

## B. Tabela de roteamento

A tabela de roteamento foi construída em folha de cálculo do Microsoft Excel e é importada para MATLAB a cada execução do simulador. A tabela pode ser visualizada na figura 35.

	1	...	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0		0	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
2	0		0	35	35	34	34	34	34	34	34	34	34	35	35
3	0		0	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
4	0		0	37	37	37	37	36	36	36	36	36	36	36	36
5	0		0	13	13	13	13	13	13	23	24	25	26	13	13
6	0		0	14	14	14	14	14	14	23	24	25	26	14	14
7	0		0	13	13	13	13	21	22	13	13	25	26	13	13
8	0		0	14	14	14	14	21	22	14	14	25	26	14	14
9	0	⋮	0	13	13	13	13	21	22	23	24	13	13	13	13
10	0		0	14	14	14	14	21	22	23	24	14	14	14	14
11	0		0	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
12	0		0	32	32	32	32	33	33	33	33	33	33	33	33
13	0		0	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
14	0		0	30	30	31	31	31	31	31	31	31	31	30	30
15	0		0	0	0	0	0	21	0	23	0	25	0	0	0
16	0		0	0	0	0	0	0	22	0	24	0	26	0	0
17	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...								....							
29	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0		0	32	32	0	0	0	0	0	0	0	0	27	28
31	0		0	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	27	28
32	0		0	17	18	34	34	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0		0	17	18	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
34	0		0	0	0	19	20	36	36	36	36	36	36	0	0
35	0		0	37	37	19	20	37	37	37	37	37	37	37	37
36	0		0	0	0	0	0	15	16	15	16	15	16	30	30
37	0		0	31	31	31	31	15	16	15	16	15	16	31	31

Figura 35 - Tabela de roteamento.

A consulta da tabela processa-se de forma simples. As linhas da tabela representam a faixa de origem enquanto as colunas representam a faixa de destino. Se por exemplo, o percurso pretendido tiver origem na faixa 1 e tiver como destino a faixa 17, então o segundo segmento do percurso é o elemento (1,17) da matriz (os índices da tabela, fundo a amarelo, são excluídos desta numeração), neste caso 35. O seguinte segmento será o elemento (35,17), segmento 37, seguido do elemento (37,17), segmento 31, seguido do elemento (31,17), segmento 33, chegando por fim ao elemento (33,17) que é o objectivo final da trajectória, o segmento 17. Temos então que a trajectória 1→17 é constituída pelos segmentos 1→35→37→31→33→17.

## C. Vector de estados usado na fusão sensorial

O estado do processo estimado pela *toolbox* é descrito por dezoito parâmetros diferentes, sendo eles:

1. Posição em X
2. Posição em Y
3. Posição em Z
4. Velocidade em X
5. Velocidade em Y
6. Velocidade em Z
7. Ângulo de rotação em X
8. Ângulo de rotação em Y
9. Ângulo de rotação em Z
10. *Bias* nos acelerómetros em X (referencial do corpo)
11. *Bias* nos acelerómetros em Y (referencial do corpo)
12. *Bias* nos acelerómetros em Z (referencial do corpo)
13. *Bias* nos giroscópios em X (referencial do corpo)
14. *Bias* nos giroscópios em Y (referencial do corpo)
15. *Bias* nos giroscópios em Z (referencial do corpo)
16. *Bias* em X na posição estimada via GPS
17. *Bias* em Y na posição estimada via GPS
18. *Bias* em Z na posição estimada via GPS

## D. Cenários usados nos testes individuais

Para proceder ao estudo da influência de cada sistema de gestão, separadamente, o cenário da simulação foi modificado por forma a obter dois cenários onde apenas são consideradas os segmentos que dão acesso a cada uma das soluções usadas para regular intersecções (rotunda e cruzamento), tal como mostra a Figura 36.



Figura 36 – Cenários utilizados para avaliação individual dos sistemas de gestão: a) Rotunda; b) Cruzamento.

## E. Interface

### Interface

Para facilitar a utilização do simulador por parte de qualquer utilizador (com conhecimentos básicos na área de ITS), foi construído um *interface* onde é possível configurar os parâmetros de maior relevância. Para um maior conforto do utilizador o *interface* carrega todas as configurações necessárias por omissão, ficando ao critério deste alterar ou não as mesmas. O *interface* foi realizado em inglês para que seja acessível a um maior número de utilizadores caso o mesmo venha a ser disponibilizado futuramente.

Segue uma explicação resumida das funcionalidades de cada painel do *interface* indicado na Figura 37.

### Painel 1 – Configurações gerais

Neste painel é possível configurar o número máximo de veículos que podem ser inseridos no simulador, o tempo da simulação e é ainda possível activar ou desactivar os sistemas de gestão do cruzamento e da rotunda.

## Painel 2 – Opções

Neste painel é possível activar/desactivar diversas opções de visualização para quando o simulador é executado em modo *on-line* (modo em que é possível monitorizar o movimento dos veículos no cenário). Podem também ser seleccionados os métodos de posicionamento activos e as suas frequências, assim como modificar os fluxos de tráfego. Para cada módulo desenvolvido é possível configurar uma série de opções particulares.

## Painel 3 – Comandos da simulação

Além de dar início à simulação, este painel permite ainda seleccionar entre o modo *on-line* e *off-line*. Existe também um botão de *reset* que deve ser usado caso o utilizador interrompa a simulação a meio da execução e que reinicia todo o *interface* carregando os valores por omissão.

## Painel 4/5 – Opções de visualização *off-line*

A partir destes dois painéis é possível salvar um conjunto de dados que permite uma visualização em tempo-real da simulação (após o processamento) e é possível até exportar esses dados para um ficheiro para que possam ser visualizados mais tarde. Como tal está também disponível a opção para carregar os ficheiros guardados e efectuar a sua visualização.



Figura 37 – Interface do simulador

## F. Notas sobre o simulador

- Para uma perspectiva mais realista, é admitido que o carro se encontra em movimento antes de entrar no simulador. Como tal os métodos de posicionamento são usados num percurso em que o veículo efectua um percurso em movimento rectilíneo uniforme onde não são consideradas quaisquer restrições ao movimento dos veículos.
- É possível seleccionar qualquer resolução para as grelhas de ocupação utilizadas tornando possível obter uma maior precisão na detecção de colisões nos métodos de gestão de tráfego embora resoluções elevadas apresentem um elevado custo computacional.
- Caso seja pretendida uma simulação com um elevado número de veículos aconselha-se a utilização do modo *off-line* de modo a minimizar o tempo de espera.
- Foram utilizados *ghosts* (que podem ou não ser activados) para simbolizar as estimativas obtidas pelos métodos de posicionamento para um maior conforto do utilizador.

## G. Teste com medidor de distâncias laser

Para mostrar o funcionamento do módulo LRF foram executados dois testes onde são monitorizadas as distâncias medidas pelo LRF que diferem na presença de outros veículos no simulador. Os dados foram recolhidos enquanto um veículo efectua o percurso entre os seguimentos 1 e 12. As configurações usadas no laser foram de 30 metros para o alcance, e uma abertura de 180°. De modo a facilitar a visualização dos dados recolhidos, na Figura 38 e a Figura 39 apenas é representado um dos feixes emitidos pelo LRF, sendo o feixe escolhido aquele que se situa a 90°.

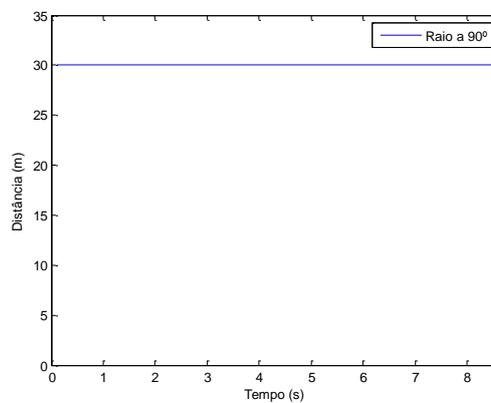


Figura 38 – Resultados obtidos para o feixe a 90° do LRF sem outros carros no simulador.

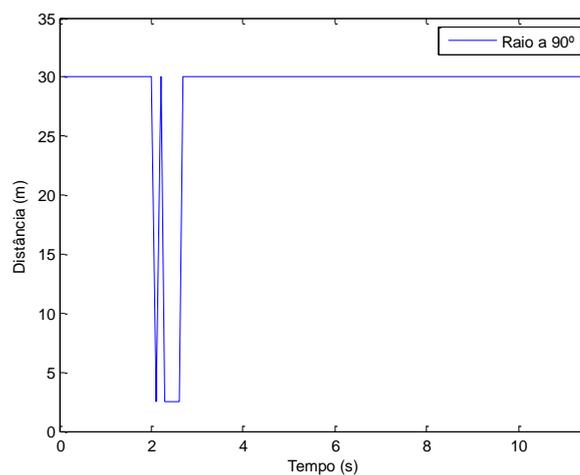


Figura 39 - Resultados obtidos para o feixe a 90° do LRF com outros carros no simulador.