

Framework para análise de dados viários na cidade do Porto

ANTÓNIO DOMINGOS DIAS SANTOS

julho de 2023

***Framework* para análise de dados viários na cidade do Porto**

António Domingos Dias Santos



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2023

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: António Domingos Dias Santos, Nº 1171178, 1171178@isep.ipp.pt
Orientação científica: Carla Manuela Alves Pinto, cap@isep.ipp.pt
Empresa: Câmara Municipal do Porto
Supervisão: Bruno Miguel Aires Eugénio, brunoeugenio@cm-porto.pt



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

26 de julho de 2023

Agradecimentos

Esta dissertação é um dos feitos mais importantes que levei a cabo, sendo possível graças ao suporte de muitas pessoas que me são queridas e que me prestigiam.

Começo por expressar os mais sinceros agradecimentos aos meus pais e irmã pelo amor e apoio incondicional que me proporcionaram desde que me lembro. Foram eles que possibilitaram que eu frequentasse o ensino superior e sem o apoio da minha família não seria possível a realização deste trabalho. Estendo um muito obrigado à minha madrinha, avós, tios e primos por todo o carinho dado.

Deixo uma salva a todos os meus amigos pelo apoio e motivação prestados, estando sempre presentes para alegrar o meu dia.

Agradeço à Câmara Municipal do Porto pela oportunidade de realização do estágio curricular. Um obrigado a todas as pessoas do Departamento Municipal da Mobilidade. Em especial grato ao Engenheiro Bruno Eugénio, supervisor do estágio na Câmara Municipal do Porto, que formulou a proposta de projeto inicial e aceitou-me como seu orientando, demonstrando-se sempre atento e disponível no decorrer do estágio para transmissão de conhecimentos. Estendo a minha gratidão aos meus colegas de sala que criam ótimo ambiente de trabalho, destacando os meus colegas Tiago Lopes e André Ribeiro pelo auxílio mais técnico, assim como à Engenheira Cristina Vilarinho pela sua disponibilidade.

Estou extremamente grato à Dr. Carla Pinto, a orientadora do estágio por parte do Instituto Superior de Engenharia do Porto, que me permitiu o contacto inicial entre mim e a Câmara Municipal do Porto, sendo que se revelou imprescindível para a realização deste trabalho. O seu acompanhamento do projeto com dedicação, entusiasmo e rigor levou a que me mantivesse disciplinado e focado no decorrer do trabalho em curso.

Gostava de agradecer aos profissionais do Instituto Superior de Engenharia do Porto com que tive o prazer de conhecer ao longo destes anos. Da jornada que fiz nesta instituição levo competências profissionais e pessoais para a vida.

Resumo

A criação de meios de transporte revela-se como um dos mais importantes marcos históricos da humanidade. Destaca-se a invenção do automóvel que levou à proliferação das estradas e infraestruturas adjacentes usadas para suportar estes. Com a crescente utilização dos veículos dentro das cidades, principalmente nos últimos 100 anos, a engenharia de tráfego para regulação das condições de circulação urbanas assumiu cada vez um papel de maior relevo. Com o avanço tecnológico, foram desenvolvidos os sistemas inteligentes de transportes, implementando, entre outros dispositivos, detetores de tráfego para medições do comportamento dos veículos nas vias de circulação. Estes registos resultam numa grande quantidade de dados que por vezes carecem de análise e tratamento lógico.

A presente dissertação, realizada na Divisão Municipal de Gestão da Mobilidade da Câmara Municipal do Porto, propõe e desenvolve uma ferramenta para análise, tratamento e visualização dos dados viários provenientes do sistema de gestão central de tráfego implementado na cidade do Porto. Este sistema, que veio substituir um modelo prévio, inclui atualmente 153 controladores de tráfego, dos quais 3 novos em cruzamentos centralizados, com tendência crescente. Cada controlador de tráfego regista as medições efetuadas pelos sensores de tráfego adjacentes às interseções, as espiras eletromagnéticas, fornecendo informação acerca do débito de tráfego, assim como a percentagem de ocupação de cada detetor.

Deste trabalho culminou a implementação da aplicação VIA, desenvolvida na linguagem de programação *Python*. Numa primeira fase, através de uma interface gráfica, apresenta-se ao utilizador os cruzamentos centralizados. Refere-se que este é um projeto-piloto, implementado sobre os controladores de tráfego da Rua da Constituição, disponibilizando efetivamente apenas 8 cruzamentos para consulta. De seguida, apresenta-se um menu para inserir os parâmetros de consulta, como o intervalo de consulta, formato de apresentação e se pretende corrigir as leituras excessivas, designadas como registos *outliers*. De forma simultânea, apresenta-se uma janela com a planta do cruzamento, disponibilizando a seleção

de uma ou mais espiras a consultar. O utilizador, ao confirmar a sua seleção, faz com que o programa prossiga a recolha dos dados a partir do sistema de gestão central de tráfego e após o tratamento para valores *outliers* ou em falta, apresenta uma janela com um gráfico referente à percentagem de ocupação e outro com a contagem dos veículos da(s) espira(s) selecionada(s). Os resultados obtidos com esta aplicação encontram-se demonstrados neste relatório, cumprindo com os objetivos inicialmente propostos e validando o trabalho desenvolvido. Salienta-se que cada passo do processo de consulta é sujeito a verificações internas por parte do programa.

Palavras-Chave: Engenharia de tráfego, Sistemas Inteligentes de Transporte, Análise de grandes volumes de dados, *Python*, Câmara Municipal do Porto, VIA

Abstract

The creation of means of transportation proves to be one of humanity's most important historical milestones. Noteworthy is the invention of the automobile which its success led to the proliferation of roads and adjacent infrastructure used to support these. With the increasing use of vehicles within cities, especially in the last 100 years, traffic engineering to regulate urban traffic conditions has taken on a greater and greater role. With technological advances, intelligent transportation systems have been developed, implementing, among other devices, traffic detectors for measuring the behavior of vehicles on the roadways. These records result in a large amount of data that sometimes needs analysis and logical treatment.

This dissertation, carried out at the Municipal Mobility Management Division of the Porto City Hall, proposes and develops a platform for the analysis, processing and visualization of road data from the central traffic management system implemented in the city of Porto. This system, which replaced a previous model, currently includes 153 traffic controllers, of which 3 new ones at centralized intersections, with a growing trend. Each traffic controller registers the measurements made by traffic sensors adjacent to the intersections, the inductive loop sensor, providing information about the traffic flow, as well as the percentage of occupancy of each detector.

This work culminated in the implementation of the VIA application, developed in Python programming language. In a first stage, through a graphical interface, the centralized intersections are presented to the user. It should be noted that this is a pilot project, implemented on the traffic controllers of Rua da Constituição, making only 8 intersections available for consultation. Next, a menu is presented to insert the query parameters, such as the query interval, display format and whether to correct readings of excessive value, designated as outlier records. Simultaneously, a window with the intersection is presented, allowing the selection of one or more inductive loop sensors to be consulted. The user, by confirming his selection, makes the program proceed to collect data from

the central traffic management system and after treatment for outliers or missing values, presents a window with a graph referring to the percentage of occupancy and another with the vehicle count of the selected inductive loop sensor. The results obtained with this application are demonstrated in this report, fulfilling the initially proposed objectives and validating the developed work. It should be noted that each step of the query process is subject to internal checks of the program.

Keywords: Traffic engineering, Intelligent Transportation Systems, Big data analysis, Python, Porto City Hall, VIA

Índice

Agradecimentos	v
Índice	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vii
Acrónimos	ix
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	4
1.2 Objetivos	4
1.3 Calendarização	5
1.4 Organização do Relatório	5
2 Local de realização do projeto	7
2.1 Câmara Municipal do Porto	7
2.1.1 Edifício Paços do Concelho do Porto	8
2.1.2 Estrutura organizacional	9
2.1.3 Departamento Municipal da Mobilidade	12
2.1.4 Divisão Municipal de Gestão da Mobilidade	12
3 Revisão bibliográfica	15
3.1 Engenharia de transportes	15
3.1.1 Contextualização histórica	17
3.2 Engenharia de tráfego	21
3.2.1 Mobilidade urbana	23
3.2.1.1 Desafios da mobilidade urbana	23
3.2.1.2 Evolução da hierarquia da mobilidade urbana	24
3.2.2 Sistemas Inteligentes de Transporte	25

3.2.2.1	Evolução dos sistemas inteligentes de transporte . . .	26
3.2.2.2	Sensores	28
3.2.2.3	Categorias	35
3.2.3	Casos de estudo	38
3.2.3.1	GERTRUDE na cidade do Porto	39
3.2.3.2	<i>C-Roads</i> e <i>C-Streets</i> na cidade do Porto	39
4	Fundamentos teóricos e desenvolvimento	45
4.1	Modelos de previsão de tráfego	45
4.1.1	Matriz de origem-destinos	46
4.1.2	Representação da rede de transportes	47
4.2	Modelos de simulação de tráfego	47
4.2.1	Modelo macroscópico	48
4.2.1.1	Débito	49
4.2.1.2	Velocidade média	49
4.2.1.3	Densidade	50
4.2.1.4	Taxa de ocupação	50
4.2.1.5	Relação fundamental das correntes de tráfego . . .	51
4.2.2	Modelo mesoscópico	51
4.2.3	Modelo microscópico	52
4.2.3.1	Tempo entre veículos	53
4.2.3.2	Distância entre veículos	53
4.2.3.3	Velocidade individual	53
4.2.4	Escala temporal	54
4.2.5	Representação do processo	54
4.3	Metodologia de identificação de <i>outliers</i>	54
4.3.1	Definição de <i>outliers</i>	55
4.3.2	Análise de <i>outliers</i>	55
4.3.3	Técnicas de deteção de <i>outliers</i>	55
4.4	Problema proposto	56
4.5	Análise de dados	57
4.5.1	Dados de origem	57
4.5.2	Tratamento dos dados	60
4.6	Implementação	62
4.6.1	Linguagem de programação	62
4.6.2	Etapas do programa desenvolvido	63
5	Resultados	67
5.1	Utilização da aplicação	67
5.1.1	Interface do menu interativo inicial de consulta	67
5.1.2	Mapa interativo da planta de cruzamento	70
5.1.3	Menu de seleção de parâmetros para consulta	72

5.1.3.1	Espiras selecionadas	73
5.1.3.2	Selecione a data de início	73
5.1.3.3	Selecione a hora de início	74
5.1.3.4	Selecione a data de fim	74
5.1.3.5	Selecione a hora de fim	74
5.1.3.6	Selecione apresentação do número de veículos . . .	75
5.1.3.7	Limitar outliers	75
5.1.3.8	Gráficos	76
5.1.3.9	Abrir Planta	79
5.2	Janela de gráficos	79
5.2.1	Características transversais dos gráficos	79
5.2.2	Consulta a única espira	80
5.2.3	Consulta a múltiplas espiras	82
5.2.4	Limitador de <i>outliers</i>	84
5.2.5	Leituras em falta	86
5.2.6	Primeiras leituras de um controlador	88
6	Conclusões	91
6.1	Síntese geral e principais conclusões	91
6.2	Desafios encontrados	92
6.3	Melhorias e implementações futuras	93
6.3.1	Definição dinâmica de <i>outliers</i>	93
6.3.2	Mapeamento de imagens com recurso a um algoritmo . . .	95
6.3.3	Implementação em base de dados	95
	Referências Bibliográficas	97
A	Anexo A	107
B	Anexo B	109
C	Anexo C	117
D	Anexo D	119

Índice de Figuras

1.1	Diagrama de entradas e saídas de transporte (adaptado)[1].	2
1.2	Gráfico <i>Gantt</i> com o plano de trabalhos do projeto.	5
2.1	Bandeira do município do Porto[2].	8
2.2	Fachada principal da Paços do Concelho do Porto, com destaque à escultura em homenagem ao escritor portuense Almeida Garrett[3]. . .	9
2.3	Organograma da Câmara Municipal do Porto (Parte 1 de 2)[4].	10
2.4	Organograma da Câmara Municipal do Porto (Parte 2 de 2)[4].	11
2.5	Organograma do Departamento Municipal da Mobilidade[4].	12
3.1	<i>New York - Welcome to the land of freedom</i> : Imigrantes alemães num navio a vapor passando a Estátua da Liberdade[5].	16
3.2	Estrada Real Persa, construída para facilitar a comunicação rápida em todo o Império Aqueménida (adaptado)[6].	18
3.3	Segmento da <i>Via Appia</i> , na antiga cidade de Minturno[7].	19
3.4	Ilustração da construção da primeira estrada <i>macadam</i> nos Estados Unidos, em 1823[8].	20
3.5	O Sistema Rodoviário Interestadual, em 2008. As áreas metropolitanas estão destacadas a sombreado[9].	21
3.6	Inversão do triângulo de mobilidade urbana (adaptado)[10].	25
3.7	Modelo conceptual dos SIT (adaptado)[11][12].	26
3.8	História do desenvolvimento dos sistemas SIT[13].	27
3.9	Sensores intrusivos[14].	29
3.10	Exemplos de sensores intrusivos	31
3.11	Sensores não intrusivos[14].	32
3.12	Exemplos de sensores não-intrusivos	34
3.13	Sensores combinados	35
3.14	Zonas de funcionamento do sistema GERTRUDE na cidade do Porto[15].	40
4.1	Exemplo genérico de matriz OD[16](adaptado).	46

4.2	Exemplo genérico de uma rede de transportes[17].	47
4.3	Nível de detalhe[18]	48
4.4	Diagrama espaço-tempo de dois veículos[19].	52
5.1	Ícone da aplicação VIA.	67
5.2	Janela de erro de conexão ao servidor.	68
5.3	Janela de erro de localização das plantas dos cruzamentos.	68
5.4	Interface inicial de consulta.	69
5.5	Janela de erro de falta de seleção de cruzamento.	69
5.6	Janela de erro de cruzamento sem planta disponível.	70
5.7	Exemplo de um mapa interativo de cruzamento.	71
5.8	Exemplo de seleção de uma espira no mapa interativo.	72
5.9	Exemplo de um menu de seleção de parâmetros de consulta.	73
5.10	Seleção para o parâmetro de registo de data.	74
5.11	Lista pendente do parâmetro de apresentação das contagens de veículos.	75
5.12	Lista pendente do parâmetro para limitar os valores <i>outliers</i>	76
5.13	Janela com erros em vários parâmetros.	77
5.14	Janela de erro de data e/ou hora de início.	77
5.15	Janela de leituras em falta.	77
5.16	Exemplo de uma janela de resultados, evidenciando a linha de sepa- rador de dias.	80
5.17	Exemplo de consulta a uma espira, com contagem de veículos estimada.	81
5.18	Exemplo de consulta a uma espira, com contagem de veículos real.	82
5.19	Exemplo de consulta a duas espiras, com contagem de veículos estimada.	83
5.20	Exemplo de consulta a duas espiras, com contagem de veículos real.	84
5.21	Exemplo de consulta com leituras <i>outliers</i> não limitadas.	85
5.22	Exemplo de consulta com leituras <i>outliers</i> limitadas.	86
5.23	Exemplo de consulta a uma espira, com falta de leituras.	87
5.24	Exemplo de consulta a uma espira, sem falta de leituras.	87
5.25	Exemplo de consulta a duas espiras, evidenciando a falta de valores.	88
5.26	Exemplo de um menu de parâmetros de consulta, de modo a incluir o intervalo de instalação do controlador de tráfego.	89
5.27	Exemplo da janela de gráficos para uma consulta que inclui o intervalo de instalação do controlador de tráfego.	90

Índice de Tabelas

3.1	Serviços do Projeto-Piloto C-ITS no Nó Urbano do Porto	41
3.1	Serviços do Projeto-Piloto C-ITS no Nó Urbano do Porto	42
4.1	Débito de saturação teórico máximo por tipo de zona[20].	61
6.1	Variáveis para determinar débito de saturação.	94

Acrónimos

- AG** Advisory Group. 35
- AHS** Automated Highway System. 26
- APD** Associação Porto Digital. 57
- API** Application Programming Interface. 57
- APTS** Advanced Public Transportation Systems. 36
- ARI** Autofahrer Rundfunk Informationssystem. 26
- ARTS** Advanced Rural Transportation Systems. 36
- ATIS** Advanced Traveler Information Systems. 36
- ATMS** Advanced Traffic Management Systems. 36
- AVCSS** Advanced Vehicle Control and Safety Systems. 36
- C-ITS** Cooperative Intelligent Transport Systems. 39
- C-Streets** Cooperative Streets. 42
- CACS** Comprehensive Automobile Control System. 27
- CCTV** Closed-Circuit Television. 13
- CMP** Câmara Municipal do Porto. 4
- CVO** Commercial Vehicle Operations. 36
- DEE** Departamento de Engenharia Electrotécnica. 4
- DNS** Domain Name System. 68
- DRIVE** Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe. 27

- ERGS** Electronic Route Guidance System. 26
- ERTICO** European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization. 27
- EUA** Estados Unidos da América. 20
- GERTRUDE** Gestão Eletrónica de Regulação do Tráfego Rodoviário. 39
- GPS** Global Positioning System. 37
- IEC** International Electrotechnical Commission. 36
- ISEP** Instituto Superior de Engenharia do Porto. 4
- ISO** International Standards Organization. 35
- ITE** Institute of Transportation Engineers. 21
- ITS** Intelligent Transportation Systems. 28
- JWG** Joint Working Group. 35
- LED** Light-Emitting Diode. 33
- LIDAR** Light Detection and Ranging. 33
- NAP** National Access Point. 42
- OSI** Open Source Initiative. 62
- OVC** Operações de Veículos Comerciais. 36
- PAN** Ponto de Acesso Nacional. 42
- PIL** Python Imaging Library. 63
- PMUS** Plano de Mobilidade Urbana Sustentável. 24
- PROMETHEUS** Program for a European Traffic System with Higher Efficiency and Unprecedented Safety. 27
- RACS** Road/Automobile Communication System. 28
- RTE-T** Rede Transeuropeia de Transportes. 40
- SAAE** Sistema Automatizado de Auto-Estradas. 36

SACSV Sistemas Avançados de Controlo e Segurança de Veículos. 36

SAGT Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego. 36

SAIV Sistemas Avançados de Informação para Viajantes. 36

SATP Sistemas Avançados de Transportes Públicos. 36

SATR Sistemas Avançados de Transportes Rurais. 36

SIT Sistemas Inteligentes de Transporte. 3

SPA Single Access Point. 40

SQL Structured Query Language. 96

SUMO Simulation of Urban MObility. 46

TC204 Technical Committee 204. 35

TEDI Tese/Dissertação. 4

TRACS Traffic Responsive Adaptive Control System. 28

TRC Traffic Responsive Capabilities. 27

V2I Vehicle to Infrastructure. 39

V2V Vehicle to Vehicle. 39

VICS Vehicle Intelligent Control System. 28

WG Working Group. 35

Capítulo 1

Introdução

Os meios de transportes movem pessoas e bens de um lugar para outro, desde que há registo da história do ser humano, utilizando uma variedade de veículos através de diferentes sistemas de infraestruturas. Para este efeito, tem-se em conta a tecnologia desenvolvida, nomeadamente os veículos e infraestruturas, assim como a manipulação de energia associada aos veículos, mas também o tempo e o esforço das pessoas envolvidas. Em consequências destes fatores, ocorrem os resultados esperados, como as viagens de passageiros e transporte de mercadorias. Porém, existem resultados adversos como poluição ambiental e sonora, congestionamento, colisões, ferimentos e fatalidades[21]. A interação entre os fatores condicionantes e respetivas consequências pode ser descrito, de forma sucinta, através de um sistema de entradas e saídas, como ilustra a Fig. 1.1.

O transporte de bens e pessoas revela-se como um sistema multi-disciplinar, onde as infraestruturas são a base da engenharia civil, enquanto que os veículos estão vinculados à engenharia mecânica. O estudo de interações de energia, na medida em que alimenta os veículos existentes, assim como a conceção de sistemas para reduzir o consumo de energia exige uma investigação interdisciplinar. Deste modo o sistema de transportes apresenta as seguintes entradas: infraestruturas (incluindo pavimentos, pontes, etc.), mão-de-obra necessária para produzir os elementos do transporte, terrenos onde assentam as infraestruturas, consumos energéticos e veículos[22].

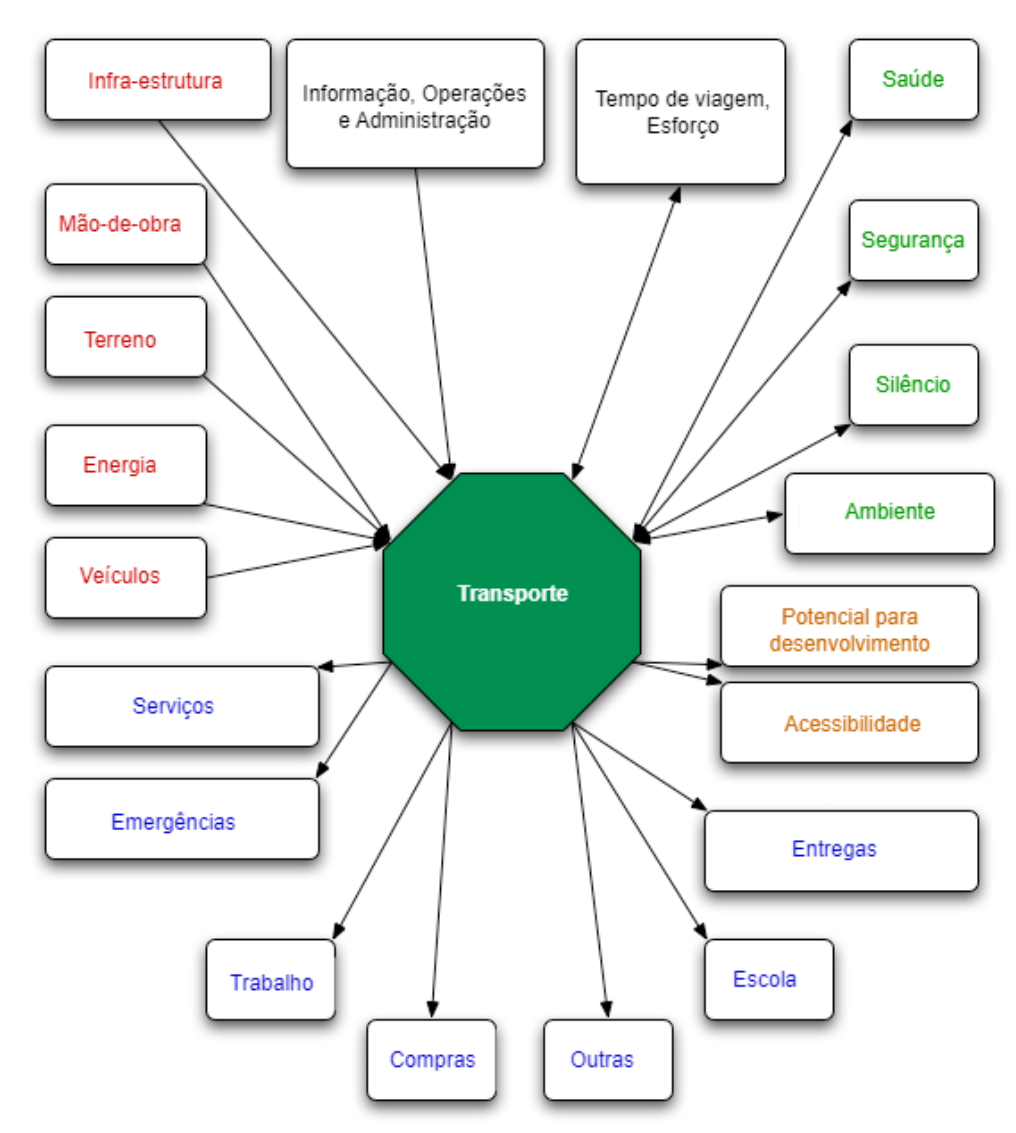


Figura 1.1: Diagrama de entradas e saídas de transporte (adaptado)[1].

Os sistemas de transporte servem e são criados por pessoas, tanto pelos proprietários dos sistemas como pelos operadores, que aplicam, gerem e mantêm o sistema, assim como pelos viajantes que o utilizam. Os seguintes fatores revelam-se críticos para a criação e manutenção do sistema de transporte: a informação, operação e gestão, assim como a consideração pelo tempo e esforço dos utilizadores do sistema. O tempo de viagem depende tanto do tempo de fluxo livre, que é um produto da concepção das infraestruturas, como do atraso devido ao congestionamento, que por sua vez é o resultado da interação entre a capacidade do sistema e a sua utilização[23].

Os sistemas de transporte são centrais para a atividade económica e para o quotidiano das pessoas, permitindo exercer as profissões, frequentar escolas, comprar alimentos e outros bens, etc. Estes são os resultados esperados de um sistema de transporte. Por conseguinte, um maior nível de operação de transportes num dado local, aumentando a acessibilidade a mais destinos, permite que as pessoas cumpram melhor os seus objetivos pessoais, resultando num desenvolvimento generalizado desse mesmo local. Todavia, implica custos mais elevados tanto a nível individual como social. Embora o problema do transporte seja frequentemente colocado em termos de congestionamento, esse atraso é apenas um custo de um sistema que tem muitos custos e ainda mais benefícios[24].

Apesar dos inúmeros benefícios que ocorrem com a implementação de um sistema de transporte, deve-se ter em conta os resultados adversos da utilização de transportes. Estes fatores estão a ser cada vez mais reconhecidos como custos de transporte, sendo os mais notáveis os efeitos ambientais, particularmente com preocupações sobre a mudança global do clima. Estes efeitos negativos podem ser expostos numa ótica de consumo de recursos:

- poluição ambiental, que deteriora saúde da população geral, levando ao aumento das taxas de morbilidade e mortalidade[25][26];
- perigos associados ao uso de transportes, que debilita um ambiente de segurança e podem levar a lesões e fatalidades[27][28];
- poluição sonora, retira sossego e produz ruído, diminuindo a qualidade de vida e aumento de níveis de *stress*[29][30];
- outros tipos de poluição, como poluição luminosa e poluição térmica, tendo um maior impacto na fauna e flora do que nos seres humanos[31][32].

Com a expansão da população mundial e dos centros urbanos, os fatores referidos são alvo de uma crescente importância. Segundo estimativas, a nível global, poderão existir cerca de 2.5 mil milhões de carros em 2050 a circular em estradas[33]. De modo a fornecer as melhores soluções possíveis face a todas estas condicionais, surge o conceito de engenharia de tráfego. Esta área de estudo abrange as práticas de planeamento, controlo e manutenção do tráfego, de modo a equilibrar a oferta e a procura, gerindo ao longo do tempo a oferta da infraestrutura rodoviária face à procura dos transportes. Para este fim, os Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT), proveniente do inglês *Intelligent Transportation Systems*, asseguram a implementação de tecnologias e normas, promovendo um fluxo de tráfego regular.

1.1 Contextualização

O presente trabalho, proposto no âmbito de TEDI (TEDI), unidade curricular do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores do Departamento de Engenharia Eletrotécnica (DEE), no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), surge como uma demonstração, por parte do estudante, de domínio e de conhecimentos consolidados nas várias áreas disciplinares do curso.

Este projeto, desenvolvido em colaboração com a Câmara Municipal do Porto (CMP), através de um estágio curricular, que visa a criação de uma ferramenta de análise, tratamento e visualização dos dados de tráfego da cidade do Porto, sendo que esta informação é fornecidos pelo sistema de gestão central de tráfego da CMP.

1.2 Objetivos

O projeto apresentado estabelece como principal objetivo a análise de dados de tráfego na cidade do Porto. Com este fim, propõem-se o desenvolvimento de uma aplicação para tratamento de dados provenientes do sistema de gestão de tráfego da CMP, assim como apresentação de resultados através de uma interface gráfica. De modo a fazer este tratamento de dados, aplica-se o conceito de valores *outliers* às séries registos de tráfego efetuados pelo detetores presentes nas vias de circulação.

A aplicação deve permitir uma consulta de dados de tráfego de forma simplificada, fornecendo ao utilizador opções de adaptar os parâmetros de pesquisa. O trabalho apresentado estabelece-se como um projeto-piloto, sendo desta forma restrito quanto à sua abrangência. Neste sentido, foi decidido que deverá permitir no mínimo a consulta dos cruzamentos adjacentes à Rua da Constituição, formando um total de 8 cruzamentos em análise.

Os resultados obtidos através deste projeto deverão ser de clara interpretação para quem seja da área de engenharia de tráfego, tendo em consideração que a presente aplicação apresenta-se como uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão a ser utilizada na CMP.

1.3 Calendarização

O gráfico *Gantt* ilustrado na Figura 1.2 sumariza o plano de trabalhos para este projeto.

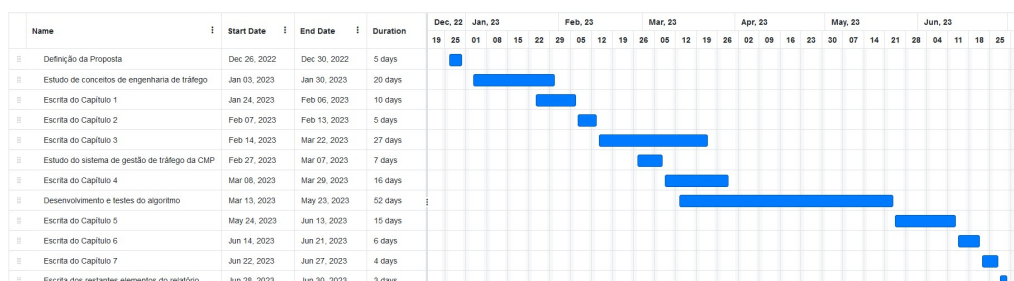


Figura 1.2: Gráfico *Gantt* com o plano de trabalhos do projeto.

1.4 Organização do Relatório

No Capítulo 1, procede-se com uma introdução geral ao trabalho a ser exposto, descrevendo a importância dos transportes e da gestão efetiva destes, assim como as implicações de uso. Neste capítulo aborda-se, de forma sucinta, o conceito de engenharia de tráfego e os sistemas inteligentes de transporte, incluindo ainda a definição de objetivos e da metodologia a seguir na elaboração do presente relatório.

No capítulo seguinte, 2, faz-se a apresentação do local onde este projeto foi desenvolvido, sendo esta a Câmara Municipal do Porto. Numa primeira etapa introduzem-se os símbolos do município do Porto, assim como o edifício sede, o local efetivo onde se realizou o trabalho. Por último, é apresentada a estrutura orgânica da CMP, incidindo essencialmente na direção e consequente divisão municipal que albergou este projeto.

O capítulo 3, abrange a introdução da engenharia de transportes, com a devida contextualização histórica. Neste sentido, realiza-se a apresentação da engenharia de tráfego, o conceito de mobilidade urbana e dos sistemas inteligentes de transporte, contando ainda com a descrição de casos de estudo.

No capítulo 4, efetua-se a apresentação de fundamentos teóricos essenciais para o projeto, contemplando a descrição dos modelos de previsão de tráfego e dos modelos de simulação de tráfego. Em seguida, procede-se com a explicação do conceito de valores *outliers*. Este capítulo contempla ainda com a exposição do problema que o trabalho propõe combater, procedendo com os métodos utilizados para este fim. Este capítulo ainda contém uma descrição detalhada das opções e passos realizados ao longo do desenvolvimento do programa base.

No capítulo 5, procede-se com a validação do desenvolvimento e conseguinte implementação, fazendo uso de um guia com amostras de resultados para utilização da aplicação.

No último capítulo, o 6º, são reunidas as principais conclusões e perspectivas futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

Local de realização do projeto

Neste capítulo apresenta-se onde se realizou o projeto-estágio. Inicialmente, é feito um enquadramento cultural da organização, passando pela introdução histórica do local de estágio. Procede-se com a exposição da estrutura organizacional e os objetivos das unidades orgânicas em cooperação com o projeto.

2.1 Câmara Municipal do Porto

A Câmara Municipal do Porto é o órgão executivo colegial representativo do município do Porto, tendo por missão definir e executar políticas que promovam o desenvolvimento do concelho. A Câmara Municipal do Porto é a segunda maior do país, sendo composta por 13 vereadores, representando diferentes forças políticas. A atual vereação portuense tomou posse em 20 de outubro 2021, com base nas eleições autárquicas de 26 de setembro desse ano, sendo presidida por Rui de Carvalho de Araújo Moreira, do partido independente "Rui Moreira - Aqui há Porto!"[34].

Na bandeira da cidade, apresentada na Fig. 2.1, o brasão da cidade tem inscrito a expressão *Antiga, Mui Nobre, Sempre Leal e Invicta Cidade do Porto*, referente à bravura dos portuenses em momentos marcantes da sua história. Esta expressão advém de um decreto escrito por Almeida Garrett e assinado pela rainha D. Maria II em 1835, que acrescentou novos elementos às Armas do Porto: *as armas sejam esquarteladas com as do reino e tenham ao centro, num escudete de púrpura o coração de oiro de D. Pedro, sobrepostas por uma coroa de duque, tendo por timbre o "Dragão negro das antigas Armas dos senhores Reis destes reinos", e junte aos seus títulos o de Invicta*[35].



Figura 2.1: Bandeira do município do Porto[2].

2.1.1 Edifício Paços do Concelho do Porto

O edifício dos Paços do Concelho do Porto é o edifício sede do Município do Porto, cuja construção teve início em 1920, conforme projeto do arquiteto António Correia da Silva, tendo sido inaugurado em 24 de junho 1957, sobre direção do arquiteto Carlos Ramos e após inúmeras alterações ao projeto inicial. A construção do edifício, no topo da Avenida dos Aliados, na praça General Humberto Delgado, surgiu devido a uma requalificação da zona urbana pelo Decreto de 31 de dezembro de 1864. Para a realização da obra, procedeu-se a demolição de todo o edificado entre a Praça da Liberdade e a Praça da Trindade, dando espaço a um jardim e um novo edifício dos Paços do Concelho[3].

O edifício Paços do Concelho é do estilo arquitetónico neoclássico, apresentando semelhanças com os palácios do norte da França e da Flandres, com uma torre central que atinge os setenta metros de altura, na qual está inserido um relógio de carrilhão. Este edifício é construído em granito, composto por uma cave, seis pisos e dois pátios interiores. Do exterior, apresenta amplas portas, janelas e varandas, sendo rematado por entablamento com balaústres e jarrões apoiados em cariátides inspiradas da arquitetura da antiga Grécia[3].

Como apresentado na Fig. 2.2, em frente ao edifício da Câmara Municipal do Porto encontra-se o monumento a Almeida Garrett (1799 — 1854), um dos grandes impulsionador do teatro em Portugal, tendo sido inaugurada a 11 de Novembro de 1954, para assinalar o centenário da morte do poeta, realizada em bronze pelo escultor Salvador Barata Feyo[36].



Figura 2.2: Fachada principal da Paços do Concelho do Porto, com destaque à escultura em homenagem ao escritor português Almeida Garrett[3].

2.1.2 Estrutura organizacional

A câmara municipal do porto encontra-se dividida em várias unidades orgânicas, abrangendo direções, departamentos, divisões e gabinetes municipais. Na Fig. 2.3 e Fig. 2.4 está representado o organograma da câmara municipal do porto, conforme estipulado no Despacho nº5602/2022, publicado na 2ª Série no Diário da República a 6 de maio de 2022[4].

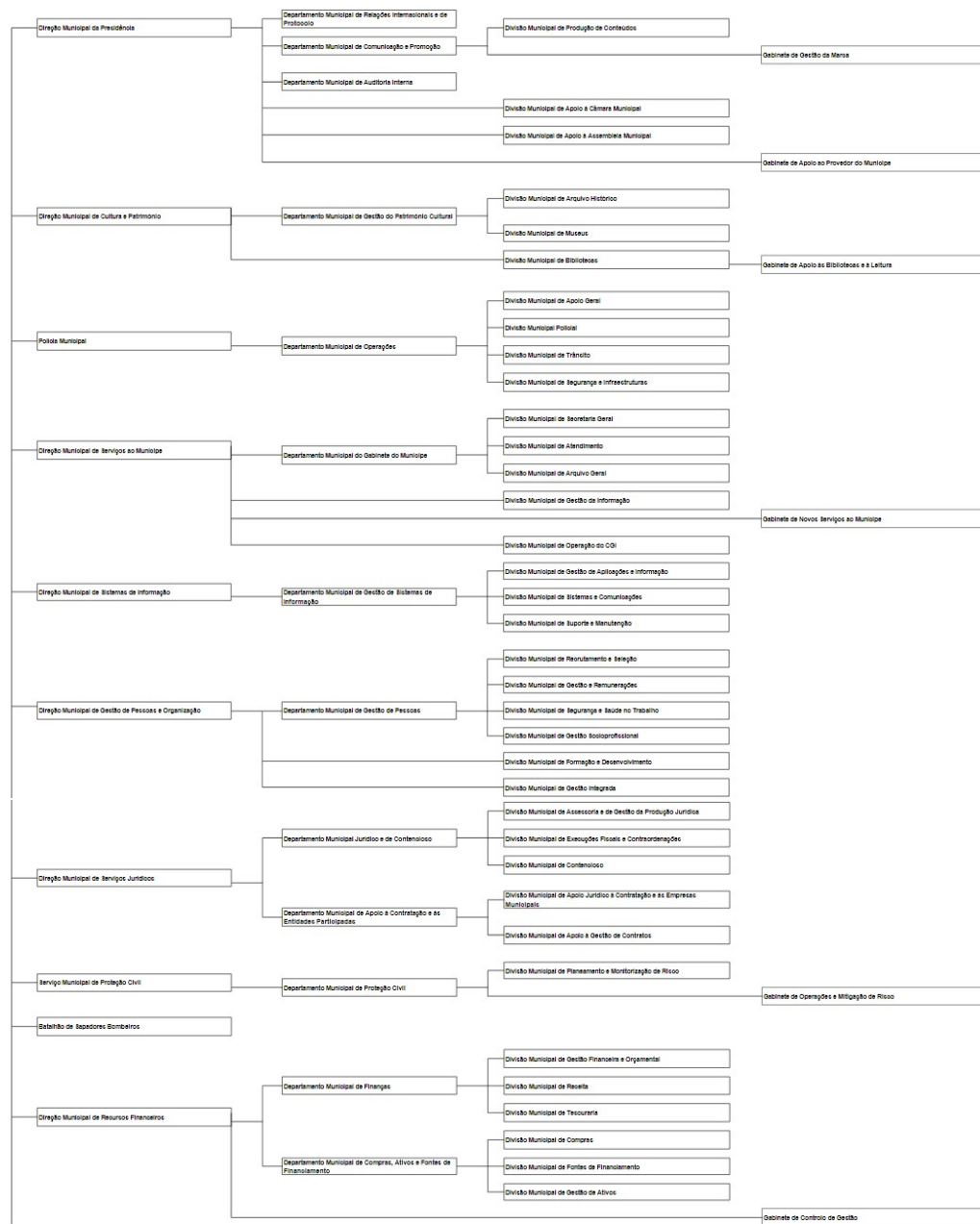


Figura 2.3: Organograma da Câmara Municipal do Porto (Parte 1 de 2)[4].



Figura 2.4: Organograma da Câmara Municipal do Porto (Parte 2 de 2)[4].

2.1.3 Departamento Municipal da Mobilidade

De entre as diversas unidades orgânicas, destaca-se o Departamento Municipal da Mobilidade no contexto deste projeto. Por sua vez, este departamento encontra sob sua alçada três divisões municipais: Divisão Municipal de Planeamento da Mobilidade, Divisão Municipal da Gestão da Mobilidade e Divisão Municipal de Sinalização de Trânsito. A estrutura orgânica do Departamento Municipal da Mobilidade, convencionada pelo Despacho nº5602/2022, encontra-se representada na Fig. 2.5.

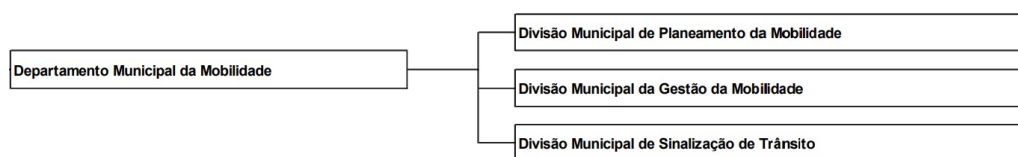


Figura 2.5: Organograma do Departamento Municipal da Mobilidade[4].

Segundo o Despacho nº5602/2022, o Departamento Municipal da Mobilidade tem a seu encargo as seguintes competências[4]:

- a) Implementar as estratégias e políticas de mobilidade definidas pelo Executivo Municipal bem como monitorizar e avaliar a sua execução;
- b) Promover o acompanhamento, alteração e revisão do contrato de obrigações de serviço público celebrado com a STCP;
- c) Gerir o sistema de informação sobre a mobilidade urbana, garantindo a sua permanente atualização;
- d) Gerir a utilização da infraestrutura viária e os contratos referentes ao estacionamento;
- e) Promover e gerir os estudos na área da mobilidade urbana;
- f) Gerir os sistemas inteligentes de gestão de mobilidade e tráfego;
- g) Assegurar a articulação com os outros serviços municipais e com as diferentes entidades intervenientes nas políticas de mobilidade;
- h) Dinamizar o uso dos transportes públicos e promover a transferência modal.

2.1.4 Divisão Municipal de Gestão da Mobilidade

O presente projeto foi desenvolvido na Divisão Municipal de Gestão da Mobilidade, através de um estágio curricular. De acordo com o Despacho nº5602/2022, à Divisão Municipal de Gestão da Mobilidade compete[4]:

- a) Administrar os sistemas inteligentes de gestão de mobilidade e tráfego;
- b) Apreciar os projetos de sinalização luminosa, CCTV, controlo de acessos e infraestruturas associadas no âmbito do controlo prévio de operações urbanísticas;
- c) Elaborar e implementar os projetos de sinalização luminosa (e respetiva micro simulação), CCTV, controlo de acessos e infraestruturas associadas de iniciativa municipal;
- d) Desenvolver ferramentas de apoio à interoperabilidade entre os subsistemas mencionados na alínea a);
- e) Gerir e executar os contratos de fornecimento e de prestação de serviços;
- f) Gerir e executar contratos de manutenção e assistência técnica de infraestruturas e instalações técnicas, nos quais se incluem os túneis;
- g) Apreciar pedidos de licenciamento de condicionamento de trânsito e de circulação de pesados.

Capítulo 3

Revisão bibliográfica

Neste capítulo introduz-se a engenharia de transportes, com a devida contextualização histórica. Procede-se com a apresentação da engenharia de tráfego, o conceito de mobilidade urbana e os adjacentes sistemas inteligentes de transporte, com a devida apresentação da sua evolução. Segue-se a exposição da classificação de sensores e categorização, concluindo com a exibição de casos de estudo.

3.1 Engenharia de transportes

O desenvolvimento da civilização humana tem sido caracterizado pela constante migração da população. Ao longo de toda a história registada do ser humano, vários grupos étnicos, em busca de uma vida melhor, viajaram, exploraram e habitaram regiões, até à época, inexploradas, estabelecendo novas povoações e diversificando culturas. As sucessivas migrações levaram a mudanças nas características raciais, étnicas, linguísticas, económicas e culturais da população[37].

A maior migração intercontinental da história humana ocorreu no período entre a Guerra Civil Americana e a Primeira Guerra Mundial, quando milhões de pessoas da Europa atravessaram o Oceano Atlântico com destino aos Estados Unidos da América (Fig. 3.1), sendo possibilitada pelos avanços tecnológicos na área de transporte de pessoas e bens[38].

A necessidade do transporte evoluiu a partir de diversas atividades do quotidiano. As pessoas viajam por razões comerciais, profissionais, culturais ou pessoais. Milhares de veículos e passageiros que viajam de um lugar para outro criam fluxos de carros nas auto-estradas, bicicletas nas ruas, pessoas nas estações de autocarros e metro, peões nos cruzamentos e aviões nas pistas dos aeroportos. Os fluxos de passageiros e de carga são as consequências da interação entre várias regiões[39].



Figura 3.1: *New York - Welcome to the land of freedom*: Imigrantes alemães num navio a vapor passando a Estátua da Liberdade[5].

A essência da engenharia de transportes assenta na análise e conceção de sistemas de transporte. Os engenheiros de tráfego são constantemente confrontados com a questão de como planejar, conceber e manter um sistema de transporte de alta qualidade e habitabilidade. A engenharia de transportes engloba várias etapas: planeamento, conceção, operações, controlo, gestão, serviços, componentes, manutenção e reabilitação de sistemas de transporte. Deste modo, fazem parte da engenharia de transportes as sub-áreas referentes ao planeamento do transporte, comportamento do utilizador (tipicamente designado como viajante), conceção e análise de redes de transporte, análise e controlo dos fluxos de tráfego, análise de filas de espera, gestão da cadeia de abastecimento, entre outros[37].

Para que haja um bom funcionamento dos sistemas de transporte, a prática de engenharia de transportes tem por consideração a tecnologia existente, matemática, física, ciência computacional, ciências sociais e o património cultural. Existe uma elevada exigência na escolha dos métodos inerentes à engenharia de transportes, pois estes têm um elevado impacto no desempenho dos sistemas de transporte, que tem por métricas o nível de serviço, capacidade, segurança, fiabilidade, consumo de recursos, ambiente, economia, etc[37].

A ciência de transporte e a engenharia de transportes oferecem várias técnicas relacionadas com a modelização dos transportes, planeamento de transportação e controlo de tráfego. Estas técnicas devem ser utilizadas para previsão da procura, planeamento de novas redes de transporte e desenvolvimento de estratégias de controlo de tráfego. A gama de conceitos e métodos de engenharia deve ser utilizada para tornar os futuros sistemas de transporte mais seguros, mais rentáveis e mais ecológicos[37].

3.1.1 Contextualização histórica

Os sistemas de transporte facilitaram o desenvolvimento de relações políticas, económicas, culturais, turísticas e desportivas entre as pessoas no mundo moderno. O transporte sustentável e eficiente é um dos fatores mais importantes para a sobrevivência e progresso da civilização moderna. Com o desenvolvimento do transporte, houve a necessidade de acomodar o tráfego de forma eficiente e segura, levando ao incremento do estudo e aplicação de sistemas de controlo de tráfego. Numa fase inicial, foram utilizados semáforos vermelhos e verdes nos cruzamentos com o objetivo de tornar as intersecções mais seguras. Muito rapidamente, estas luzes tornaram-se um ferramenta poderosa para controlo de tráfego. Atualmente, em todos os ramos dos transportes, existem organizações que estabelecem e mantêm normas de segurança e vários procedimentos e regras operacionais.

Os primeiros meios de transporte foram os animais domesticados, sendo a prática de montar cavalos domesticados o meio mais antigo e melhor documentado, datando ao período neolítico, cerca de 4300 A.C, nas regiões da Euroásia e Ásia central[40][41][42]. Sítios arqueológicos da civilização Indu, datados entre 3250 a 2750 A.C, indicam que as principais vias das grandes cidades eram pavimentadas com tijolos queimados, cimentados com betume[43]. Na Europa, a "Estrada do Âmbar" era uma rota comercial para transporte de âmbar e estanho desde as zonas costeiras do Mar do Norte e do Mar Báltico para o Mar Mediterrâneo, estimando-se que a sua utilização ocorreu entre os séculos 16 AC e 5 DC[44]. A "Estrada Real Persa", ilustrada na Fig. 3.2, ligava Susa, a antiga capital da Pérsia, com a cidade Sardes, na costa do Mar Egeu. Esta infraestrutura era constituída por segmentos de estradas originalmente construídos pela civilização Assíria, sendo restaurados sob ordem do rei persa Dario I, no século 5 AC. Com cerca de 2400 km de comprimento, era utilizada pelos mensageiros reais persas para trocar correspondência entre o palácio real e os restantes ofícios[45].

Na China imperial desenvolveu-se um sistema de estradas paralelo à Estrada Real Persa, tendo começado o seu desenvolvimento em 200 AC. Por volta de 700 DC, o sistema de estradas registava um comprimento de cerca de 40,000 km. O desejo de expandir o comércio da seda para áreas da Ásia Central, povoadas principalmente por nómadas, levou à criação da "Rota da Seda", tendo começado seu o desenvolvimento em cerca de 300 AC, complementada pelo sistema de estradas da China[46]. A Rota da Seda, representava uma rede de estradas que ligava a China à Ásia Central, ao norte da Índia e ao Império Romano. A seda chinesa, o jade e as especiarias foram transportados durante séculos para o Império Romano, estando ligadas ao sistema de estradas do Império Romano, formando assim o sistema de estradas mais longo da Terra em 200 DC, com uma extensão de 6,437 km[47][48].



Figura 3.2: Estrada Real Persa, construída para facilitar a comunicação rápida em todo o Império Aquemênida (adaptado)[6].

Durante o império romano ocorreu um significativo desenvolvimento de infraestruturas, sendo o sistema de estradas o mais relevante dado o contexto. No auge do império, haviam 400,000 km de estradas, em que 80,000 eram pavimentadas com pedras[49], sendo a *Via Appia* (Fig. 3.3) a mais conhecida e uma das mais antigas. A construção desta estrada começou em 312 AC. As estradas eram construídas consoante o clima e o tráfego esperado, sendo as estradas principais designadas de vias públicas (*viae publicae*). Uma notável tecnologia desenvolvida pelo império foi o cimento romano, permitindo a propagação de diversas infraestruturas, entre as quais as estradas pavimentadas. Apesar da criação de tecnologias originais, os romanos adotaram métodos de pavimentação e técnicas de levantamento topográfico de outras civilizações, como grega, cartaginesa, fenícia e egípcia[50][51].

O império romano foi pioneiro na criação de técnicas de controlo de tráfego. Na capital do império, Roma, as estradas eram estreitas, sendo que cada carruagem tinha um estafeta associado, que percorria a estrada de um extremo ao outro, de modo a evitar que houvesse trânsito na direção oposta. Este sistema permitia que as ruas fossem unidirecionais, mas a direção de movimento permitida estava em constante mudança, o que inevitavelmente levava a disputas entre condutores em relação ao direito de passagem. A solução encontrada foi a criação do posto de agentes de trânsito, chamados de *Vigiles*, que davam a ordem de

passagem ou cedência de passagem[52]. Outra técnica empregada pelos romanos tinha por base a altura do dia. A fim de resolver problemas de congestionamento de trânsito, era empregue uma lei que proibia a utilização de veículos privados durante as primeiras 10 horas de luz do dia. As entregas comerciais eram feitas durante a noite e o tráfego em algumas ruas residenciais era proibido, tanto de dia como de noite[50].



Figura 3.3: Segmento da *Via Appia*, na antiga cidade de Minturno[7].

Na Inglaterra medieval, existiam portagens nas entradas das cidades, cobrando os comerciantes que vinham vender às cidades. A receita recolhida era utilizada para financiar a pavimentação e reparação das ruas da cidade. A fim de ganhar o direito de empregar portagens, as cidades eram obrigadas a solicitar à coroa uma licença de pavimentação. A primeira licença registada foi apresentada à cidade de Beverley (Yorkshire) em fevereiro de 1249, durante o reinado de Henrique III. Aproximadamente uma centena de cidades receberam licenças para a pavimentação. Através das licenças de pavimentação e do aprimoramento das ferramentas de pavimentação, tanto as administrações das cidades como a coroa, tentaram manter e melhorar o sistema de transportes, reforçar e aumentar o comércio dentro e entre as cidades, assim como contribuir para a prosperidade e o sucesso económico das cidades[53].

O engenheiro civil escocês John Loudon McAdam (1756-1836) foi um pioneiro das estradas modernas, com a invenção de um novo processo de pavimentação, *macadam* (Fig. 3.4). Este tipo de pavimento consistia na construção de estradas com uma superfície dura e lisa, utilizando alcatrão de carvão para unir as pedras da superfície da estrada[54]. Até ao final do século 19, a maioria dos residentes das cidades deslocavam-se a pé ou utilizavam veículos puxados por cavalos. Estes

meios de transporte, quando comparados com os meios atuais, apresentavam baixa velocidade e capacidade. Porém, não existia congestionamento de tráfego, nem poluição ambiental e sonora provenientes da utilização dos veículos, sendo que o número de acidentes de viação era residual.



Figura 3.4: Ilustração da construção da primeira estrada *macadam* nos Estados Unidos, em 1823[8].

Este paradigma veio a mudar com a invenção do automóvel. O alemão Karl Friedrich Benz (1844-1929) foi um *designer* de motores e engenheiro automóvel, sendo reconhecido como o inventor do automóvel moderno. Em 1885, criou o primeiro automóvel moderno movido a gasolina, sendo também o primeiro automóvel produzido em série[55]. Nos Estados Unidos da América, o empreendedor e engenheiro mecânico Henry Ford (1863-1947) revolucionou o transporte através da produção em massa do automóvel modelo Ford T. Em consequência do sucesso deste automóvel, o *Federal Aid Road Act* de 1916 foi a primeira lei federal de financiamento das auto-estradas, impulsionando a expansão e melhoria do sistema rodoviário dos Estados Unidos da América EUA[56].

Durante a primeira metade do século 20, o trânsito público nas cidades começou a realizar-se em elétricos, autocarros e tróleis. As novas tecnologias de transporte permitiram a um grande número de cidadãos aumentar a distância entre a residência e o local de trabalho, levando à expansão das cidades, alterando a sua estrutura urbana. Em meados do século 20, com cada vez mais carros nas ruas, os problemas de trânsito exigiam muito mais consideração. Isto levou à criação de cidades caracterizadas pela rede de auto-estradas existentes nas áreas urbanas. Um notório exemplo desta rede de infraestruturas teve origem em 1956, com o *Federal-Aid Highway Act*, que permitiu a construção da maior

obra pública nos Estados Unidos até à data, o Sistema Rodoviário Interestadual (Fig. 3.5), com uma extensão de 66000 km[57]. Embora as densas redes de auto-estradas tenham sido construídas com a ideia de reduzir o congestionamento de tráfego, muitas cidades no mundo sofrem de elevados níveis de congestionamento de tráfego[58]. As raízes da ciência dos transportes podem ser rastreadas até aos estudos de *Wardrop*[59], *Beckmann et al.*[60], assim como *Prigogine* e *Herman*[61]. Num dos mais influentes trabalhos de engenharia civil, *Braess*[62] provou que adicionar capacidade extra a uma rede de tráfego pode, em alguns casos, reduzir o desempenho global da rede.



Figura 3.5: O Sistema Rodoviário Interestadual, em 2008. As áreas metropolitanas estão destacadas a sombreado[9].

3.2 Engenharia de tráfego

A associação educativa e científica internacional do Instituto de Engenheiros de Transportes (ITE), proveniente do inglês *Institute of Transportation Engineers*, tem vindo a providenciar aos profissionais da engenharia de tráfego um recurso abrangente de conceitos fundamentais de engenharia de tráfego, bem como as práticas mais avançadas, através da publicação do Manual de Engenharia de Tráfego. Este manual tem sido amplamente utilizado por organismos públicos, consultores e instituições educacionais como uma fonte de referência. De acordo com o manual, a engenharia de tráfego define-se como uma sub-disciplina da engenharia de transportes que trata do planeamento, conceção e operação de ruas e auto-estradas, as suas interligações e terrenos adjacentes, assim como a interação com outros modos de transporte (aéreo, aquático e ferroviário) e os respetivos terminais[63].

A aplicação de conceitos de engenharia de tráfego numa dada região encontra-

se intrinsecamente ligada com o desenvolvimento e sucesso desta, pois promove o nível de mobilidade, que por sua vez advém a utilização de transportes de pessoas e mercadorias, dando margem a um crescimento económico e social. Porém, uma indevida implementação de engenharia de tráfego poderá originar congestionamentos na rede de transporte, problemas ambientais, desperdício de recursos, entre outros. Desde modo, um bom planeamento revela-se crucial. Tavares[17] propõe etapas para uma implementação faseada:

1. Definição do problema;
2. Delimitação de objetivos e critérios;
3. Caracterização de procura e oferta de transportes;
4. Recolha de dados;
5. Desenvolvimento de alternativas e cenários;
6. Avaliação das alternativas;
7. Seleção do plano;
8. Implementação do plano;
9. Avaliação;
10. Monitorização;
11. Atualização.

O conjunto de técnicas e métodos para o planeamento de transportes tem como finalidade a melhoria da qualidade da mobilidade urbana, sendo que o sucesso deste depende dos modelos de transporte. Os modelos de transporte revelam-se importantes para previsão e avaliação de uma dada implementação, permitindo a estimação do fluxos de tráfego num dado local e o respetivo comportamento no tempo e no espaço. Assim, os modelos de transporte apresentam-se como a base dos planos de transporte, estudos de impacto e estudos de investimento[64].

Através do estudo do comportamento do fluxo de tráfego, poderá ser simulado um planeamento de transportes mais adequado, vigilância e monitorização de tráfego e deteção de acidentes, assim como a análise do impacto ambiental e económico-social produzido pelos sistemas de transporte[65].

Com o constante estudo de modelos de tráfego, estes têm vindo a ser aprimorados com auxílio do avanço tecnológico. A avaliação de um modelo deve ser realizada através da medição da capacidade de resposta, perante as adversidades, e na tomada de decisão[66].

3.2.1 Mobilidade urbana

A rede de transportes tem uma importância indubitável na qualidade de vida das pessoas numa dada região, facilitando o deslocamento de pessoas e bens entre lugares. Porém, também apresenta as suas advertências, como os acidentes rodoviários, poluição sonora, poluição do ar e perdas de espaço público[67].

Ao longo do último século, as deslocações para dentro das cidades tem vindo a aumentar consideravelmente, porém cada vez mais as pessoas têm optado por habitar nas periferias das grandes cidades, dado ao menor preço da habitação quando comparado com o centro das cidades. Estes fenómenos criam constantes deslocamentos diários, possibilitados pelas infraestruturas existentes, que por sua vez origina entupimento das vias, resultando congestionamentos, acidentes ou problemas de saúde, como por exemplo, stress, ansiedade ou cansaço[67].

O conceito de mobilidade advém destas deslocações, tendo como medida base a facilidade com que as pessoas se deslocam de um ponto para outro de modo a participar em diferentes atividades. Outro conceito, que por vezes confundido com mobilidade, é a acessibilidade. Este último se define como a capacidade de se alcançar bens e serviços. A título de exemplo, uma acessibilidade insuficiente descreve a impossibilidade de ter acessos às infraestruturas ou aos transportes públicos[67].

3.2.1.1 Desafios da mobilidade urbana

Os desafios da mobilidade urbana estiveram presentes desde a conceção das primeiras cidades. Sempre houve questões de como equilibrar o congestionamento, facilitar deslocações e reduzir poluição, acompanhadas dos fatores de crescimento populacional e recursos finitos. Porém a pressão sobre as cidades de hoje não tem precedentes, sem fim próximo. estimativas apontam para 4,6 mil milhões de habitantes nas cidades até 2025, 41 mega-cidades até 2030 e 67,1 triliões quilómetros efetuados em transportes coletivos até 2050[68].

O tempo gasto no trânsito é um desperdício para os passageiros individuais e para a produtividade geral das cidades do mundo. De acordo com o *Global Traffic Scorecard* da INRIX[69], a cidade do Porto perdeu em média 40 horas por condutor devido ao congestionamento em 2022, um acréscimo de 32% quando comparado com o ano anterior.

As estradas congestionadas fazem mais do que perder tempo. Os acidentes de viagem matam anualmente 1,35 milhões de pessoas em todo o mundo e deixam entre 20 e 50 milhões de pessoas com ferimentos não mortais. Mais de metade de todas as mortes e lesões causadas pelo tráfego rodoviário envolvem peões, ciclistas e motociclistas e respetivos passageiros[70].

O trânsito congestionado de pára-arranca aumenta o volume de partículas microscópicas nocivas nos gases de escape dos veículos. De acordo com estudos revistos pela Organização Mundial de Saúde, as partículas dos gases de escape são "capazes de penetrar profundamente nas passagens pulmonares e entrar na corrente sanguínea, causando impactos cardiovasculares, cerebrovasculares e respiratórios[71].

A preocupação pelo impacto ambiental tem sido um tópico de grande consideração por parte das cidades, sendo que os transportes são um dos principais fatores que podem contribuir para a sustentabilidade ambiental. Estima-se que 22% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) sejam atribuídas ao sector dos transportes, o que irá aumentar à medida que as cidades crescem e os cidadãos individuais continuam a utilizar transportes que queimam combustíveis fósseis[71].

3.2.1.2 Evolução da hierarquia da mobilidade urbana

Ao longo do tempo e das necessidades sociais, o próprio conceito de mobilidade tem vindo a evoluir. A mobilidade na sua conceção referia-se ao movimento de pessoas e bens de um ponto para o outro, passando englobar questões mais sociais, como política e considerações ambientais.

Durante a maior parte da história humana, o principal meio de deslocação foi o pedestre. Com o desenvolvimento da humanidade surgiram novas tecnologias de deslocação, mais rápidas e eficientes. A adoção em massa de veículos motorizados compeliu ao melhoramento das infraestruturas rodoviárias, sendo que a prioridade da mobilidade se focava nas viaturas motorizadas e os peões em último.

Com uma crescente preocupação por parte da população em geral em relação a tópicos ambientais, revelou-se cada vez mais importante a promoção de uma mobilidade sustentável. Desde modo, ocorreu a inversão de prioridades, passando as viaturas motorizadas para a última posição e as considerações dos peões como a mais alta prioridade. A Fig. 3.6 apresenta a evolução de prioridades na esfera da mobilidade urbana, salientando a inversão de prioridades.

Na vertente de mobilidade consciente das questões ambientais, surge o Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (PMUS). Este revela-se como um conceito de planeamento aplicado pelas autoridades locais e regionais para o planeamento estratégico da mobilidade. Tem por base o incentivo a uma mudança para modos de transporte mais sustentáveis e apoia a integração e o desenvolvimento equilibrado de todos os modos. A aplicação de um PMUS é fundamental para resolver problemas de transporte urbano e alcançar objetivos ambientais, sociais e económicos locais e de nível superior. Os PMUS são definidos como: "um plano estratégico concebido para satisfazer as necessidades de mobilidade das pessoas e das empresas nas cidades e seus arredores para uma melhor qualidade de vida,

baseando-se nas práticas de planejamento existentes e tem em devida consideração os princípios de integração, participação e avaliação"[72].

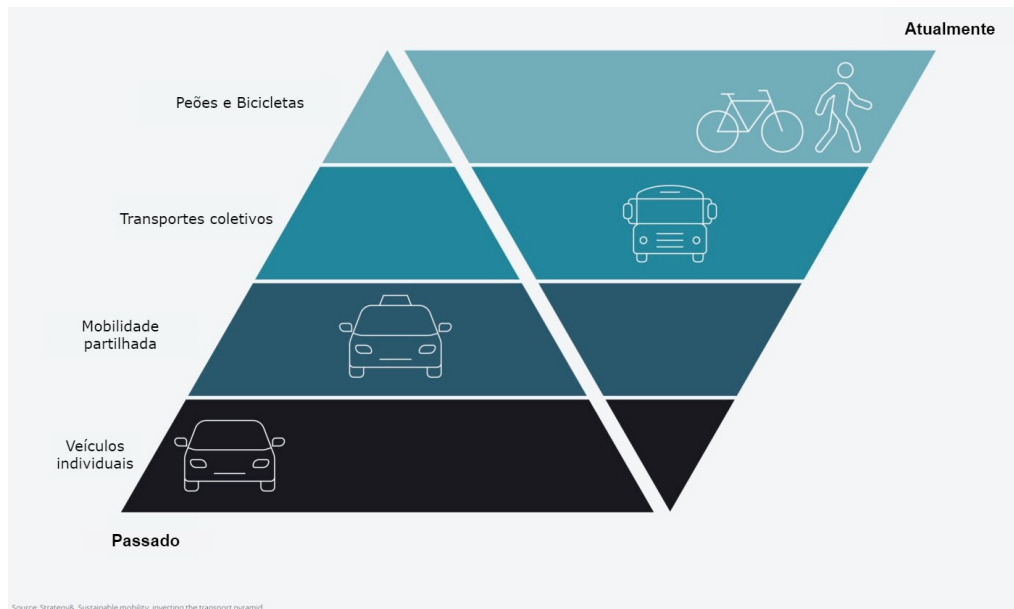


Figura 3.6: Inversão do triângulo de mobilidade urbana (adaptado)[10].

3.2.2 Sistemas Inteligentes de Transporte

Os sistemas inteligentes de transporte (SIT) são um conjunto de tecnologias que têm como finalidade otimizar a gestão dos sistemas de transporte de pessoas e bens. A sua dispersão e implementação foi possibilitada pelos desenvolvimentos nas áreas de telecomunicações, eletrotécnica e informática, sendo dependente da incorporação de tecnologias destas áreas para se manter atual e fornecer dados fidedignos. A devida implementação de SIT promove a melhoria da operação e segurança dos sistemas de transporte, oferecendo rotas mais eficientes e deferindo situações de colisões[11]. Como demonstra a Fig. 3.7, para se obter uma maior eficiência nos meios de transporte, um maior grau de conforto e segurança, assim como conservação do meio ambiente, deve haver uma utilização mais inteligente dos intervenientes no SIT, apoiados pelos avanços tecnológicos.

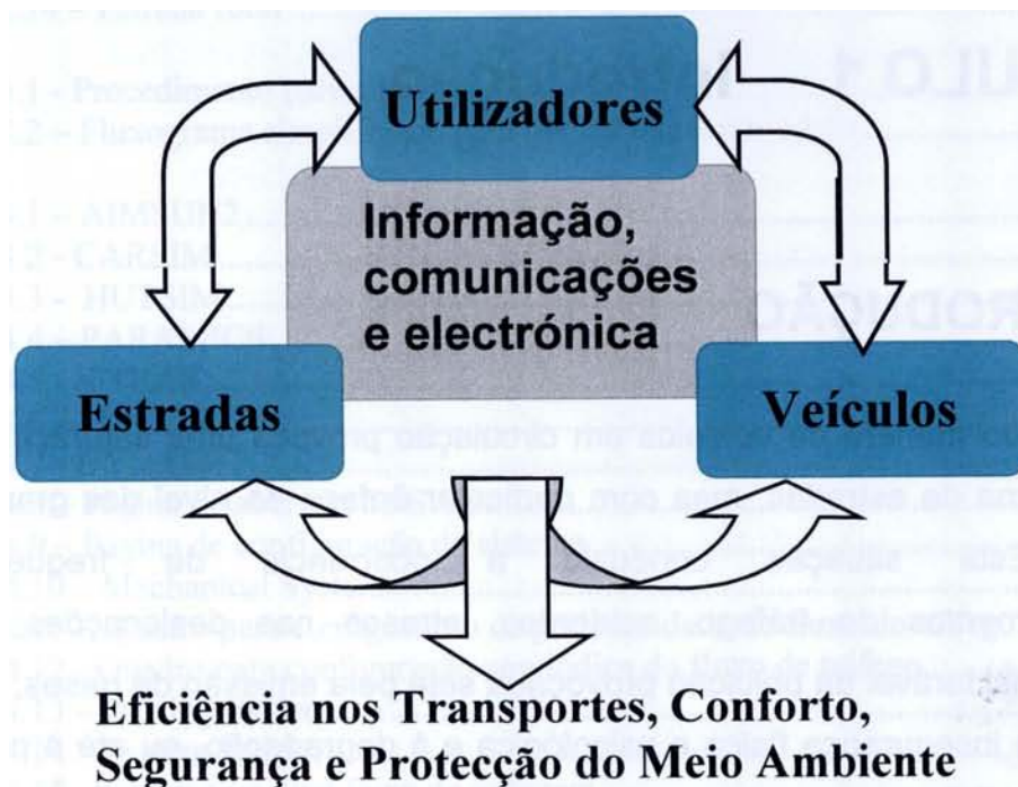


Figura 3.7: Modelo conceitual dos SIT (adaptado)[11][12].

3.2.2.1 Evolução dos sistemas inteligentes de transporte

Os primeiros conceitos base de sistemas inteligentes de transporte (SIT) surgiram no início dos anos 30, apresentando uma evolução inicial lenta devido à carência de tecnologias, tendo sofrido uma aceleração na segunda metade do século XX. Como apresentado na Fig. 3.8, o desenvolvimento dos SIT ocorreu principalmente na Europa, EUA e Japão, sendo repartido em três fases[11][13].

A primeira fase, de preparação, ocorreu principalmente entre 1970 e 1980, porém consegue-se traçar os princípios de SIT a 1930. Durante este período, o desenvolvimento de SIT foi limitado pela tecnologia existente na época. O primeiro registo de um sistema protótipo de SIT foi em 1928 nos EUA, com a implementação dos sistemas de semáforos. Passado 11 anos, em 1939, foi introduzido em Nova Iorque o conceito de sistemas de estradas automatizadas (AHS). O mais notório desenvolvimento dos SIT ocorreu na década de 70, com a introdução de microprocessadores e o desenvolvimento do GPS[11]. Na Europa, em particular na Alemanha, o projeto ARI (*Autofahrer Rundfunk Informationssystem*), baseado em modulação em frequência, foi introduzido em 1974 para aliviar o congestionamento de tráfego nas auto-estradas durante as férias de Verão[73]. Paralelamente, o governo dos EUA começava o desenvolvimento do projeto ERGS

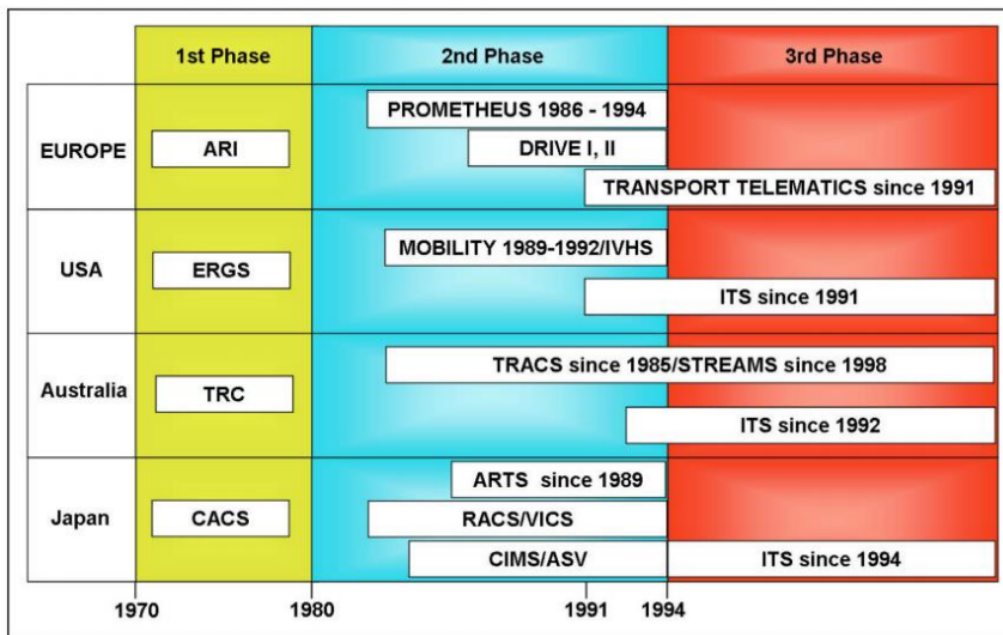


Figura 3.8: História do desenvolvimento dos sistemas SIT[13].

(*Electronic Route Guidance System*), que mais tarde iria impulsionar a investigação e desenvolvimento dos SIT. Em 1970, o Departamento de Estradas Principais da Austrália começou a instalação do TRC (*Traffic Responsive Capabilities*), que incluía 30 intersecções semaforizadas com controlo centralizado. Em 1973, o Ministério do Comércio Internacional e da Indústria do Japão financiou o CACS (*Comprehensive Automobile Control System*)[13][74].

A segunda fase, entre 1980 e 1994, fica caracterizada pelo estudo da viabilidade dos SIT, com o desenvolvimento em grande escala financiado pelo setor privado e por governos. Esta rápida evolução foi possibilitado pelas tecnologias anteriormente implementadas[11]. Durante esta fase, dois projetos europeus decorriam em simultâneo: PROMETHEUS[75] (*Program for a European Traffic System with Higher Efficiency and Unprecedented Safety*), criado por fabricantes de automóveis em 1986, assim como DRIVE[76] (*Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe*), estabelecido pela Comunidade Europeia em 1989. Posteriormente, em 1991, a ERTICO (*European Road Transport Telematics Implementation Coordination Organization*) foi criada com o apoio da Comunidade Europeia como uma parceria público-privada, estando aberta a todas as organizações europeias e organizações internacionais que operam na Europa na área dos SIT[77]. Nos EUA, foi formado o grupo *Mobility 2000* em 1989, originado o fórum *Intelligent Vehicle Highway Systems America* em 1990, que posteriormente levou à criação da organização sem fins lucrativos *ITS America*, com o objetivo de promover a utilização de tecnologias avançadas na rede de sistemas

de transporte[78]. Na Austrália, em 1985, foi instalado o projeto TRACS (*Traffic Responsive Adaptive Control System*), um sistema de gestão de tráfego de segunda geração, descendente do projeto TRC. No Japão, em 1984, teve início o projeto RACS (*Road/Automobile Communication System*), que constituiu a base do atual sistema de navegação automóvel[13].

A última fase, de 1995 até aos dias de hoje, define-se pelo desenvolvimento de produtos SIT de alta qualidade a serviço da população. Com os contínuos avanços tecnológicos, os SIT revelam-se cada vez mais robustos e fiáveis, proporcionando resultados mais fidedignos[11]. Na Europa, o desenvolvimento das aplicações telemáticas e SIT no sector dos transportes foi previsto no *IV EU Framework Program* (1994-1998), devido em grande parte pelos esforços da organização público-privada ERTICO. Adotado pelo Conselho e pelo Parlamento Europeu, inclui a telemática como um dos principais tópicos de investigação, incentivando medidas a nível comunitário para a implementação da telemática no sector dos transportes e a apoiar o trabalho de normalização na gestão do tráfego através de todas as medidas adequadas, incluindo a investigação e o desenvolvimento[79]. Novos desenvolvimentos de SIT foram divulgados pela Comissão Europeia através do programa de uma política comum de transportes para os anos 2001-2010, tendo como exemplo o consenso sobre a introdução de um sistema de emergência *e-Call* em todos os automóveis recém construídos[80]. Em 1994, o programa americano IVHS passou a designar-se por ITS (*Intelligent Transportation Systems*), indicando que, para além do tráfego automóvel, também outros modos de transporte recebem atenção. Na Austrália, em 1998, os sistemas TRAC e *South East Freeway* fundiram-se para criar a primeira versão do STREAMS. Trata-se de um SIT integrado que auxilia na gestão em várias áreas, como os sinais de trânsito, incidentes, em auto-estradas, prioridade dos veículos, informação aos utentes e orientação do estacionamento[81]. A *ITS Japan*, criada em 1994 em cooperação com cinco ministérios do governo japonês, promove a investigação, desenvolvimento e implementação dos SIT. As políticas desta sociedade incluem o desenvolvimento da arquitetura do sistema, investigação e desenvolvimento, normalização de práticas e cooperação internacional, entre outros. O Centro VICS (*Vehicle Intelligent Control System*) começou em funcionamento em 1996, nas cidades de Tóquio e Osaka, reunindo as informações de cada uma das autoridades rodoviárias em tempo real, transmitindo informação à população geral através de painéis de sinalização variável e da rádio[13].

3.2.2.2 Sensores

Para um bom funcionamento de um sistema SIT, os sensores são componentes intrínsecos para a recolha de dados relativos ao comportamento de fluxo de tráfego. Quanto ao método de instalação, os sensores encontram-se divididos em duas grandes categorias: os montados sobre ou sob a superfície da faixa de roda-

gem e os montados acima da faixa de rodagem em pontes de sinalização ou na margem da via. A primeira categoria é também designada por sensores intrusivos, uma vez que infringem o pavimento da estrada, enquanto que a segunda categoria é designada de sensores não intrusivos[82].

Os sensores podem ser classificados quando ao funcionamento, podendo ser passivos ou ativos. Os sensores passivos apenas recebem energia, ou seja, não transmitem energia própria. Atuando como recetores, detetam energia recebida na abertura do sensor, sendo esta uma combinação da energia emitida e refletida por veículos motorizados, bicicletas e peões, assim como infraestruturas. Os sensores ativos transmitem e recebem energia. A energia recebida é uma parte da energia emitida, que é difundida de volta para a abertura do sensor por veículos, pela estrada ou por outros objectos[82].

Os sensores intrusivos são os mais utilizados nos sistemas de controle de tráfego. Como são instalados nos pavimentos, têm um custo de instalação e manutenção elevado, requerendo obras na via, mas com a grande vantagem de um alto nível de precisão. A Fig. 3.9 demonstra os sensores intrusivos mais utilizados: sensores magnéticos, sensores de tubos pneumáticos e espiras eletromagnéticas.

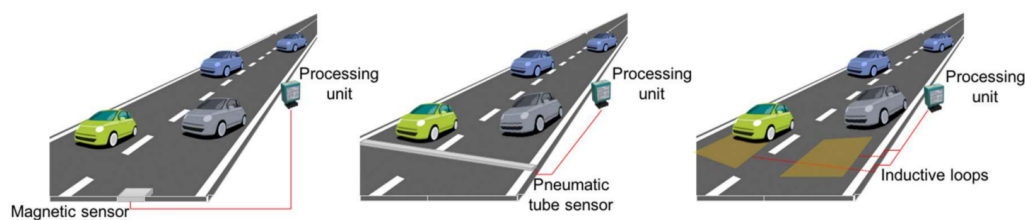


Figura 3.9: Sensores intrusivos (da esquerda para a direita): sensores magnéticos, sensores de tubos pneumáticos e espiras eletromagnéticas[14].

Os sensores magnéticos (Fig. 3.10 (a)) estão instalados debaixo do pavimento das vias, ligados às unidades de processamento geralmente fora da faixa de rodagem. Estes são sensores passivos utilizados para detetar veículos, efetuando um registo quando deteta uma mudança do campo magnético da Terra, produzida por um veículo de metal ferroso em movimento. Recolhem informações acerca do fluxo de tráfego, da velocidade dos veículos e ocupação da via. São caracterizados pelo baixo custo da unidade e capacidade de deteção de pequenos veículos, mas com as desvantagens de difícil instalação e manutenção, reduzida área de medição e incapacidade de detetar veículos parados[14][82].

Os sensores de tubos pneumáticos (Fig. 3.10 (b)) são colocados sobre as faixas de rodagem, transmitindo informação para as unidades de processamento. Estes sensores passivos fornecem a contagem do número de veículos que passam num determinado local, assim como a sua classificação. O sensor fica ativo quando o pneu de um determinado veículo passa por cima do sensor, criando uma pressão

de ar, o que origina um sinal elétrico[14]. Este tipo de sensores são de rápida instalação, com baixo consumo de energia, sendo também de baixo custo e de manutenção simples. Porém, perdem precisão na contagem quando há um aumento do volume de tráfego de veículos pesados, são sensíveis à temperatura do ar e os tubos podem ser rompidos, quer deliberadamente, quer por desgaste por parte dos pneus dos caminhões[83].

As espiras eletromagnéticas (Fig. 3.10 (c)) são os sensores mais comuns na monitorização do tráfego. Estes são sensores ativos instalados debaixo da estrada, constituídas por um fio enrolado, formando um circuito fechado. Este fio funciona como um elemento indutivo em conjunto com a unidade eletrónica. Quando um veículo pára ou passa sobre o fio, a indutância do fio diminui. A diminuição da indutância aumenta a frequência de oscilação e faz com que a unidade eletrónica envie um impulso para o controlador, indicando a presença ou passagem de um veículo. Permite obter informações sobre o fluxo do tráfego, velocidade do veículo, contagem do número de veículos e dados de ocupação[82][83].

A tecnologia empregue nas espiras eletromagnéticas é bastante robusta, tendo um baixo custo do equipamento quando comparado com outros sensores instalados na via pública. Na sua essência, é uma técnica simples, o que garante flexibilidade para se adaptar a diversas aplicações. Sendo um sensor que funciona debaixo do pavimento, incluem a interrupção do tráfego para instalação e reparação em caso de avarias. Além disso, a repavimentação das estradas e a reparação de serviços públicos também podem criar a necessidade de reinstalar este tipo de sensores. Adicionalmente, dependendo do estado da via e volume de tráfego, pode ser necessário instalar muitas espiras para se conseguir uma boa recolha de dados[83].

Nos últimos anos, tem ocorrido um crescente interesse no estudo de sensores piezoelétricos (Fig. 3.10 (d)) para deteção de veículos[84][85]. Geralmente funcionando em conjunto com espiras eletromagnéticas, estes sensores passivos são instalados sub o pavimento, detetando a passagem de veículos e monitorizando a velocidade do tráfego. Um registo ocorre quando um veículo passa por cima destes e cria uma mudança de tensão, transmitida para a unidade de processamento. Estes detetores são capazes de recolher dados de quatro faixas de rodagem simultaneamente, porém a sua instalação e manutenção necessita de interrupção do trânsito[14].



Figura 3.10: Exemplos de sensores intrusivos: (a) Sensor magnético de *Sensys Networks*[82] (b) Sensor de tubo pneumático de *Diamond Traffic Products*[86] (c) Espira eletromagnética de *EMX Industries*[87] (d) Sensor piezoelétrico de *TE Connectivity*[88]

Os sensores não intrusivos apresentam uma capacidade de medição semelhante dos sensores intrusivos. A sua instalação e manutenção revela-se mais versátil, mas de maior custo monetário, sendo que são afetados por condições atmosféricas que reduzem a visibilidade, em particular neve, chuva e neblina. Devido à sua presença mais notória, são mais facilmente identificados pelos condutores, o que leva a que os mesmos tenham comportamentos mais cuidadosos na sua condução. Apesar de ser uma vantagem para a segurança rodoviária, efetivamente torna-se difícil recolher amostras do normal comportamento da via[14].

Em termos de aplicabilidade, são utilizados para dar informações acerca das filas de semáforos, condições do tráfego, condições meteorológicas, condições do pavimento e ocorrências de acidentes. Na Fig. 3.11 encontram-se ilustrados os três tipos de sensores não intrusivos mais prevalentes: radares, sistemas de processamento de imagem de vídeo e sensores infravermelhos.

A tecnologia radar de micro-ondas, do inglês *radio detection and ranging*, permite detetar objetos ao emitir ondas de energia de 1 a 30 cm de comprimento[83]. Os sensores radares transmitem informação através de micro-ondas de baixa frequência que são refletidas pelos veículos na zona de funcionamento. Tipicamente utilizados na gestão dos semáforos, são sensores ativos que podem

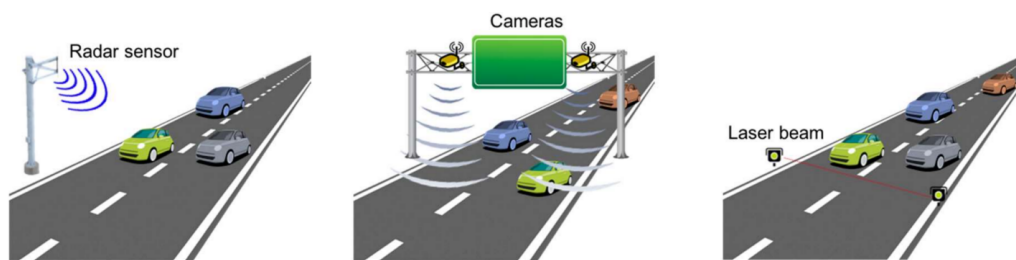


Figura 3.11: Sensores não intrusivos (da esquerda para a direita): (radares, sistemas de processamento de imagem de vídeo e sensores infravermelhos[14].

funcionar de noite e de dia e recolhem dados com boa precisão, sendo de fácil instalação e manutenção. Existem dois tipos de radares: radar *Doppler* (Fig. 3.12 (a)) e radar de ondas contínuas. No caso do sistema de *Doppler*, utiliza-se a mudança de frequência para detetar o número de veículos que passam, assim como a velocidade, com alta precisão. Por outro lado, não se consegue detetar veículos imóveis ou a velocidades muito reduzidas. No caso do radar de ondas contínuas, este é modulado por uma frequência contínua onde as ondas são irradiadas com uma potência contínua, fornecendo dados sobre contagem, ocupação e velocidade, em múltiplas vias. Porém, a recolha de dados pode conter erros devido à vulnerabilidade a interferências magnéticas, assim como possibilidade de falha de contagem a quando grande congestionamento envolvendo veículos altos, que podem bloquear o campo de visão do sensor[14][82].

O sistema de processamento de imagem de vídeo (Fig. 3.12 (b)) é constituído por câmaras de vídeo, um computador que processa as imagens recolhidas e um *software* que converte imagens em dados de tráfego. As câmaras de vídeo são instaladas de modo a obter imagens que captam todas as faixas de rodagem, podendo ser colocadas na berma ou em pórticos. Deste modo, torna-se possível analisar o tráfego num determinado momento, detetando veículos em múltiplas faixas de rodagem, a velocidade a que os veículos se deslocam e o fluxo de tráfego daquele local. Porém, este sistema também apresenta as suas limitações. Este sistema apresenta grande sensibilidade a problemas meteorológicos, é suscetível a cegueira, quer por parte dos veículos pesados que projetam sombras ou bloqueiam a visão, quer por existência de poeira na lente, ou até mesmo falta de iluminação noturna[14][82].

Os sensores infravermelhos identificam veículos através da energia refletida pelos veículo, sendo convertida em sinais elétricos pelo recetor e devidamente transmitidos para a unidade de processamento. Existem dois tipos de sensores infravermelhos: sensores infravermelhos passivos (Fig. 3.12 (c)) e infravermelhos ativos. Os sensores infravermelhos passivos operam baseando-se na emissão ou reflexão de radiação infravermelha dos veículos. Este tipo de sensores consegue

recolher dados acerca do volume de tráfego, taxa de ocupação e presença de veículo. No caso dos sensores ativos, são utilizados díodos emissores de luz (LED) em conjunto com os sensores infravermelhos recetores para medir o tempo de reflexão. Com este tipo de sensores consegue-se recolher dados sobre a velocidade e densidade de tráfego. Ambos os tipos de sensores infravermelhos são suscetíveis às condições de baixa visibilidade, sendo requerido um sensor por via. Na instalação/manutenção de sensores infravermelhos ativos, a faixa de rodagem tem de ser fechada[14][82].

Os sensores acústicos (Fig. 3.12 (d)) são dispositivos passivos utilizados para obter informações acerca do veículo, como presença e velocidade, assim como medir volume de tráfego e taxa de ocupação. Estes são constituídos por um conjunto de microfones, que têm como finalidade detetar o aumento da energia sonora produzida por um veículo, ao se aproximar da área de deteção do sensor. Prevê-se que este tipo de sensores poderá substituir as espiras indutoras, pois são capazes de recolher as mesmas métricas sem a necessidade de obras na via a quando instalação e manutenção. Porém também apresentam as suas desvantagens, sendo as medições afetadas por baixas temperaturas e alta pluviosidade, assim como elevado congestionamento[14][82].

Os sensores ultrassónicos (Fig. 3.12 (e)) conseguem contabilizar o número de veículos, a taxa de ocupação, a presença do veículo e a velocidade. São sensores ativos que calculam a distância entre dois objetos baseando-se no tempo decorrido entre a transmissão de uma onda sonora e a receção da onda refletida. Tipicamente instalado um sensor por cada via, montados em pórticos ou pontes, podem operar de dia e noite, sendo de tamanho compacto. Devido à sua instalação, necessita-se de interromper o trânsito para a sua instalação ou manutenção. Revelam-se sensíveis a variações de temperatura e vento[14][82].

Os sensores baseados na tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*) (Fig. 3.12 (f)) utilizam díodos laser para transmitir feixes de energia perto da gama dos infravermelhos, sendo uma parte da energia refletida ou dispersa pelos veículos, que por sua vez é detetada pela abertura do sensor. Deste modo, são sensores ativos, geralmente instalados em postes na berma da estrada, direcionados para baixo para captar os veículos. Com estes sensores retiram-se métricas dos veículos, como a sua presença, velocidade e comprimento, assim como métricas da via, como a contagem de veículos e ocupação. Como são montados ao lado da estrada, não necessitam de interromper o trânsito, detetando veículos em várias vias, podendo ainda operar de dia e noite. Também apresentam as suas limitações, nomeadamente a degradação das medições em condições de visibilidade reduzida[82].

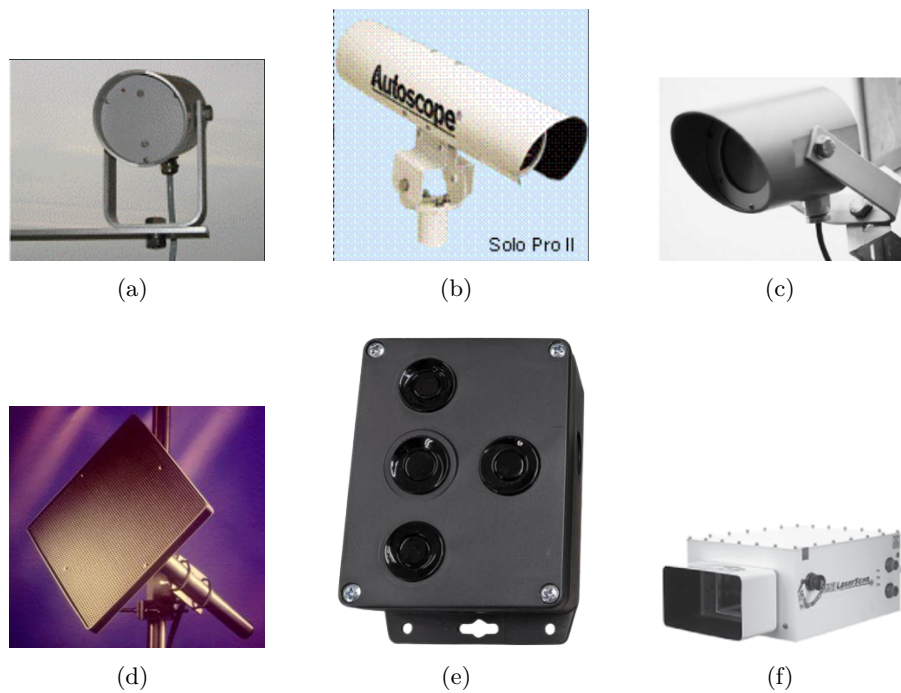


Figura 3.12: Exemplos de sensores não-intrusivos: (a) Sensor radar *Doppler ASIM 230* [83] (b) Sistema de processamento de imagem de vídeo *Econolite Control Products Solo Pro II* [83] (c) Sensor de infravermelhos passivo *ASIM IR 250* [83] (d) Sensor acústico *SmarTek Systems SAS-1* [83] (e) Sensor ultrassónico *EMX Industries USVD-4X* [89] (f) Sensor LIDAR *OSI Laserscan* [82]

Com a combinação de tecnologias, é possível a criação de sensores especializados. A título de exemplo, a empresa alemã Xtralis ASIM combina tecnologia de sensores infravermelhos, ultrassónicos e radar *Doppler* na sua série de sensores TT 29x[90] (Fig. 3.13 (a)), para criar um sensor capaz de classificar veículos, providenciar medições de velocidade, comprimento do veículo e presença, assim como deteção de filas de trânsito, contagem de veículos e ocupação. Outro exemplo de um sensor que emprega múltiplas tecnologias provem de *ADEC Technologies*, sediada na Suíça. A série de sensores TDC4[91] (Fig. 3.13 (b)) integra tecnologia de infravermelhos, ultrassónicos, radar *Doppler* e processamento de imagem de vídeo, com a capacidade de medir contagem de veículos, velocidade individual do veículo, classe do veículo, presença, fila de trânsito, deteção de condução em contra-mão, ocupação e verificação visual de anomalias do fluxo de tráfego[82].

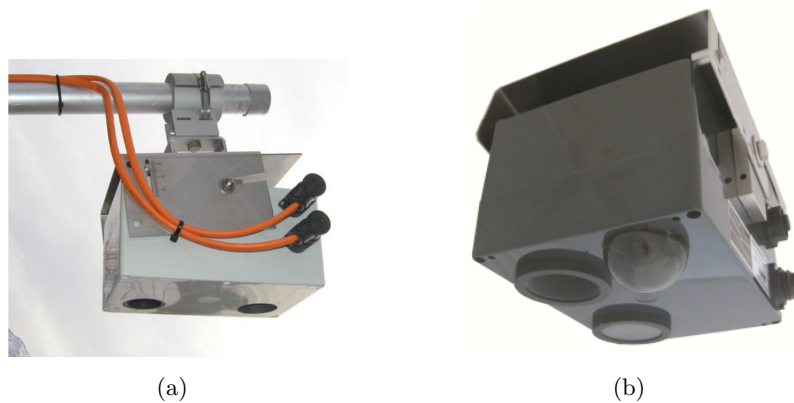


Figura 3.13: Sensores combinados: (a) *Xtralis ASIM TT 29x*[92] (b) *ADEC Technologies TDC4*[91]

3.2.2.3 Categorias

No que respeita à nomenclatura de aplicações e serviços relacionados com os SIT, a Organização Internacional de Normalização, do inglês *International Standards Organization* (ISO), formou o Comité Técnico 204 (TC204) sobre Informática dos Transportes e Sistemas de Controlo. Em apoio ao TC204, o *ITS America* assumiu a liderança nos Estados Unidos. No Japão, foi criado o Comité Nacional Japonês do ISO TC204. Na Europa, a organização *CEN/TC 278 Road Transport and Traffic Telematics* coordena as suas atividades com o TC204. Englobado pelo TC204, existem atualmente 13 grupos de trabalho internacionais, os *working groups* (WG), 2 grupos de trabalhos conjuntos, *joint working groups* (JWG) e ainda 4 grupos de assessoria, *advisory groups* (AG), alocados para as diferentes necessidades dos SIT[93]:

- WG 1: Arquitetura;
- WG 3: Dados geográficos dos SIT;
- WG 5: Cobrança de taxas e portagens, gestão e controlo de acesso;
- WG 7: Gestão comercial/de mercadorias;
- WG 8: Transportes públicos/emergência;
- WG 9: Gestão e controlo integrados da informação sobre transportes;
- WG 10: Sistemas de informação ao viajante;
- JWG 11: Sistemas de orientação de itinerários e de navegação, em cooperação com o Comité Técnico 211 (TC211);

- WG 14: Sistemas de aviso e controlo de veículos/estradas;
- WG 15: Comunicações dedicadas de curto alcance;
- WG 16: Comunicações;
- WG 17: Dispositivos nómadas em sistemas SIT;
- WG 18: Sistemas cooperativos;
- WG 19: Integração da mobilidade;
- WG 20: *Big Data* e Inteligência Artificial em apoio aos SIT.
- JWG 1: Modelo de dados da cidade para planeamento dos transportes, em cooperação com o Comité Técnico Conjunto 1, parceria entre ISO e *International Electrotechnical Commission* (IEC);
- AG 2: Identificadores;
- AG 3: Grupo de melhoramento operacional;
- AG 4: Coordenação do programa;
- AG 5: Revisão de publicações e *marketing*.

Os SIT podem ainda ser divididos em categorias, organizados quanto à operação dos modos de transporte[94]:

- Sistemas Avançados de Gestão de Tráfego (SAGT), ou em inglês *Advanced Traffic Management Systems (ATMS)*;
- Sistemas Avançados de Informação para Viajantes (SAIV), ou em inglês *Advanced Traveler Information Systems (ATIS)*;
- Operações de Veículos Comerciais (OVC), ou em inglês *Commercial Vehicle Operations (CVO)*;
- Sistemas Avançados de Transportes Públicos (SATP), ou em inglês *Advanced Public Transportation Systems (APTS)*;
- Sistemas Avançados de Transportes Rurais (SATR), ou em inglês *Advanced Rural Transportation Systems (ARTS)*;
- Sistemas Avançados de Controlo e Segurança de Veículos (SACSV), ou em inglês *Advanced Vehicle Control and Safety Systems (AVCSS)*;
- Sistema Automatizado de Auto-Estradas (SAAE), ou em inglês *Automated Highway System (AHS)*.

Os SAGT tem por base de operação o controlo do fluxo de tráfego, fornecendo instruções de rotas alternativas em tempo real de modo a melhorar a qualidade do tráfego para os utilizadores e a redução dos atrasos no tráfego. Para fornecer tal serviço, estes sistemas envolvem deteção, comunicação e controlo. Um sistema de vigilância deteta as condições de tráfego numa dada área metropolitana e transmite a informação a um centro de gestão de tráfego para processar a informação. Neste centro de gestão podem ser tomadas as medidas necessárias, como por exemplo o encaminhando dos condutores em torno de acidentes. Esta informação por sua vez é utilizada para informar o público sobre as condições de tráfego atuais e previstas, recomendando as melhores rotas, podendo ser transmitida através dos Sistemas Avançados de Informação para Viajantes[95][96].

Os SAIV difundem informação ao condutores através de vários canais de distribuição, permitindo ao público saber a sua localização e como encontrar os serviços desejados através de rotas alternativas, assim como informar questões de segurança, em tempo real. As principais características dos SAIV incluem: sistema de navegação por mapas, informações de tráfego sobre congestionamento, incidentes, identificação de veículos para pagamento de portagens, entre outros. Os meios de distribuição desta informação podem ser através de painéis de mensagem variável, rádio, televisão, *internet*, entre outros demais[95][96].

As OVC promovem a melhoria da segurança e a produtividade nos transportadores rodoviários. Os veículos comerciais referem-se a veículos pesados de pessoas e mercadorias, assim como os veículos de emergência. Em certa medida, as OVC selecionam dos SAIV as características críticas referentes a veículos comerciais e de emergência. Esta categoria tem como objetivos promover inspeções de veículos para uma maior segurança, reduzir utilização de papel em favor de transições eletrónicas de modo a proporcionar uma burocracia mais eficiente, identificação automática de veículos, computadores de bordo, entre outros. Para que exista uma fluída utilização das OVC é necessário linhas de comunicação robustas entre agências reguladoras, centros de expedição, instalações na estrada e os dispositivos presentes nos veículos[95][96].

Os SATP aplicam o conceito de SIT às necessidades dos transportes público. Incluem técnicas como gestão da frota, gestão da mobilidade, informação aos viajantes e pagamento eletrónico, fornecendo informação aos utilizadores sobre os itinerários fixo, bem como desvios de itinerário, adaptando os serviços à procura. Estes sistemas podem ser empregues em autocarros, comboios, elétricos e táxis de viagem partilhada. De entre todas as tecnologias utilizadas por estes sistemas, o Sistema de Posicionamento Global, GPS, é a chave para um correto funcionamento, fornecendo informação em tempo real sobre a localização dos serviços públicos[95][96].

Os SATR são um conjunto de tecnologias SIT (SAGT, SAIV, etc.) apli-

cadadas ao meio rural. Enquanto que grande parte dos SIT foram desenvolvidos para dar respostas urbanas, SATR oferecem serviços para as necessidades rurais. Uma elevada percentagem de quilómetros de rodovia está situada em zonas rurais. Quando comparadas com as zonas urbanas, têm um conjunto único de características, como longas distâncias, baixos volumes de tráfego, raros congestionamentos, veículos agrícolas e animais em rodovia. As aplicações SIT desenvolvidas para tais ambientes não funcionariam em ambiente urbano, assim como vice-versa[95][96].

Na criação dos conceitos e normas técnicas do SIT, existia o termo Sistemas Avançados de Controlo de Veículos (SACV). Entretanto numa revisão de terminologia, esta classificação foi dividida em duas: Sistemas Avançados de Controlo e Segurança de Veículos (SACSV) e Sistema Automatizado de Auto-Estradas(SAAE)[97].

Os SACSV envolvem várias funções críticas para a segurança do utilizador, como o controlo longitudinal e lateral do veículo, tendo por objetivo evitar ou mitigar condições perigosas. Um sistema do tipo SACSV deve ter em conta todos quantos possíveis pontos de falha, de modo a proceder com medidas corretivas. A fim de verificar a segurança de um sistema, deve ser desenvolvida uma metodologia de avaliação antes da aplicação de novas tecnologias no sistema, de modo a que os erros nos processos de especificação, conceção, desenvolvimento e integração possam ser detetados e corrigidos a fim de evitar futuras situações que possam por em perigo o público geral[98].

Os SAAE tem por base a cooperação de veículo para veículo e entre veículos e infraestrutura, em contexto de auto-estrada, de modo a melhorar tanto a segurança dos utilizadores, assim como a capacidade das vias. Este conceito, na sua conceção, foi limitado pelo estado da arte da tecnologia, pois requeria várias especificações técnicas que não haviam sido desenvolvidas, nomeadamente condução sem intervenção do condutor. Nos últimos anos tem havido um notável estudo e desenvolvimento deste tipo de sistemas, porém a sua total aplicabilidade continua diminuta. Embora o ambiente das auto-estradas seja mais estruturado do que vias urbanas ou rurais, a densidade e a complexidade do tráfego rodoviário continuam a tornar os problemas de deteção e controlo de veículo um grande obstáculo. Como os veículos cooperativos são tripulados e coexistem com outros veículos de transporte de passageiros, conduzidos por humanos, a sua fiabilidade e as considerações de segurança são muito mais importantes quando comparado com os veículos sem ocupantes[96][99].

3.2.3 Casos de estudo

Com o objetivo de consolidar os tópicos que foram abordados ao longo deste capítulo, apresentam-se casos de estudo, destacando as tecnologias SIT aplicadas

ao mundo real.

3.2.3.1 GERTRUDE na cidade do Porto

O *software* de Gestão Eletrónica de Regulação do Tráfego Rodoviário (GERTRUDE) é um exemplo de um SAGT, aplicado na cidade do Porto. Esta aplicação, desenvolvida pela empresa GERTRUDE Saem S.A, sediada em França, surge em cooperação com a Câmara Municipal do Porto para o controlo automatizado do tráfego em tempo real. Este sistema tem definido os seguintes objetivos[100]:

- Reduzir o congestionamento urbano, em particular nas horas de maior afluência;
- Otimizar o uso das infraestruturas existentes;
- Reduzir o tempo de viagem;
- Promover a utilização e funcionamento dos veículos de transporte coletivo;
- Diminuir o impacto ambiental e responder às questões climáticas;
- Reduzir os acidentes e garantir a segurança das pessoas;
- Permitir uma melhor atuação dos veículos de emergência.

De modo a atingir os objetivos propostos, este sistema opera segundo dois princípios: em caso de uma circulação fluída, deve-se ter por base um conjunto de planos de regulação para cada zona. Em caso de congestionamento, deve-se isolar esta zona de saturação de veículos, de modo a manter uma circulação fluída nos restantes acessos. A área de atividade do sistema, a cidade do Porto, é dividida em zonas consoante características de tráfego (Fig. 3.14), sendo definidos planos de regulação associados a cada zona. Estes planos são atribuídos mediante a informação fornecida pelos detetores de contagem de tráfego e as taxas de ocupação, operando em ciclo com duração de 5 segundos, adaptando-se consoante o estado de circulação daquela zona[15].

3.2.3.2 C-Roads e C-Streets na cidade do Porto

O projeto *C-Roads* surge no âmbito de sistemas inteligentes de transportes cooperativos, em inglês *cooperative intelligent transport systems* (C-ITS), aplicado em grande escala nos países aderentes da União Europeia. Este tipo de sistemas englobam tecnologias e aplicações para permitir uma partilha ininterrupta de informação entre diferentes veículos (V2V) e entre veículos e infraestruturas (V2I)[101].



Figura 3.14: Zonas de funcionamento do sistema GERTRUDE na cidade do Porto[15].

Os serviços que utilizam conceitos SIT encontram-se divididos segundo o nível de complexidade e consequente aplicação no mundo real. Os serviços do tipo Dia 1 são projetos de menor complexidade, quando comparado com os consecutivos. Normalmente aplicados em auto-estradas, devido à maior uniformidade do trânsito, servem como provas de conceito para projetos de maior complexidade. A próxima geração de serviços, Dia 1.5, inclui projetos a serem implementados em meios urbanos, como gestão inteligente de parques e avisos em tempo real aos condutores. Atualmente, a última geração, Dia 2, abrange a interligação de veículos entre si e com a infraestrutura. Portugal encontra-se inserido neste projeto desde 2017, tendo implementado 5 projetos-pilotos[101]:

1. Ponto Único de Acesso: esta atividade, desenvolvida em conformidade com a lei europeia de SIT, consiste na conceção do protótipo do Ponto Único de Acesso, *Single Access Point* (SPA) em inglês, a nível nacional, abrangendo informação de cerca de 3390 km (20%) da rede de estradas. Associado a este projeto, encontra-se o desenvolvimento de uma aplicação móvel (SPApp), de modo a disponibilizar serviços com base nas informações fornecidas pelo SPA;
2. Rede portuguesa para C-ITS: compreende na implementação de um piloto para testar serviços Dia 1 e Dia 1.5 em 460 km da rede principal de estradas, incluindo troços transfronteiriço e acessos aos nós urbanos de Lisboa e Porto, utilizando um sistema de comunicação híbrido (rede G5 e serviço de telemóvel);
3. Preparação da rede para veículos conectados e autónomos: estudo de um projeto-piloto que irá preparar a rede transeuropeia de transportes (RTE-

- T) para frotas de veículos conectados entre si e autônomos, com níveis de automação 2 e 3, utilizando também o sistema de comunicação híbrido;
4. Piloto C-ITS no Nó Urbano de Lisboa: projeto piloto na cidade de Lisboa, definido pelas seguintes funcionalidades: monitorização do nível de serviço do tráfego e previsão do tempo de viagem, sistema de disponibilidade de estacionamento, priorização de corredores de sinais e corredores de autocarros, estimativa dos potenciais benefícios da integração do uso do automóvel particular com outros modos de transporte em auto-estradas;
 5. Piloto C-ITS no Nó Urbano do Porto: implementação de um piloto C-ITS no nó urbano do Porto, incluindo as seguintes funcionalidades: disponibilização da informação de tráfego em tempo real e previsões de tempo de viagens num intervalo de duas horas, utilizando comunicações serviço de telemóvel e *Wifi*, assim como a norma europeia de troca de dados viários DATEX. Contempla ainda a comunicação dos transportes públicos com a infraestrutura para a partilha de informação e serviços, tendo por base o protocolo de comunicações DATEXII.

O piloto 5, referente ao projeto C-ITS no nó urbano da cidade do Porto, revela destaque no contexto do tema da dissertação. Este projeto abrange duas sub-atividades: C-ITS para previsão de tráfego a curto-médio prazo e intercomunicação entre veículos e infraestruturas (V2I e I2V), integrada em transportes pesados de passageiros. Por sua vez, cada atividade engloba serviços ITS, demonstrado na Tabela 3.1[102].

Tabela 3.1: Serviços do Projeto-Piloto C-ITS no Nó Urbano do Porto

Sub-atividade	Serviços	Tipo
Previsão de tráfego a curto-médio prazo	Aviso de engarrafamento adiante	Dia 1
	Aviso de obras rodoviárias	Dia 1
	Condições meteorológicas	Dia 1
	Sinalização a bordo dos veículos	Dia 1
	Pedido de prioridade de trânsito por veículos de emergência	Dia 1
	Gestão do estacionamento na via pública	Dia 1.5
	Informações sobre estacionamento	Dia 1.5
	Informação de trânsito	Dia 1.5
	Rotas inteligentes	Dia 1.5
V2I e I2V em transportes	Aviso de engarrafamento adiante	Dia 1

Tabela 3.1: Serviços do Projeto-Piloto C-ITS no Nó Urbano do Porto

Sub-atividade	Serviços	Tipo
pesados de passageiros	Aviso de obras rodoviárias	Dia 1
	Condições meteorológicas	Dia 1
	Sinalização a bordo dos veículos	Dia 1
	Limites de velocidade nos veículos	Dia 1
	Pedido de prioridade de trânsito por transportes públicos	Dia 1
	Informação de trânsito	Dia 1.5
	Rotas inteligentes	Dia 1.5
	Navegação conectada e cooperativa	Dia 1.5

O *Cooperative Streets* (C-Streets) surge como uma evolução do *C-Roads*. Tal como o projeto anterior, engloba estudos com projetos-piloto, destinado a testar serviços C-ITS em várias zonas urbanas interligadas pela rede transeuropeia de transportes, complementando o *C-Roads*. Estes serviços são sujeitos a testes rigorosos, transparentes e replicáveis, de modo a revelar viabilidade a longo prazo, a relação custo-eficácia, os impactos e benefícios globais, antes de avançar para a implantação em grande escala na maioria das zonas urbanas, abordando a multimodalidade e a expansão urbana[102]. O projeto *C-Streets* Portugal, com início em 2019, consiste na implementação de 5 macro pilotos, nomeadamente:

1. Ponto de Acesso Nacional (PAN): o Ponto de Acesso Nacional, ou *National Access Point* (NAP), tem como principal objetivo a partilha de dados e a sua interoperabilidade no espaço europeu;
2. *C-ROADS* para *Cooperative Streets*: representa a conexão entre os dois projetos, dinamizando a interligação entre as estradas de maior capacidade e as vias mais urbanas;
3. *Cooperative Streets*: promove a expansão dos serviços cooperativos de sistemas de transporte inteligente em ambiente interurbano (foco do projeto *C-ROADS* Portugal) para o ambiente urbano, com a implementação das políticas de mobilidade;
4. Serviços de informação de viagem multimodais: a definição e implementação de uma ferramenta que permita ao setor público e privado a disponibilização de informação dos contratos públicos de transporte. Na região urbana do Porto contempla a construção de 10 estradas e 2 linhas de metro;

5. *Urban test-bed* – Zona de ensaio livre de tecnologia: estabelecimento de uma área que represente as condições reais de trânsito, de forma a testar tecnologias com diferentes níveis de maturidade. Na zona Frente Atlântica, constituída por partes dos municípios de Matosinhos, Porto e Gaia, tem como objetivo estabelecer duas bases para a implantação e validação de serviços dia 1 e 1.5, abordando a plena interoperabilidade dos ecossistemas de mobilidade e apoiando a conceção de regulamentação e outras políticas relevantes para o ensaio e adoção de soluções e serviços de mobilidade automatizada[102].

Capítulo 4

Fundamentos teóricos e desenvolvimento

Este capítulo começa com a apresentação dos modelos de previsão de tráfego, nomeadamente a definição e construção da matriz de origem-destinos, assim como a representação de uma rede de transportes. Procede-se com a apresentação e descrição dos modelos de simulação de tráfego, com as devidas subcategorias. Em seguida a compreensão do conceito de outliers, com a definição do método de seleção. Contempla ainda com a reiteração do problema proposto, procedendo com a apresentação do método de desenvolvimento da solução para tal problema, abrangendo a forma de operação do programa resultante.

4.1 Modelos de previsão de tráfego

A estimativa das condições de tráfego é um dos fatores com mais peso para a gestão do trânsito urbano e tomada de decisão. Os modelos de previsão do comportamento do tráfego baseiam-se em modelos matemáticos, tendo como objetivo principal a modelação do comportamento do tráfego, quer a nível do utilizador individual, quer a nível do conjunto. De forma a efetuar as previsões de tráfego para um dado arco rodoviário, revela-se crítico a recolha e análise de informação passada. Esta por sua vez é efetuada pelos sensores SIT, apresentados anteriormente, pelo que a escolha da sua localização deve ser determinada com recurso a técnicas que permitem conjeturar volumes de tráfego em arcos rodoviários em condições pré-definidas. Neste sentido, surge a matriz de origem-destinos (matriz OD)[17][103].

4.1.1 Matriz de origem-destinos

A matriz de origem-destinos apresenta-se como uma importante ferramenta para o planeamento urbano e para a implementação de sistemas de transporte. O estudo da matriz OD incide sobre as condições de oferta e procura, sendo utilizada para obter a informação de viagens existentes, assim como estimar o movimento dos veículos na região em análise, sendo deste modo um instrumento para a avaliação do investimento em transportes.

A Fig. 4.1 apresenta o formato geral de uma matriz OD. As linhas da matriz correspondem às origens das viagens e as colunas os destinos das viagens. Os elementos da matriz, T_{ij} , representam o número de viagens realizadas entre um local de origem i e o respetivo destino j , para um período pré-determinado[16].

Origens	Destinos					$\sum_i T_{ij}$
	1	2	3	...j	...z	
1	T_{11}	T_{12}	T_{13}	... T_{1j}	... T_{1z}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	T_{23}	... T_{2j}	... T_{2z}	O_2
3	T_{31}	T_{32}	T_{33}	... T_{3j}	... T_{3z}	O_3
...						
i	T_{i1}	T_{i2}	T_{i3}	... T_{ij}	... T_{iz}	O_i
...						
z	T_{z1}	T_{z2}	T_{z3}	... T_{zj}	... T_{zz}	O_z
$\sum_i T_{ij}$	D_1	D_2	D_3	... D_j	... D_z	$\sum_{ij} T_{ij} = T$

Figura 4.1: Exemplo genérico de matriz OD[16](adaptado).

Os blocos de construção da matriz OD tem por base a recolha de informação, onde várias fontes de informação são empregues para este meio: monitorização de imagens a partir de sistemas de vídeo, entrevistas a utilizadores da via, entre outros. Tendo em consideração que algumas fontes de informação são mais viáveis que outras, a recolha de dados por vezes pode carecer de exatidão. De modo a combater este problema, são utilizados métodos de atualização de matrizes OD[16][17].

Os métodos de atualização de matrizes OD tem como objetivo economizar tempo e recursos, sendo classificados pela sua capacidade de contabilizar erros, assim como aferir o congestionamento de redes de tráfego. Alguns dos *softwares* de atualização de matrizes OD mais utilizados são *Simulation of Urban MObility* (SUMO), TransCAD e Visum[17].

4.1.2 Representação da rede de transportes

Para o desenvolvimento de um modelo de transportes revela-se crítico a definição exata da representação da respetiva infraestrutura de transportes, para que sirva como plano base para simular as viagens ao longo da rede rodoviária. A Fig. 4.2 representa o formato geral de um esquema de rede de transportes.

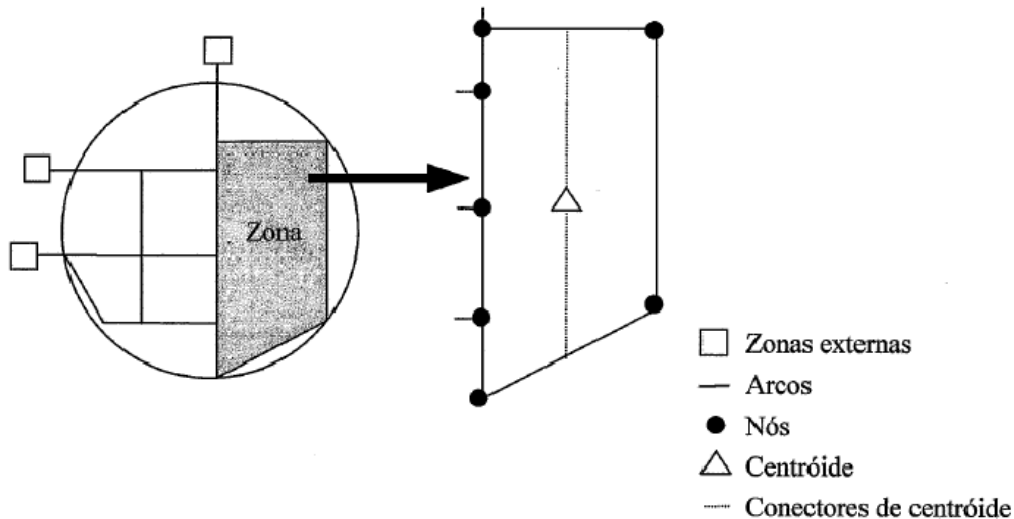


Figura 4.2: Exemplo genérico de uma rede de transportes[17].

O primeiro passo para a representação de uma rede começa com o estabelecimento de arcos, que correspondem aos segmentos da rede rodoviária. O comprimento dos arcos é definido pelos nós, identificadores de interseções, sendo que os arcos são delimitados pelo nó inicial e o nó final. Por sua vez, os nós são identificados pela sua localização geográfica. O parâmetro centróide representa o fluxo de veículos na via, encontrando-se ligado à rede de transportes pelo conector associado[17].

4.2 Modelos de simulação de tráfego

Os modelos de simulação de tráfego surgem da necessidade de determinar os benefícios e os impactos dos projetos a nível dos transportes, antes da sua implementação na rede rodoviária. Deste modo, possibilita um estudo e desenvolvimento que exige menos recursos e de maior segurança para o público geral. Os modelos de simulação abrangem vários cenários, adaptando o nível de precisão consoante o estudo em questão, tendo em consideração a interação entre veículos, pessoas e infraestruturas. Estes modelos têm por base as condições de circulação numa determinada rede, por sua vez dependente da relação entre oferta e procura. De forma a avaliar o desempenho de uma rede rodoviária, tem-se em

consideração as variações das condições da tráfego em intervalos de tempos comparáveis[18]. Por sua vez, os modelos de simulação de tráfego são classificados segundo três critérios:

1. Nível de detalhe: macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos;
2. Escala temporal: contínuos, discretos;
3. Representação do processo: determinística, estocástica.

O nível de detalhe revela-se a classificação mais empregada para análise em um modelo de simulação, tendo em conta a escala do projeto. A Fig. 4.3 apresenta os diferentes níveis de detalhe.

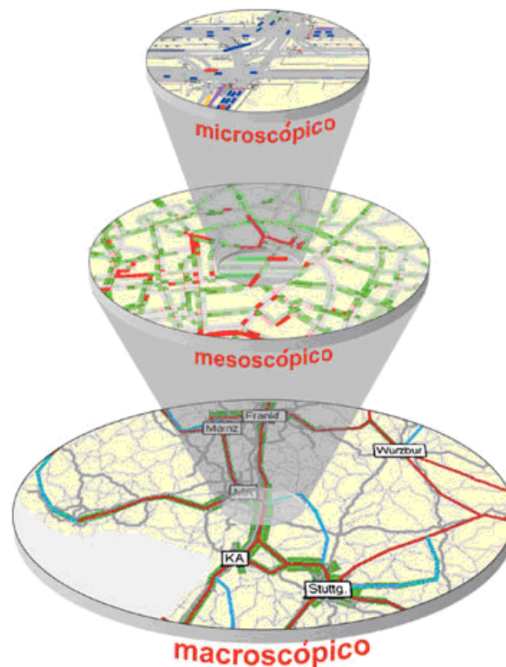


Figura 4.3: Nível de detalhe[18] (adaptado de: <https://www.roadtraffic-technology.com/>).

4.2.1 Modelo macroscópico

Nos modelos a nível macroscópico, os veículos e as viagens são modelados em grupo, por intervalos de tempo. Os volumes de tráfego que surgem desta modelação são estáticos, fornecidos em valores médios, com uma duração de simulação relativamente curta. Dentro da mesma rede rodoviária, as viagens são observadas como tendo a mesma velocidade, sendo esta por sua vez dependente do volume total. Tradicionalmente, eram os modelos de tráfego preferidos por causa

da sua relativa simplicidade e rapidez de simulação, quando comparado com os outros modelos. Porém, apresentam as suas limitações. A capacidade do sistema tem de ser fornecida como uma variável conhecida, o congestionamento da área analisada não pode ser inferido e a análise de interseção encontra-se estrangida, pois não é capaz de simular interações entre veículos individuais[18]. Este modelo apresenta um amplo alcance, referindo-se a correntes de tráfego com as seguintes grandezas macroscópicas:

- Débito;
- Velocidade média espacial;
- Velocidade média temporal;
- Densidade;
- Taxa de ocupação.

4.2.1.1 Débito

O valor de débito corresponde ao número de veículos que passam numa dada secção de estrada, durante um determinado período de tempo, geralmente num intervalo inferior a uma hora. Assim, a unidade do débito é de veículos por hora [veic/h]. A Equação 4.1 descreve como obter o débito, representado por $q(t_1, t_2, X)$ ou V_p , de uma dada secção X , sendo $n(t_1, t_2, X)$ o número de veículos que passam na secção X durante o intervalo de tempo $t_2 - t_1$ [19].

$$q(t_1, t_2, X) = V_p = \frac{n(t_1, t_2, X)}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

Revela-se notório referir que, apesar de ambas variáveis serem expressas em [veic/h], o débito e o volume de tráfego descrevem medições distintas. Enquanto que o débito descreve o número de veículos que passam num intervalo de tempo inferior a uma hora, o volume de tráfego descreve o número de veículos que passam num intervalo de tempo igual ou superior a uma hora[19].

4.2.1.2 Velocidade média

A velocidade média pode ser distinguida por velocidade média espacial e velocidade média temporal. A diferença destes conceitos assenta na maior sensibilidade da velocidade média espacial aos veículos lentos, pois, sendo dependente da densidade de tráfego, um veículo que ocupe a via durante mais tempo provoca uma leitura de concentração mais elevada. No caso da velocidade média temporal, como depende do débito de tráfego, esta variável não se revela capaz de detetar este comportamento, pois, uma vez que em duas vias é possível, para diferentes

velocidades, o débito ser igual se a distância entre veículos for proporcional à diferença de velocidades[19].

A velocidade média espacial descreve, para um dado instante, a média ponderada das concentrações das velocidades dos veículos, tendo como unidade quilómetros por hora [km/h]. A Equação 4.2 apresenta como obter a velocidade média no espaço u_s , para uma corrente de tráfego i , com densidade de veículos para um dado arco rodoviário k_i e velocidade individual dos veículos u_i [19].

$$u_s = \frac{\sum k_i u_i}{\sum k_i} \quad (4.2)$$

A velocidade média temporal define-se pela média ponderada dos veículos que passam numa dada secção, para um dado intervalo de tempo, expressa em quilómetros por hora [km/h]. A Equação 4.3 consiste na velocidade média no tempo u_t que depende, para uma corrente de tráfego i , do débito q_i nesse arco rodoviário e da velocidade individual dos veículos u_i [19].

$$u_t = \frac{\sum q_i u_i}{\sum q_i} \quad (4.3)$$

4.2.1.3 Densidade

A densidade, também designada por concentração, corresponde à distribuição dos veículos no espaço, num arco rodoviário, tendo como unidade o número de veículos por unidade de comprimento [veic/km]. A Equação 4.4 descreve a densidade $k(x_1, x_2, t)$, no instante t num troço de estrada entre x_1 e x_2 , onde $n(x_1, x_2, t)$ representa o número de veículos presentes no troço de estrada de comprimento $x_2 - x_1$ [19].

$$k(x_1, x_2, t) = \frac{n(x_1, x_2, t)}{x_2 - x_1} \quad (4.4)$$

4.2.1.4 Taxa de ocupação

A taxa de ocupação quantifica a percentagem de tempo que um determinado sensor se encontra acionado, ou seja, a zona de deteção encontra-se ocupada pela presença de um veículo. A Equação 4.5 expressa a variável da taxa de ocupação ϕ , em percentagem, em função do somatório dos intervalos de tempo em que o sensor está ativado pela passagem de um veículo i , para um tempo de amostragem T [19].

$$\phi = \frac{\sum t_i}{T} 100 \quad (4.5)$$

4.2.1.5 Relação fundamental das correntes de tráfego

A lei fundamental do tráfego estabelece a relação entre as grandezas previamente estabelecidas de débito, velocidade e densidade. A Equação 4.1 corresponde ao débito total q das correntes de tráfego elementares, isto é, composto pelo somatório de débitos de uma correntes de tráfego elementares (q_i). Por sua vez, Equação 4.7 refere-se à densidade total, num arco rodoviário, das correntes de tráfego elementares, ou seja, o somatório de densidade de correntes de tráfego elementares (k_i)[19].

$$q = \sum q_i \quad (4.6)$$

$$k = \sum k_i \quad (4.7)$$

Para uma corrente de tráfego elementar i , tendo por base as Equações 4.6 e 4.7, é possível deduzir a Equação 4.8, onde q_i corresponde ao débito da corrente de tráfego elementar, k_i à densidade da corrente de tráfego elementar e u_i a velocidade média da mesma corrente de tráfego elementar[19].

$$q_i = k_i u_i \quad (4.8)$$

Por fim, a relação fundamental das correntes de tráfego é validada pela Equação 4.8, assim como a definição de velocidade média no espaço u_s da Equação 4.2, sendo expressa na Equação 4.9. Esta relação permite determinar qualquer uma das grandezas macroscópicas a partir do valor de duas variáveis[19].

$$u_s = \frac{q}{k} \quad (4.9)$$

4.2.2 Modelo mesoscópico

Os modelos de tráfego mesoscópicos representa uma abordagem intermédia entre os modelos macroscópicos, que se baseiam na dinâmica de variáveis agregadas, e os modelos de tráfego microscópicos, que representam a dinâmica de cada veículo no fluxo de tráfego. Os modelos mesoscópicos descrevem a dinâmica do fluxo de tráfego de uma forma agregada, mas representam o comportamento individual dos condutores utilizando funções de distribuição de probabilidades. Apresentam um nível de detalhe superior aos macroscópicos, o que confere uma maior precisão de modelação do comportamento rodoviário, tornando-se uma ferramenta importante na tomada de decisões no setor de transportes[104][105].

4.2.3 Modelo microscópico

Os modelos de nível microscópico tem por base a simulação do comportamento individual de cada veículo numa dada rede rodoviária, tendo em consideração as características do veículo e do condutor. Este tipo de modelo complementa a análise dos sistemas de gestão de tráfego, auxiliando a implementação de sistemas inovadores. Com o avanço do poder computacional, os modelos microscópicos são cada vez mais favorecidos, devido à sua precisão e flexibilidade em situações especiais[18]. Neste modelo, as correntes de tráfego são descritas pelas seguintes grandezas microscópicas:

- Tempo entre veículos;
- Distância entre veículos;
- Velocidade individual.

No modelo microscópico, o foco de estudo incide sobretudo no movimento individual dos veículos. O movimento dos veículos pode ser definido sob a forma de um diagrama espaço-tempo, representado na Fig. 4.4 por um exemplo genérico do comportamento entre dois veículos, o veículo i e o veículo $i + 1$. No eixo das ordenadas, está presente a função $x(t)$, onde x representa a distância percorrida pelo veículo e no eixo das abscissas encontra-se t , o tempo despendido pelo veículo no percurso[19].

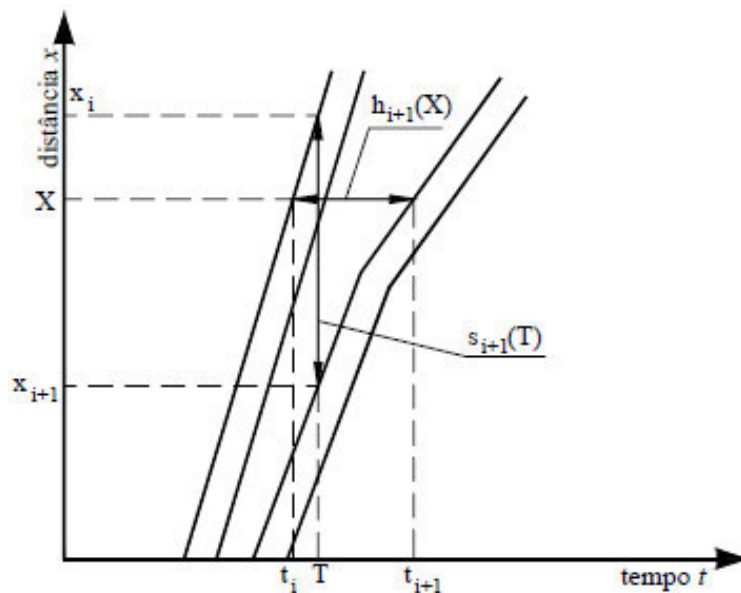


Figura 4.4: Diagrama espaço-tempo de dois veículos[19].

4.2.3.1 Tempo entre veículos

O tempo entre veículos define-se pelo intervalo de tempo, num local estático, entre dois veículos consecutivos. Por norma, tem como pontos de referência o pára-choques ou as rodas dianteiras. Revela-se uma métrica importante pois tem grande utilidade nos estudos de segurança rodoviária, medição do nível de congestionamento, entre outros. Na Equação 4.10 a diferença de tempo entre veículos encontra-se representada por h_{i+1} , expresso em segundos [s], também representada na Fig. 4.4 por X . Os instantes de passagem dos veículos i e $i + 1$ correspondem, respetivamente, a t_i e t_{i+1} [19].

$$h_{i+1} = X = t_{i+1} - t_i \quad (4.10)$$

4.2.3.2 Distância entre veículos

De forma análoga ao conceito de tempo entre veículos, a distância entre veículos é a diferença de posição, num dado instante de tempo, entre dois veículos consecutivos, tendo como pontos de referência os mesmos referidos anteriormente. Na prática, revela-se de difícil medição, porém, se conhecida, demonstra-se importante para implementação de distância a respeitar entre veículos, imposta por motivos de segurança rodoviária. Na Equação 4.11 a distância entre veículos encontra-se representada por s_{i+1} , expressa em metros [m], também representada na Fig. 4.4 por T . As distâncias à origem dos veículos i e $i + 1$ correspondem, respetivamente, a x_i e x_{i+1} [19].

$$s_{i+1} = T = x_i - x_{i+1} \quad (4.11)$$

4.2.3.3 Velocidade individual

A velocidade individual de um veículo destaca-se por ser uma das variáveis mais importantes no estudo das correntes de tráfego, permitindo a definição do nível de serviço de uma estrada, estimação de consumos de combustíveis e consequentes emissões de poluentes, entre outros. Como a velocidade dos veículos que passam num determinado local, não é constante, sendo medido por secção de estrada. De modo a efetuar um estudo da velocidade numa secção, utilizam-se métodos matemáticos como a distribuição normal, distribuição log-normal e distribuição de *Erlang*[19].

Com a determinação da Equação 4.10 e Equação 4.11, evidencia-se uma relação entre estas. A Equação 4.12 apresenta a relação fundamental entre as duas métricas anteriormente expostas, tendo como elemento de ligação a variável u_{i+1} . Esta representa a velocidade do veículo $i + 1$, expressa em quilómetros por hora [km/h], durante o intervalo de tempo h_{i+1} [19].

$$s_{i+1} = h_{i+1}u_{i+1} \quad (4.12)$$

4.2.4 Escala temporal

Os modelos de simulação de tráfego podem ser classificados quanto ao comportamento das variáveis independentes, sendo estas referentes à posição e velocidade dos veículos, assim como o tempo de percurso. Assim, distinguem-se em modelos estáticos ou dinâmicos[104]:

- Modelos estáticos: são definidos por variáveis constantes, como a procura de via, ao longo do tempo, para uma determinada amostra temporal. No intervalo de análise, as mudanças do comportamento do tráfego são assinaladas por solicitações contínuas de frequência incerta;
- Modelos dinâmicos: as variáveis mudam de valor ao longo do decorrer da simulação. Assim, define-se por base a escala temporal, onde as mudanças do tráfego são registadas de forma descontínua, em intervalos de tempo discretos.

Em termos de aplicabilidade, os modelos dinâmicos são os mais empregues, dado que a maioria dos sistemas rodoviários apresenta um comportamento dinâmico. Deste modo, os modelos de simulação de tráfego costumam ter como variável independente fundamental a medição do tempo[106].

4.2.5 Representação do processo

Os modelos de simulação de tráfego podem ainda ser classificados quanto à forma analítica aplicada nestes. Nesta vertente surge a abordagem determinística e abordagem estocástica[16]:

- Abordagem determinística: nesta abordagem, todas as variáveis associadas ao processo são definidas através de relações exatas, considerando um comportamento igual para todos os intervenientes;
- Abordagem estocástica: com este método são incorporadas variáveis aleatórias e funções de probabilidade, modelando os processos de forma incerta.

4.3 Metodologia de identificação de *outliers*

Os SIT, por norma, englobam grandes quantidades de dados recolhidos de várias fontes. Tendo em conta que existem diversos motivos para que surjam leituras anormais nos sistemas de análise de dados de tráfego, revela-se necessário

o estabelecimento do que é um valor fora do comum, assim como a criação de técnicas algorítmicas para detecção de erros e falhas nas leituras de sensores. Nesta vertente assenta o conceito de *outlier*.

4.3.1 Definição de *outliers*

A definição de valor *outlier* depende do contexto em que este é aplicado, porém é possível estabelecer um conceito geral. Os *outliers* revela-se como valores inconsistentes com os restantes dados, podendo ser valores esporádicos ou séries de dados que apresentam um grande desfasamento da norma. Como são observações irregulares, a sua existência num conjunto de dados põem em causa a fiabilidade dos resultados obtidos, tendo um notório efeito em métricas estatísticas[107][108].

4.3.2 Análise de *outliers*

A análise de *outliers* consistem em três fases distintas[109]:

- Numa primeira abordagem, procede-se com a identificação de valores que poderão constituir-se em possíveis *outliers*. Para esta finalidade são utilizadas tabelas, gráficos, observação direta ou métodos estatísticos, atribui-se uma definição mais específica a valor *outlier*, dependente dos dados em análise;
- Em seguida, os potenciais *outliers* são sujeitos a testes de modo a verificar a discordância entre os dados. Os parâmetros de teste dependem da situação em estudo, sendo que se a análise estatística de uma dada amostra de valores for diferente de uma amostra padrão, a amostra em avaliação contém *outliers*;
- Numa última fase, faz-se uma tomada de decisão relativa aos *outliers*. Dependente da natureza da análise em causa, estes poderão ser eliminados, com a consequente perda de informação, devidamente transformados, de modo a preservar a informação da análise, ou ainda não modificar o conteúdo, destacando os valores considerados *outliers*.

4.3.3 Técnicas de detecção de *outliers*

Devido à natureza variável dos *outliers*, a detecção destes não pode ser realizada por uma única técnica comum. Assim, surge a necessidade de considerar qual técnica a aplicar, consoante o estudo em questão. Em seguida são apresentadas algumas das técnicas empregadas na detecção de *outliers*[110]:

- Classificação: esta técnica tem por base a distinção entre dados normais e dados *outliers*. Define-se uma zona de normalidade, onde os dados estabelecidos como normais se encontram e se algum dado estiver fora desta zona é classificado como *outlier*;
- Agrupamento: nesta técnica os dados considerados normais são agrupados, formando grupos de grande dimensão e de alta densidade, enquanto que os dados *outliers* ou não pertencem a nenhum grupo ou pertencem a grupos muito pequenos;
- K-vizinho: esta técnica tem por base a premissa que os dados normais tem vários vizinhos próximos deles, sendo que quanto mais afastado uma medição estiver estes dados, maior a discrepância desta medição, sendo considerada como *outlier*;
- Estatística: esta técnica aplica a matemática estatística ao conjunto de dados a analisar. Através de cálculos é inferido o grupo de dados normais, sendo que os *outliers* são dados com baixa probabilidade de pertencer ao grupo. De modo a determinar o grupo de dados normais, recomenda-se o uso da medida de dispersão de desvio absoluto da mediana, com um desvio de 2.5 vezes o valor da mediana[111];
- Visualização computacional: técnicas desta natureza apresentam os dados em gráficos, de modo a facilitar a identificação de *outliers* por observação. Para um conjunto de dados de grande ou média dimensão revela-se necessário o uso de ferramentas computacionais, devendo escalar o poder computacional consoante a dimensão da amostra.

4.4 Problema proposto

A Câmara Municipal do Porto utiliza um *software* de gestão de tráfego, SWOFT, com interface aberta e padronizada dos controladores de tráfego para ter a opção de interligar controladores de diferentes fabricantes, permitindo a expansão da rede de controladores de tráfego inteligentes conforme as necessidades futuras e as possibilidades tecnológicas. Este *software* veio substituir o sistema SIGA abordado anteriormente. À altura da realização deste trabalho, 153 controladores encontram-se integrados no sistema, dos quais 3 novos em cruzamentos centralizados, num universo de 272 controladores a serem substituídos.

Para complementar o *software* de gestão de tráfego, é utilizado um sistema de informação geográfica, de modo a facilitar a visão geral do sistema de tráfego, exibindo os controladores na sua localização geográfica exata, assim como a informação de tráfego e especificações associadas a cada controlador. O sistema implementado designa-se de eDaptiva.

Com o objetivo de melhorar a mobilidade urbana, o sistema de gestão de tráfego aplica planos de macro e micro regulação, consoante a procura nos cruzamentos, fazendo uma gestão dinâmica do tempo efetivo de verde, ou seja, passagem de veículos, tendo também em conta as botoneiras acionadas pelos peões. Para efetuar esta gestão dinâmica em tempo real, estão instalados sensores SIT, nomeadamente espiras eletromagnéticas, nos pavimentos adjacentes aos cruzamentos semaforizados.

Através das espiras eletromagnéticas é feito o registo da contagem do tráfego. A informação fornecida pelos detetores é constituída pelas somas acumuladas de veículos em intervalos de 10 minutos, resultando em 144 entradas diárias por cada detetor. Esta informação encontra-se disponível numa API (*Application Programming Interface*), hospedada em servidores, acedida apenas através da rede de *internet* interna da câmara municipal. A conexão entre os controladores e os servidores encontra-se ao encargo da Associação Porto Digital (APD). Por sua vez, toda esta informação encontra-se representada graficamente na plataforma eDaptiva. Porém, esta informação cede de qualquer análise quanto ao seu conteúdo, ou seja, as leituras são apresentadas em bruto. Quando estes mesmos dados incluem erros de medição, estes são apresentados, por quanto mais incoerente for o valor de medição.

A presente dissertação tem como principal objetivo acometer este problema de falta de análise de dados, propondo um tratamento dos dados, identificando potenciais erros (*outliers*) e representar graficamente os dados solicitados pelo utilizador. A interface gráfica visa facilitar a consulta da elevada quantidade de dados, oferecendo ao utilizador opções de tratamento dos dados.

4.5 Análise de dados

O comportamento do tráfego em meio urbano depende, em parte, de eventos aleatórios que influenciam as condições de circulação rodoviária, sendo que por sua vez o processo de recolha de dados viários introduz ainda mais incerteza no sistema. Deste modo, revelam-se cruciais considerações empíricas e intuitivas descritas na seguinte análise de dados de tráfego automóvel, tendo em consideração o uso de valores teorizados, fundamentados em estudos anteriores, para a definição de registos anormais (*outliers*).

4.5.1 Dados de origem

Os dados utilizados no projeto tem como fonte a API anteriormente referida, disponibilizando os dados das contagens de veículos para cada espira, desde o início da ligação da devida espira ao sistema. Para aceder à API, é necessário duas condições: estar conectado à rede interna da CMP e ter as credenciais de

acesso. Com as credenciais, utiliza-se o método POST para enviar um pedido ao servidor, de modo que a resposta contenha um *token* para a sessão, válido por 2 horas. Este *token* garante autorização para efetuar pedidos com o método GET, de modo a obter a resposta que contém os dados utilizados na análise. Em seguida encontra-se um excerto de código correspondente a uma resposta de um controlador de tráfego:

```
{
  "AggregatedDetectorCategoryValues": [],
  "AggregatedDetectorValues": [
    {
      "DetectorNr": 1,
      "DetectorName": "b1",
      "Occupancy": 0,
      "VehiclesPerHour": 36,
      "Id": "647ee9f63c4708e40b43f43a",
      "CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
      "Locked": false
    },
    {
      "DetectorNr": 2,
      "DetectorName": "b2",
      "Occupancy": 0,
      "VehiclesPerHour": 6,
      "Id": "647ee9f63c4708e40b43f43b",
      "CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
      "Locked": false
    },
    {
      "DetectorNr": 4,
      "DetectorName": "e1",
      "Occupancy": 22,
      "VehiclesPerHour": 1014,
      "Id": "647ee9f63c4708e40b43f43c",
      "CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
      "Locked": false
    },
    {
      "DetectorNr": 5,
      "DetectorName": "e2",
      "Occupancy": 30,
      "VehiclesPerHour": 180,
      "Id": "647ee9f63c4708e40b43f43d",
      "CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
      "Locked": false
    }
  ]
}
```

```

    "DetectorNr": 6,
    "DetectorName": "e3_ct",
    "Occupancy": 6,
    "VehiclesPerHour": 528,
    "Id": "647ee9f63c4708e40b43f43e",
    "CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
    "Locked": false
  },
  {
    "DetectorNr": 7,
    "DetectorName": "e4_ct",
    "Occupancy": 11,
    "VehiclesPerHour": 1020,
    "Id": "647ee9f63c4708e40b43f43f",
    "CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
    "Locked": false
  },
  {
    "DetectorNr": 8,
    "DetectorName": "e5_ct",
    "Occupancy": 4,
    "VehiclesPerHour": 438,
    "Id": "647ee9f63c4708e40b43f440",
    "CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
    "Locked": false
  }
],
"__type": "TrafficStateDetectorAggDto",
"IntervalFrom": "2023-06-06T09:00:00+01:00",
"IntervalTo": "2023-06-06T09:10:00+01:00",
"ControllerUUID": "bd4b31e9-7c61-40bc-99cd-b67058b30d4b",
"SubsecondOffset": 0,
"Id": "647ee9f63c4708e40b43f439",
"CreatedOn": "2023-06-06T08:10:30Z",
"Locked": false
}

```

As respostas apresentam-se em formato *json*, com dados relativos a intervalos de 10 minutos, devidamente identificados com um carimbo de data e hora de início ("*IntervalFrom*") e outro de data e hora de fim da leitura ("*IntervalTo*"), ambos em formato UTC+01:00. Cada controlador de tráfego automóvel tem uma identificação associada (*uuid*), sendo que na resposta corresponde ao campo "*ControllerUUID*". Esta identificação é utilizada no pedido à API para obter informações gerais e dados de tráfego do controlador. O campo "*AggregatedDetectorValues*" contém os sub-campos com as informações relevantes do comportamento do tráfego para cada detetor:

- *"DetectorNr"*: número de identificação do detetor na respetiva planta do cruzamento;
- *"DetectorName"*: nome do detetor, utilizado na planta do cruzamento para identificação. No presente projeto, utiliza-se este campo para filtrar as espiras de pedido (e1, e2), espiras contadoras (e_ct) e espiras fila de cauda (e_lq) dos outros detetores, por exemplo, botoneiras (b1, b2) ou radar *doppler* (rdp). De referir que, apesar das diferentes nomenclaturas, todos os tipos de espiras realizam contagem de veículos;
- *"Occupancy"*: ocupação do detetor, em percentagem. Este valor corresponde à relação entre o tempo de ativação do detetor com o intervalo de leitura de 10 minutos;
- *"VehiclesPerHour"*: registo dos veículos detetados. O valor apresentado na resposta corresponde a um fator de 6 vezes do valor medido pelo detetor, de modo a estimar os veículos detetados por uma hora a partir da medição de duração de 10 minutos;
- *"Id"*: número de identificação da leitura do detetor;
- *"CreatedOn"*: carimbo temporal de criação da leitura no servidor. Por norma, para uma dada leitura de cruzamento, todos os detetores tem o mesmo carimbo temporal. Revela-se importante referir que, enquanto os campos *"IntervalFrom"* e *"IntervalTo"* encontram-se em formato UTC + 01:00, o campo *"CreatedOn"* encontra-se em formato Zulu, sendo esse o motivo que este campo aparenta estar 1 hora em atraso quando comparado com os outros dois carimbos temporais, o que não é a realidade;
- *"Locked"*: estado do detetor, onde *false* corresponde a um detetor desbloqueado, que se encontra a efetuar medições.

4.5.2 Tratamento dos dados

Os dados em bruto originários da resposta da API encontram-se sem filtragem das medições. Deste modo, após a recolha dos dados procede-se com o tratamento dos dados viários, nomeadamente a identificação de *outliers*. Porém, antes de tratar os valores anormalmente altos, existe mais um fator da resposta da API a ter em consideração.

Por observação dos dados, nas primeiras 6 horas do dia, onde geralmente o tráfego registado é quase nulo, por vezes a API retorna registos do controlador que não contemplam todas as espiras. Estas faltas de registo apresentam consequências na representação gráfica dos resultados, levando a um desfazamento dos valores relativos ao carimbo temporal associada. De modo a combater esta

advertência, o projeto implementa um algoritmo que verifica quais as leituras do controlador sem todas as espiras e preenche os campos de "*VehiclesPerHour*" e "*Occupancy*" da devida espira com um valor nulo, assinalando no gráfico estas mesmas leituras.

Tendo em consideração os valores *outliers* anormalmente altos, revela-se necessário a definição de um valor máximo de tráfego, que teoricamente as estradas suportam. Segundo a revisão mais recente, à data de escrita, do *Highway Capacity Manual*[20], a saturação máxima de uma via urbana numa área metropolitana, com mais de 250000 habitantes, é de 1900 veículos por hora por via de trânsito[112], assim como demonstra a Tabela 4.1. De acordo com os Censos 2021, a área metropolitana do Porto tem uma população de 1.737.395 residentes[113].

Tabela 4.1: Débito de saturação teórico máximo por tipo de zona[20].

Tipo de zona	Valor padrão [uvl/h/via]
Área metropolitana com população igual ou superior a 250000 habitantes	1900
Outros	1750

Nota: uvl/h/via - veículos por hora por via de transito.

Tendo em consideração que o valor de saturação máxima teórica representa o fluxo de tráfego médio previsto para uma via em condições geométricas e de tráfego exceccionalmente favoráveis, na realidade o valor do débito será sempre inferior a este teorizado. Segundo o Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária[114], o débito máximo de uma via é reduzido em 30% quando se interceta com interseções semaforicas, como é o caso das vias em estudo. Tendo em consideração que o comportamento do tráfego também depende de fatores fora do controlo humano, é recomendável a aplicação de um fator de correção empírico, f_c , com um valor adimensional de 1.15, compensando o cálculo do débito perante o intervalo de tempo entre veículos. Nas Equações 4.13 e 4.14 encontram-se as expressões matemáticas deduzidas para determinar o limiar máximo de débito acumulado, num intervalo de 10 minutos (V_{p10min}) e de 1 hora (V_{p1h}), respetivamente.

$$V_{p10min} = vpe \times N \times \frac{1900 \times 0.70}{60min} \times 10min \times f_c \approx vpe \times N \times 254[uvl/10min] \quad (4.13)$$

$$V_{p1h} = vpe \times N \times \frac{1900 \times 0.70}{1h} \times f_c \approx vpe \times N \times 1529[uvl/h] \quad (4.14)$$

Relativamente às fórmulas apresentadas, revela-se importante apresentar algumas considerações. Enquanto que a fórmula relativa ao intervalo de 10 minutos pretende demonstrar os registos para o menor intervalo de amostragem possível, a fórmula de intervalo de 1 hora apresenta os registos, à exceção das correções posteriores, que são retirados dos controladores de tráfego, sendo a unidade $[uvl/h]$ (veículos por hora) a norma nos estudos do fluxo de tráfego viário.

Os valores apresentados nas fórmulas são os limites básicos, sendo que as fórmulas também contemplam o número de vias em análise, N , assim como o número de vias por espira, vpe . Com a atualização dos controladores de tráfego, houve uma mudança de política de implementação de espiras, passando a haver uma espira por cada via de trânsito. Porém, ainda existem cruzamentos onde vias adjacentes partilham uma única espira. Nestes casos, devidamente identificados, a variável assume um valor inteiro maior que 1, dependendo efetivamente do número de vias com espira partilhada.

4.6 Implementação

Com a definição dos parâmetros a quais os dados dos registos devem ser sujeitos, procede-se com a implementação do sistema. De modo a concretizar este sistema, estabelece-se a linguagem de programação a qual o programa será desenvolvido, assim como o posterior processo de desenvolvimento do mesmo.

4.6.1 Linguagem de programação

A linguagem de programação utilizada no desenvolvimento deste sistema foi a linguagem de programação de alto nível *Python*. Amplamente utilizada em aplicações de análise de dados[115], *Python* encontra-se incluído na lista de licenças de *software* livre da *Open Source Initiative* (OSI). Sendo uma das linguagens de programação mais amplamente utilizada[116], apresenta um grande volume de suporte disponível, quer através de documentação oficial[117], quer através de suporte comunitário. Considerando a natureza analítica do projeto, esta linguagem disponibiliza uma abundância de *frameworks* e bibliotecas de funções especializadas relevantes, tais como:

- *Requests*: uma das mais utilizadas bibliotecas em *Python*, simplifica o envio de pedidos HTTP/1.1[118];
- *Matplotlib*: ampla biblioteca para manipulação de gráficos 2D[119];

- *Python Imaging Library* (PIL): biblioteca para manipulação de imagens digitais[120];
- *Tkinter*: módulo padrão para interfaces gráficas em *Python*[121].

4.6.2 Etapas do programa desenvolvido

De forma a cumprir com os objetivos propostos, o programa desenvolvido deverá encontrar-se devidamente estruturado, estabelecendo uma sequência lógica que permite receber comandos de entrada por parte do utilizador, extrair dados relevantes, submeter estes dados a avaliação de *outliers* e apresentar ao utilizador informação útil numa interface gráfica. Para este efeito, define-se as seguintes etapas para um normal funcionamento do programa:

1. Iniciar variáveis globais;
2. Conversão dos ficheiros PDFs das plantas dos cruzamentos para ficheiros JPEG através da função *image_convert()* (Anexo A);
3. Pedido POST à API com credenciais de acesso, de modo a obter *token* de autorização;
4. Pedido GET à API, com o *token*, para obter informações gerais de todos os controladores de tráfego;
5. Guardar resposta do pedido GET num ficheiro JSON;
6. Guardar em lista os nomes dos cruzamentos;
7. Criação da janela com o menu inicial para escolha do cruzamento a consultar, fazendo uso da lista de nomes dos cruzamentos;
8. Apresentação da janela inicial ao utilizador;
9. Criação da janela com o menu de parâmetros para a representação em gráfico;
10. Criação da janela dinâmica com o mapa correspondente ao cruzamento, sobreposto com uma camada da localização das espiras na imagem;
11. A camada que sobrepõem a imagem do mapa retira a informação da localização das espiras na imagem de um ficheiro JSON;
12. O ficheiro JSON, *images_coordinates.json* (Anexo B), contém dicionários com identificação dos cruzamentos, que por sua vez contém dicionários com identificação das espiras. A esta implementação designa-se de *nested dictionary*. No nível mais profundo encontram-se as coordenadas das espiras, em unidade de *pixel*;

13. Este ficheiro JSON é gerado a partir de um *script*, *coords_generator.py*, que é executado caso o ficheiro JSON não seja detetado no diretório base;
14. Caso o utilizador pretenda disponibilizar um cruzamento para consulta, deve incluir a planta do cruzamento, em formato *PDF*, no diretório *VIA\plantas\PDF*, assim como registar as coordenadas, em *pixel*, de cada espira na imagem gerada no ficheiro *images_coordinates.json*, de acordo com a estrutura predefinida;
15. Interligação entre interação no mapa e o menu de parâmetros;
16. Apresentação ao utilizador da janela com o menu de parâmetros, assim como da janela com o mapa do cruzamento;
17. Estabelecimento de condições ao carregar no botão "Gráficos", nomeadamente verificações do estado dos parâmetros;
18. Se os parâmetros estiverem corretos, avança para a realização de pedidos GET à API, referentes aos parâmetros anteriormente selecionados;
19. Com a resposta relativa à informação dos dados de tráfego, procede-se com um tratamento preliminar dos dados brutos;
20. Por vezes a resposta da API contempla carimbos de tempo duplicados, com as mesmas medições de tráfego. Deste modo, o programa filtra estes resultados duplicados, deixando só uma leitura;
21. Caso a resposta da API esteja completamente vazia, é apresentada uma mensagem ao utilizador;
22. Procedendo com o normal funcionamento do programa, caso haja carimbos de tempo inválidos, nomeadamente *UNIX epoch* a 01/01/1970 às 00:00:00 (UTC), estes são eliminados da lista de leituras;
23. Caso haja carimbos de tempo com leituras vazias, estes são guardadas num ficheiro JSON, identificando o cruzamento e intervalo de tempo de consulta, sendo excluídas do resultado final;
24. Guardar resposta relativa à informação geral do controlador numa lista e num ficheiro JSON;
25. Guardar resposta relativa à informação dos dados de tráfego numa lista e num ficheiro JSON;
26. Utilizar lista dos dados de tráfego para retirar as métricas de veículos contabilizados e percentagens de ocupação, com os devidos carimbos temporais;

27. Correção dos registos com detetores em falta, preenchendo estas lacunas a 0 e assinalando os carimbos temporais correspondentes (Anexo C);
28. Se mais que uma espira for seleccionada, os dados das contagens dos veículos são somados e calculada a média das ocupações, com respeito ao carimbo temporal associado;
29. Cálculo do limite de débito máximo teórico para os parâmetros requisitados (Anexo D);
30. Se o parâmetro for definido como tal, limitar o valor das leituras *outliers* ao máximo teórico;
31. Cálculo da média das contagens dos veículos;
32. Criação da janela com os gráficos de ocupação e contagem dos veículos, dependente dos parâmetros estabelecidos;
33. Criação de barra deslizante (*slider*) para interação do utilizador, permitindo a visualização de todas as leituras;
34. Criação da legenda dos gráficos;
35. Apresentação da janela ao utilizador.

O programa desenvolvido necessita que um interpretador *Python* e as bibliotecas utilizadas pelo programa estejam devidamente instaladas no computador para a execução da aplicação. De modo a permitir uma distribuição mais simplificada da aplicação, implementa-se *PyInstaller*. Este pacote agrupa uma aplicação *Python* e todas as suas dependências num único pacote, permitindo ao utilizador executar a aplicação empacotada sem instalar um interpretador *Python* ou quaisquer outros módulos[122]. Em seguida encontra-se o comando e argumentos, aplicados na linha de comandos, utilizados para a criação do diretório que contém o executável da aplicação, sub-diretórios e ficheiros dependências, assim como as bibliotecas *Python* utilizadas de forma empacotada.

```
pyinstaller --noconfirm --onedir --windowed --icon "C:/Users/
antoniodsantos/Documents/VIA/logos/via_icon.ico" --name "VIA
" --add-data "C:/Users/antoniodsantos/Documents/VIA/
coords_generator.py;" --add-data "C:/Users/antoniodsantos/
Documents/VIA/images_coordenates.json;" --add-data "C:/
Users/antoniodsantos/Documents/VIA/main.py;" --add-data "C
:/Users/antoniodsantos/Documents/VIA/docs;docs/" --add-data
"C:/Users/antoniodsantos/Documents/VIA/logos;logos/" --add-
data "C:/Users/antoniodsantos/Documents/VIA/logs;logs/" --
add-data "C:/Users/antoniodsantos/Documents/VIA/plantas;
plantas/" --collect-all pypdfium2 --hidden-import babel.
numbers "C:/Users/antoniodsantos/Documents/VIA/main.py"
```


Capítulo 5

Resultados

No presente capítulo procede-se com a validação da implementação da aplicação, compreendendo um guia de utilização da aplicação, com a devida apresentação dos resultados obtidos através do programa desenvolvido.

5.1 Utilização da aplicação

Para iniciar o programa, assumindo que o utilizador se encontra na posse de uma distribuição correta da aplicação, deve-se entrar no diretório base, por defeito designado de "VIA" e executar o ficheiro com o mesmo nome, do tipo *.exe*, identificado pelo ícone associado, assim como demonstra a Fig. 5.1.



Figura 5.1: Ícone da aplicação VIA.

5.1.1 Interface do menu interativo inicial de consulta

Após a iniciação da aplicação, o programa integra módulos que fazem a verificação de condições críticas para o funcionamento do mesmo. Caso haja uma falha de comunicação entre o computador do utilizador e o servidor que aloja a informação dos controladores de tráfego, é apresentada uma janela ao utilizador a informar tal ocorrência, assim como demonstra a Fig. 5.2. Na origem desta

situação poderão estar vários fatores, como a falha de rede, tanto do utilizador como do servidor, ou erro de *Domain Name System* DNS, porém a condição imprescindível para a utilização da aplicação assenta na ligação do computador do utilizador à rede interna da Câmara Municipal do Porto.



Figura 5.2: Janela de erro de conexão ao servidor.

Aquando da inicialização da aplicação, após a verificação de conexão ao servidor, o programa averigua a existência do diretório "PDF", por sua vez localizado no diretório "plantas". Este diretório contém as plantas dos cruzamentos, em formato *.pdf*, sendo deste modo fundamental para a utilização da aplicação, nomeadamente para seleccionar as espiras a consultar. Desta forma, caso não exista este diretório, ou este esteja vazio, é apresentada ao utilizador uma janela a informar para inserir as plantas dos cruzamentos no diretório específico, assim como demonstra a Fig. 5.3.

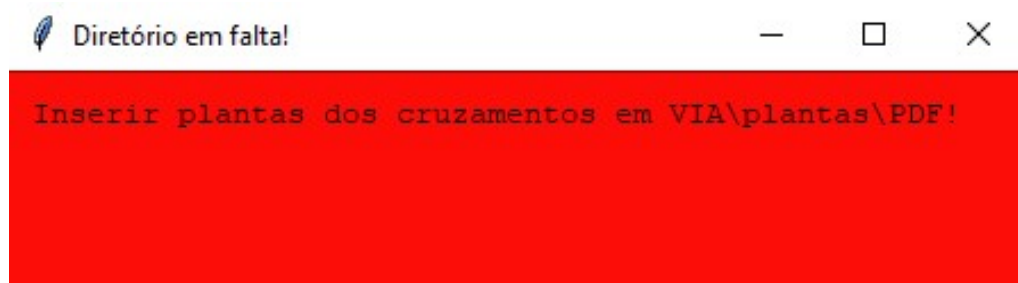


Figura 5.3: Janela de erro de localização das plantas dos cruzamentos.

No caso das condições anteriores não se verificarem, é apresentado um menu interativo ao utilizador, como representa a Fig. 5.4. Neste menu são listados todos os cruzamentos modernizados, sendo que fornece a opção de pesquisar cruzamentos através de preenchimento automático. Após a seleção do cruzamento a consultar, procede-se com a aplicação através do botão "Seguinte".



Figura 5.4: Interface inicial de consulta.

Com o clique do botão "Seguinte" procedem-se algumas verificações. Se nenhum cruzamento tiver sido selecionado pelo utilizador, é apresentada uma janela a indicar esta mesma informação, como demonstra a Fig. 5.5.

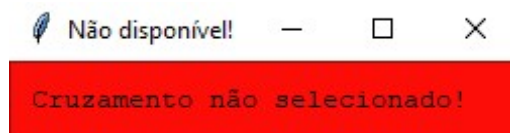


Figura 5.5: Janela de erro de falta de seleção de cruzamento.

Apesar de estarem listados todos os cruzamentos modernizados, apenas uma amostra diminuta destes se encontra efetivamente disponível para consulta. Isto deve-se ao facto de que o projeto, como uma prova de conceito, apenas se encontra desenvolvido para os cruzamentos da Rua da Constituição, nomeadamente os cruzamentos identificados pelos números 3, 5, 14 & 107, 74, 75, 86 & 127, 88 e 112. Caso não seja selecionado um dos cruzamentos referidos, é apresentado ao utilizador a janela da Fig. 5.6.

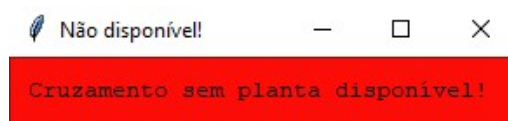


Figura 5.6: Janela de erro de cruzamento sem planta disponível.

Na condição de que nenhuma exceção é apresentada, ao menu de escolha de cruzamento sucedem-se duas janelas: o mapa interativo do cruzamento selecionado e o menu de seleção de parâmetros de consulta.

5.1.2 Mapa interativo da planta de cruzamento

O mapa interativo, proveniente da planta do cruzamento, encontra-se enquadrado numa janela dinâmica, permitindo *zoom* à imagem sem perda de qualidade. Para aumentar e diminuir o nível de aproximação faz-se uso do *scroll* do rato do computador em que o programa está a ser executado. A Fig. 5.7 apresenta a janela com o mapa interativo.

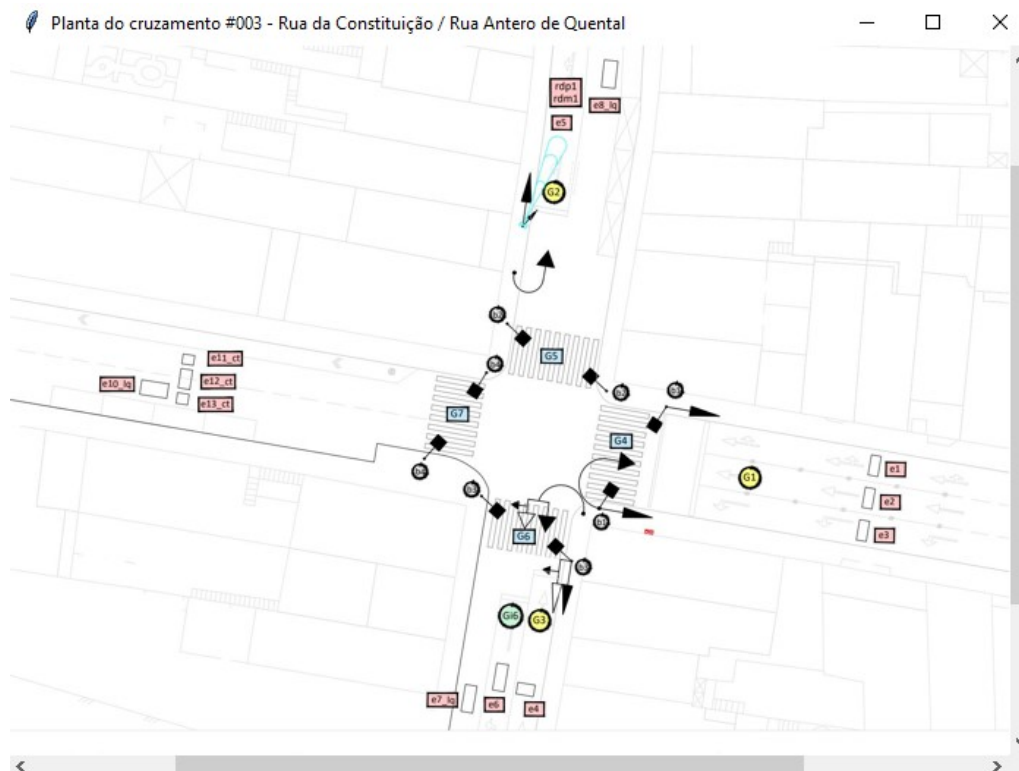


Figura 5.7: Exemplo de um mapa interativo de cruzamento.

No mapa interativo efetua-se a seleção da(s) espira(s) a consultar. Ao passar o rato por cima das espiras na imagem da planta, a área de identificação da espira muda de cor, significando que este elemento pode ser selecionado, assim como apresenta a Fig. 5.8. Aquando do clique no elemento de identificação da espira, o campo de "Espiras seleccionadas:" no menu de seleção de parâmetros de consulta é atualizado com a espira selecionada. Do mesmo modo, para retirar uma espira da lista de consulta volta-se a selecionar a mesma espira no mapa interativo.

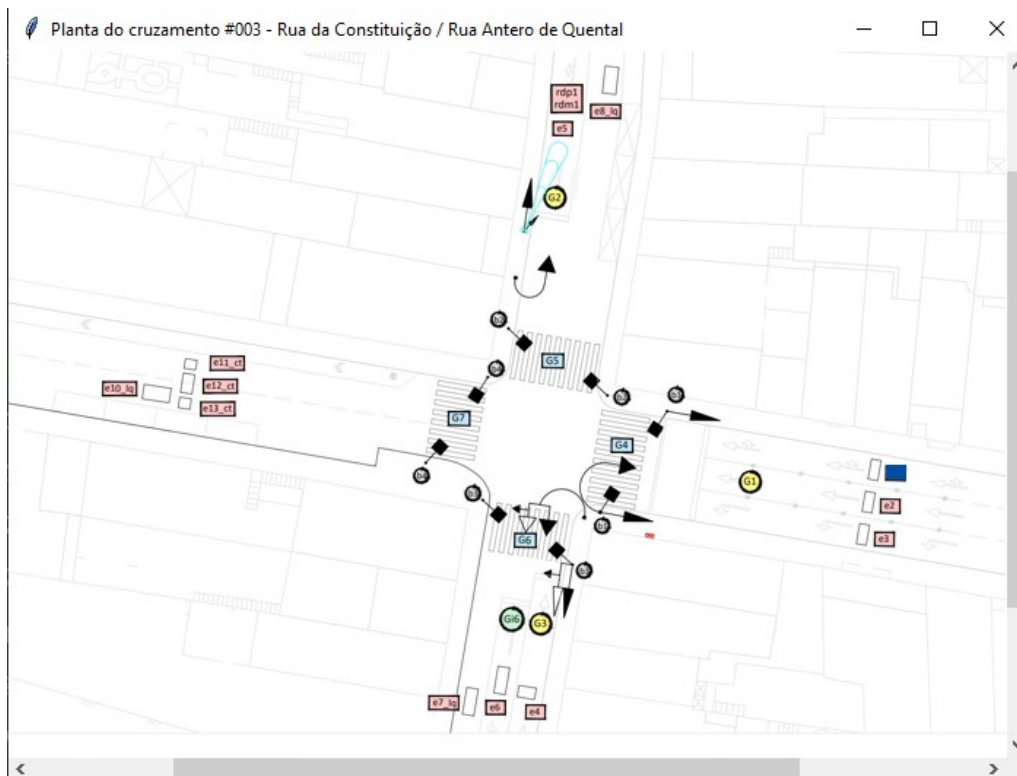
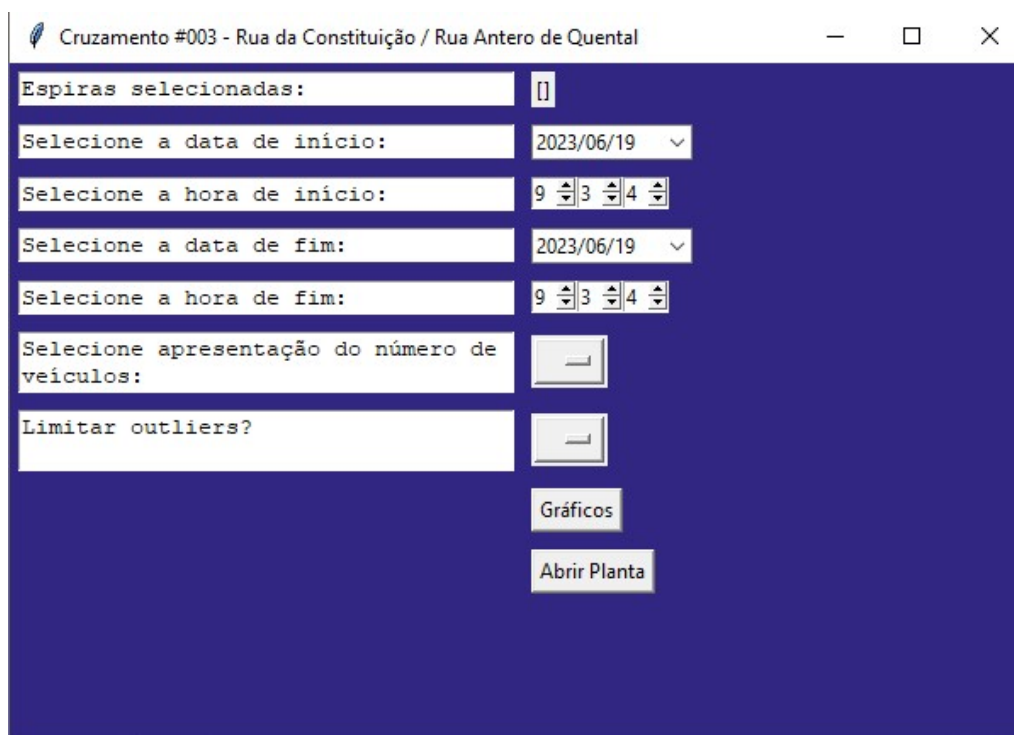


Figura 5.8: Exemplo de seleção de uma espira no mapa interativo.

5.1.3 Menu de seleção de parâmetros para consulta

A janela com o menu de seleção de parâmetros encontra-se identificada com o número e nome do cruzamento a consultar. Como demonstrado na Fig. 5.9, este menu contempla os seguintes parâmetros.



Cruzamento #003 - Rua da Constituição / Rua Antero de Quental

Espiras selecionadas: []

Selecione a data de início: 2023/06/19

Selecione a hora de início: 9:34

Selecione a data de fim: 2023/06/19

Selecione a hora de fim: 9:34

Selecione apresentação do número de veículos: [v]

Limitar outliers? [v]

Gráficos

Abrir Planta

Figura 5.9: Exemplo de um menu de seleção de parâmetros de consulta.

5.1.3.1 Espiras selecionadas

Este é o campo que compreende a listagem das espiras a consultar. As espiras são selecionadas e desselecionadas na janela com o mapa interativo. Ao encerrar a janela com o mapa e/ou ao clicar no botão "Abrir Planta", este campo é limpo, de modo a evitar que espiras fiquem em memória.

5.1.3.2 Selecione a data de início

Este campo permite a seleção da data de início de consulta. Para tal, utiliza-se uma lista pendente com calendário de modo a melhor a interação com a aplicação, assim como demonstra a Fig. 5.10, também permitindo que se edite com escrita direta dos números da data. Por defeito, começa preenchido com a data atual.

Cruzamento #003 - Rua da Constituição / Rua Antero de Quental

Espiras selecionadas: [1]

Selecione a data de início: 2023/06/19

Selecione a hora de início:

Selecione a data de fim:

Selecione a hora de fim:

Selecione apresentação do número de veículos:

Limitar outliers?

June 2023

	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri	Sat	Sun
22	29	30	31	1	2	3	4
23	5	6	7	8	9	10	11
24	12	13	14	15	16	17	18
25	19	20	21	22	23	24	25
26	26	27	28	29	30	1	2
27	3	4	5	6	7	8	9

Gráficos

Abrir Planta

Figura 5.10: Seleção para o parâmetro de registo de data.

5.1.3.3 Selecione a hora de início

Este campo contém os parâmetros para selecionar a hora, minutos e segundos de início de consulta. O programa permite que se edite este campo com escrita direta dos números de hora, minutos e segundos, sendo que também fornece a opção de seleção com setas, tanto as que apresentadas no menu, como as próprias setas do teclado. Por defeito, começa preenchido com a hora, minutos e segundos da criação da janela de seleção de parâmetros.

5.1.3.4 Selecione a data de fim

De forma análoga ao campo de seleção da data de início, o presente campo permite a seleção da data de fim de consulta. Apresenta as mesmas funcionalidades do campo referido, sendo que também se encontra preenchido com a data atual.

5.1.3.5 Selecione a hora de fim

De forma similar ao campo de seleção da hora, minutos e segundos de início, o presente campo permite a seleção da hora, minutos e segundos de fim de consulta. Apresenta as mesmas funcionalidades do campo referido, sendo que também se

encontra preenchido com a hora, minutos e segundos da criação da janela de seleção de parâmetros.

5.1.3.6 Selecione apresentação do número de veículos

Este é o campo de seleção do modo de como a contagem dos veículos será apresentada em gráfico, se com a unidade de veículos por hora, correspondente ao parâmetro "Estimado", ou se com a unidade de veículos por intervalo, correspondente ao parâmetro "Real". A Fig. 5.11 apresenta a seleção dos parâmetros, realizada com recurso a uma lista pendente.

Cruzamento #003 - Rua da Constituição / Rua Antero de Quental

Espiras selecionadas: [1]

Selecione a data de início: 2023/06/19

Selecione a hora de início: 9:34

Selecione a data de fim: 2023/06/19

Selecione a hora de fim: 9:34

Selecione apresentação do número de veículos:

- Estimado
- Real

Limitar outliers?

Gráficos

Abrir Planta

Figura 5.11: Lista pendente do parâmetro de apresentação das contagens de veículos.

5.1.3.7 Limitar outliers

Este campo permite a limitação dos valores *outliers* ao limite máximo de débito estabelecido anteriormente. De modo semelhante ao campo anterior, faz uso de uma lista pendente para seleção dos parâmetros, "Sim" e "Não", dando resposta à questão presente no campo, assim como apresenta a Fig. 5.12.

Cruzamento #003 - Rua da Constituição / Rua Antero de Quental

Espiras seleccionadas: [1]

Selecione a data de início: 2023/06/19

Selecione a hora de início: 9:34

Selecione a data de fim: 2023/06/19

Selecione a hora de fim: 9:34

Selecione apresentação do número de veículos:

Limitar outliers?

Sim

Não

Abrir Planta

Figura 5.12: Lista pendente do parâmetro para limitar os valores *outliers*.

5.1.3.8 Gráficos

Este botão, quando clicado, procede com o programa, fazendo a verificação do estado dos parâmetros. Se os parâmetros estiverem seleccionados de forma válida, cria uma nova janela com os gráficos correspondentes aos parâmetros seleccionados.

Caso haja parâmetros inválidos, apresenta-se ao utilizador uma janela com o(s) parâmetro(s) em falta e/ou indevidamente preenchidos, assim com é apresentado na Fig. 5.13. No caso em que a data e/ou hora, minutos e segundos de início sejam posteriores aos parâmetros análogos de fim de consulta, a mensagem de erro da Fig. 5.14 é apresentada ao utilizador.

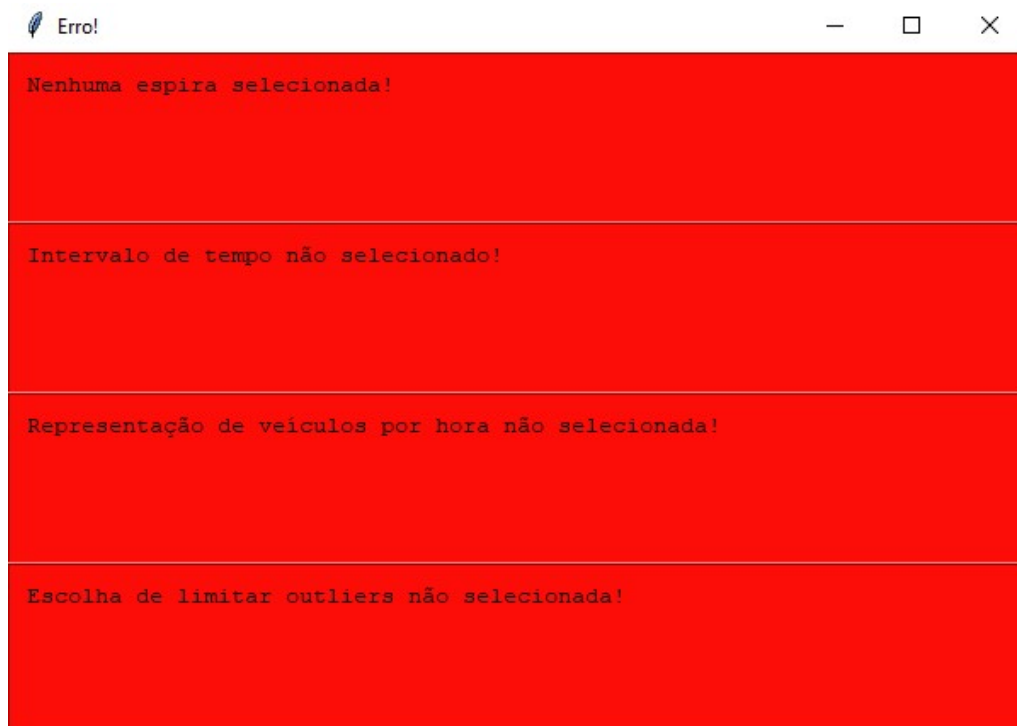


Figura 5.13: Janela com erros em vários parâmetros.



Figura 5.14: Janela de erro de data e/ou hora de início.

No evento que o utilizador faça um pedido em que o cruzamento e os parâmetros requeridos apresentem uma resposta nula por parte do servidor, o programa apresenta a janela da Fig. 5.15.

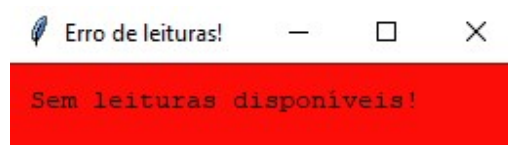


Figura 5.15: Janela de leituras em falta.

Com testes a esta condição específica, verificou-se que tal ocorre principalmente quando o utilizador consulta medições com data anterior à data de ins-

talação do controlador de tráfego. Com o procedimento da aplicação, quando o utilizador clicar no botão "Gráficos", o sistema valida os parâmetros requisitados. Após esta fase, procede a consulta à API, ocorrendo uma validação da resposta. Nesta etapa, carimbos de tempo com leituras em vazio são registados num ficheiro JSON, assim como o ficheiro apresentado em 5.1.3.8.

Neste excerto de código, encontra-se parte da resposta ao pedido referente ao cruzamento número 3, com parâmetros de data e hora de início a 22/04/2022 às 09:05:01 e data e hora de fim a 23/04/2022 às 09:05:01, sendo que a instalação deste controlador de tráfego ocorreu dia 22/04/2022 às 14:46:00.

```
[
  {
    "AggregatedDetectorCategoryValues": [],
    "AggregatedDetectorValues": [],
    "__type": "TrafficStateDetectorAggDto",
    "IntervalFrom": "2022-04-22T11:40:00+01:00",
    "IntervalTo": "2022-04-22T11:50:00+01:00",
    "ControllerUUID": "7985f0c4-64af-423c-9690-fecd1ed65803",
    "SubsecondOffset": 0,
    "Id": "6262c03dd80f848214f8b6bc",
    "CreatedOn": "2022-04-22T14:48:29Z",
    "Locked": false
  },
  {
    "AggregatedDetectorCategoryValues": [],
    "AggregatedDetectorValues": [],
    "__type": "TrafficStateDetectorAggDto",
    "IntervalFrom": "2022-04-22T11:50:00+01:00",
    "IntervalTo": "2022-04-22T12:00:00+01:00",
    "ControllerUUID": "7985f0c4-64af-423c-9690-fecd1ed65803",
    "SubsecondOffset": 0,
    "Id": "6262c03dd80f848214f8b6be",
    "CreatedOn": "2022-04-22T14:48:29Z",
    "Locked": false
  },
  {
    "AggregatedDetectorCategoryValues": [],
    "AggregatedDetectorValues": [],
    "__type": "TrafficStateDetectorAggDto",
    "IntervalFrom": "2022-04-22T15:10:00+01:00",
    "IntervalTo": "2022-04-22T15:20:00+01:00",
    "ControllerUUID": "7985f0c4-64af-423c-9690-fecd1ed65803",
    "SubsecondOffset": 0,
    "Id": "6262c03dd80f848214f8b6c0",
    "CreatedOn": "2022-04-22T14:48:29Z",
    "Locked": false
  }
]
```

```
}
]
```

Revela-se importante mencionar que, ao obter dados primordiais de contagem dos detetores, são registadas leituras referentes a dados de ocupação e afins anteriores à suposta implementação do controlador. Pressupõem-se que a data de implementação do controlador é apresentada nos dados do controlador. Porém, nem a data de instalação nem a data de centralização na plataforma *eDaptiva* correspondem aos resultados de ambos ficheiros (informação do controlador e estado de espiras) da API.

5.1.3.9 Abrir Planta

Este botão, ao ser acionado, gera uma nova janela com o mapa da planta do cruzamento selecionado. Como referido anteriormente, a seleção deste botão leva a uma limpeza do campo das espiras selecionadas.

5.2 Janela de gráficos

Após a seleção dos parâmetros de consulta e validação positiva dos mesmos, segue-se a apresentação dos resultados de pesquisa, sobre a forma de gráficos de barras. A janela de resultados compreende dois gráficos: percentagem de ocupação da(s) espira(s) e contagem dos veículos por espira(s).

5.2.1 Características transversais dos gráficos

A janela de resultados contém características comuns entre os dois gráficos apresentados. Ambos os gráficos apresentam os resultados para o mesmo intervalo de tempo, no mesmo carimbo temporal, atualizando as leituras de forma síncrona.

De modo a facilitar a compreensão dos objetos nos gráficos, a janela de resultados inclui uma legenda, partilhada por ambos os gráficos, localizada no canto superior direito, assim como demonstra a Fig. 5.16. Esta legenda contém os seguintes elementos:

- Limite teórico: esta linha vermelha horizontal no gráfico da contagem dos veículos corresponde ao limite teórico máximo do débito para um intervalo de 10 minutos. Leituras que ultrapassem esta linha são consideradas *outliers*;
- Média: linha verde horizontal no gráfico da contagem dos veículos que representa a média acumulada das leituras requisitadas pelo utilizador;
- Separador de dias: esta linha vermelha vertical indica a transição entre leituras de diferentes dias, em ambos os gráficos;

- Leitura(s) em falta: evidencia lacunas nas medições, destacando estas mesmas com barra de gráfico e etiqueta da leitura a vermelho. Exemplos destas ocorrências estão expostos mais adiante.

Em cada gráfico, são apresentadas, de uma só vez, 12 leituras leituras, compreendidas num intervalo de 2 horas. Caso o utilizador requeira visualizar leituras com uma gama temporal superior a estas 2 horas, revela-se necessário a implementação de um elemento interativo para atualizar as leituras. Neste sentido, integra-se um controlo deslizante, do inglês *slider*, que permite ajustar o parâmetro carimbo de tempo quando o usuário move o marcador, atualizando os valores apresentados consoante o sentido de deslocamento do marcador.

Quando ocorre a transição entre dias, os valores correspondentes aos dias, localizados no lado esquerdo e direito de cada gráfico, também são atualizados. Este elemento interativo encontra-se na parte inferior da janela, evidenciado na 5.16, atualizando ambos o gráficos quando o marcador é deslocado pelo utilizador.

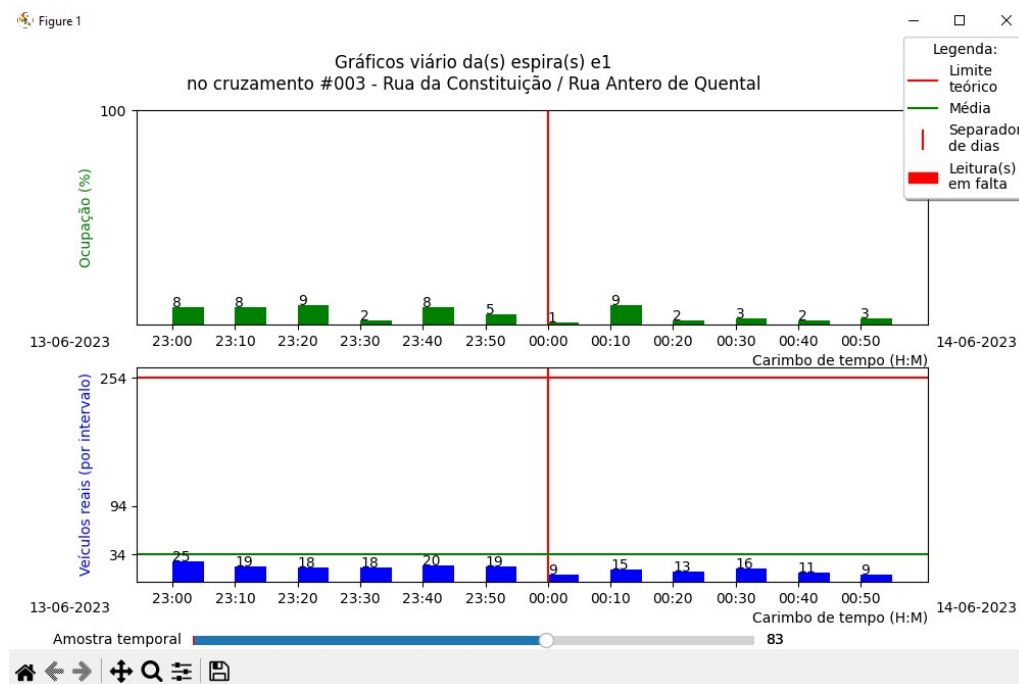


Figura 5.16: Exemplo de uma janela de resultados, evidenciando a linha de separador de dias.

5.2.2 Consulta a única espira

Quando o utilizador insere parâmetros de modo a consultar uma espira, tem a opção, entre outras, de escolher se pretende visualizar os resultados da contagem de veículos de forma estimada ou real. Neste sentido, são apresentados exemplos

de consulta de uma espira, e1, do cruzamento número 3, entre as 09:10:00 do dia 13/06/2023 e as 09:10:00 do dia 14/06/2023.

A Fig. 5.17 apresenta o exemplo de consulta anteriormente mencionado para uma contagem de veículos de forma estimada. As respostas da API fornecem dados multiplicados por um fator de 6, sendo que na forma estimada este fator mantém-se. A etiqueta do eixo das ordenadas do gráfico da contagem indica qual a forma apresentada, que neste caso é veículos estimados (por hora).

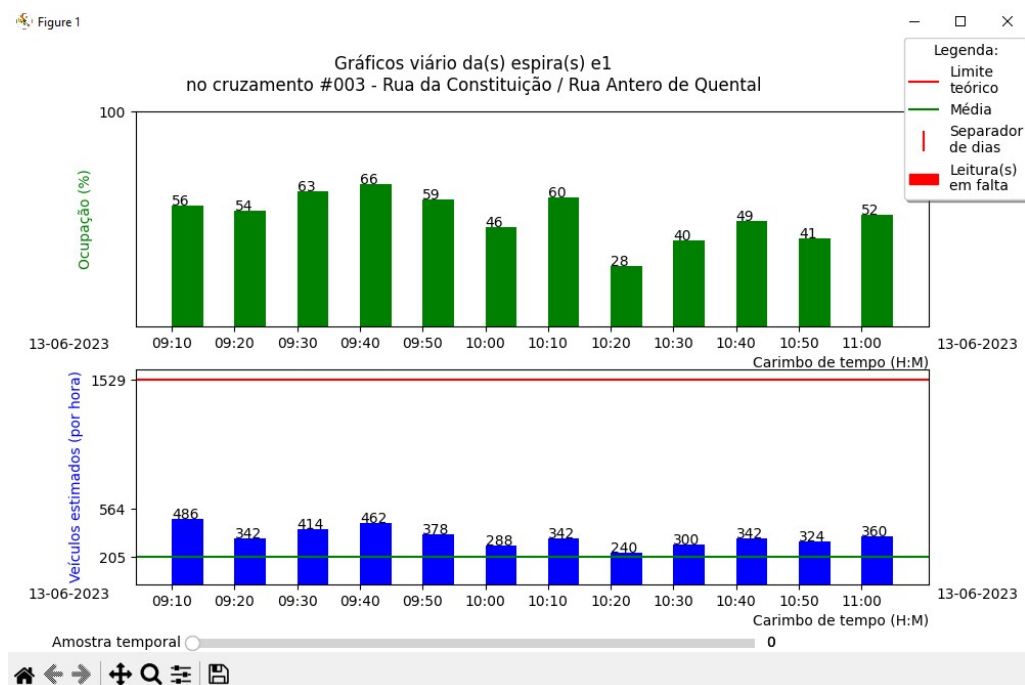


Figura 5.17: Exemplo de consulta a uma espira, com contagem de veículos estimada.

A Fig. 5.18 apresenta o exemplo de consulta anteriormente mencionado para uma contagem de veículos de forma real. Como referido, as respostas da API fornecem dados multiplicados por um fator de 6, sendo que na forma real este fator é eliminado com a divisão dos valores de origem pelo mesmo fator de 6. A etiqueta do eixo das ordenadas do gráfico da contagem indica qual a forma apresentada, que neste caso é veículos reais (por intervalo).

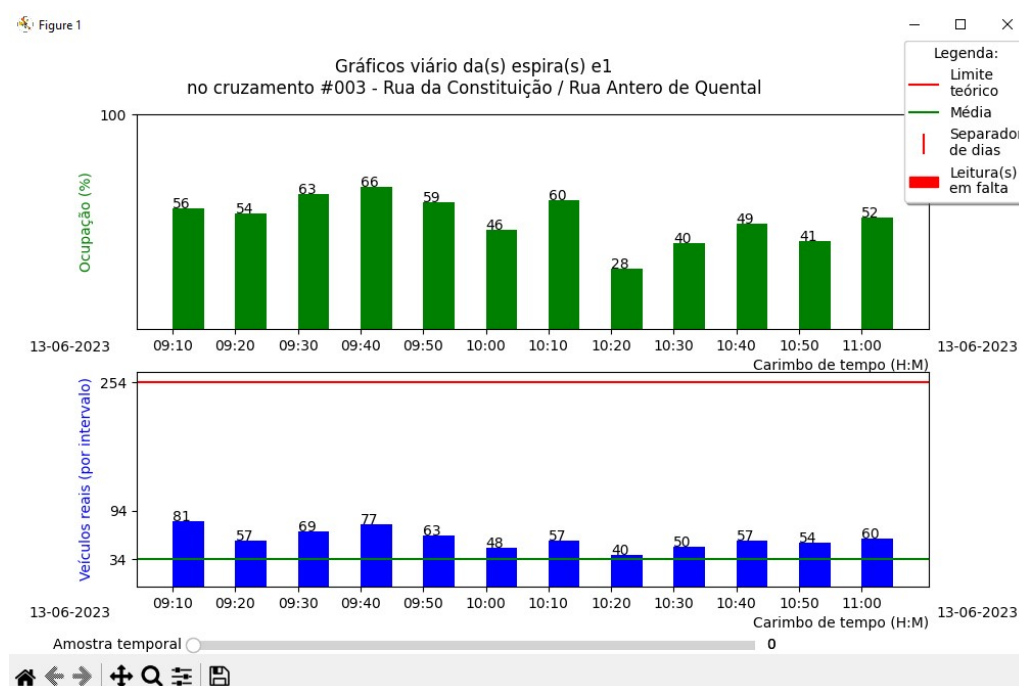


Figura 5.18: Exemplo de consulta a uma espira, com contagem de veículos real.

Destaca-se que os valores do gráfico de contagem de veículos de forma estimada apresenta um fator de 6 vezes superior quando comparado com o gráfico correspondente de forma real. Em outra nota, revela-se importante reiterar que apesar de a maioria dos cruzamentos incluir uma espira em cada via, em alguns casos particulares duas vias partilham a mesma espira.

No conjunto dos cruzamentos da Rua da Constituição, que serve de piloto para este projeto, esta situação ocorre 3 vezes: no cruzamento número 88 tanto a espira e1 como a espira e2 registam valores de duas vias cada, assim como no cruzamento número 75, a espira e1 faz leitura de duas vias. Nestes casos, ao consultar uma destas espiras, assume-se que se procede com uma consulta a duas espiras.

5.2.3 Consulta a múltiplas espiras

De forma similar aos resultados apresentados anteriormente, a consulta de 2 ou mais espiras procede-se com o mesmo método. Porém, existem diferenças fundamentais quando ao conteúdo dos resultados. Para uma consulta de múltiplas espiras, o gráfico da percentagem de ocupação apresenta a ocupação média para cada carimbo temporal, evidenciado na etiqueta do eixo das ordenadas. O gráfico da contagem dos veículos compreende a soma dos valores de contagem para cada carimbo temporal.

A distinção da contagem dos veículos também se encontra de forma estimada ou real, sendo que os resultados a seguir apresentados são por sua vez de consulta de duas espiras, e1 e e2, do cruzamento número 3, entre as 09:10:00 do dia 13/06/2023 e as 09:10:00 do dia 14/06/2023.

A Fig. 5.19 apresenta o exemplo de consulta anteriormente mencionado para uma contagem de veículos em duas espiras de forma estimada. As respostas da API fornecem dados multiplicados por um fator de 6, sendo que na forma estimada este fator mantém-se. A etiqueta do eixo das ordenadas do gráfico da contagem indica qual a forma apresentada, que neste caso é veículos estimados (por hora).

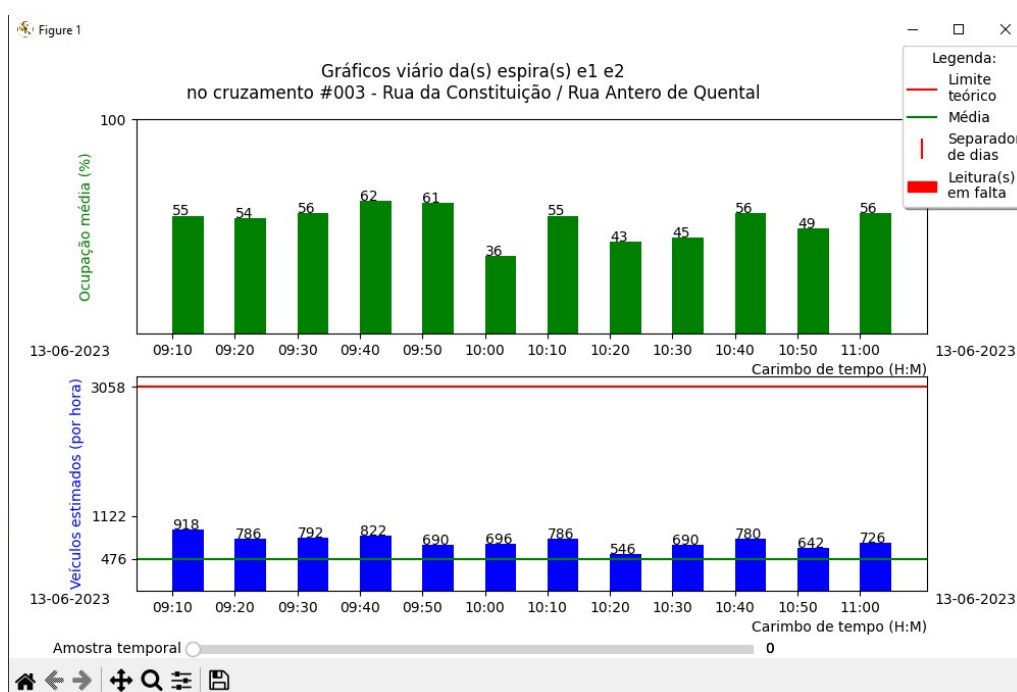


Figura 5.19: Exemplo de consulta a duas espiras, com contagem de veículos estimada.

A Fig. 5.20 apresenta o exemplo de consulta anteriormente mencionado para uma contagem de veículos em duas espiras de forma real. Como referido, as respostas da API fornecem dados multiplicados por um fator de 6, sendo que na forma real este fator é eliminado com a divisão dos valores de origem pelo mesmo fator de 6. A etiqueta do eixo das ordenadas do gráfico da contagem indica qual a forma apresentada, que neste caso é veículos reais (por intervalo).

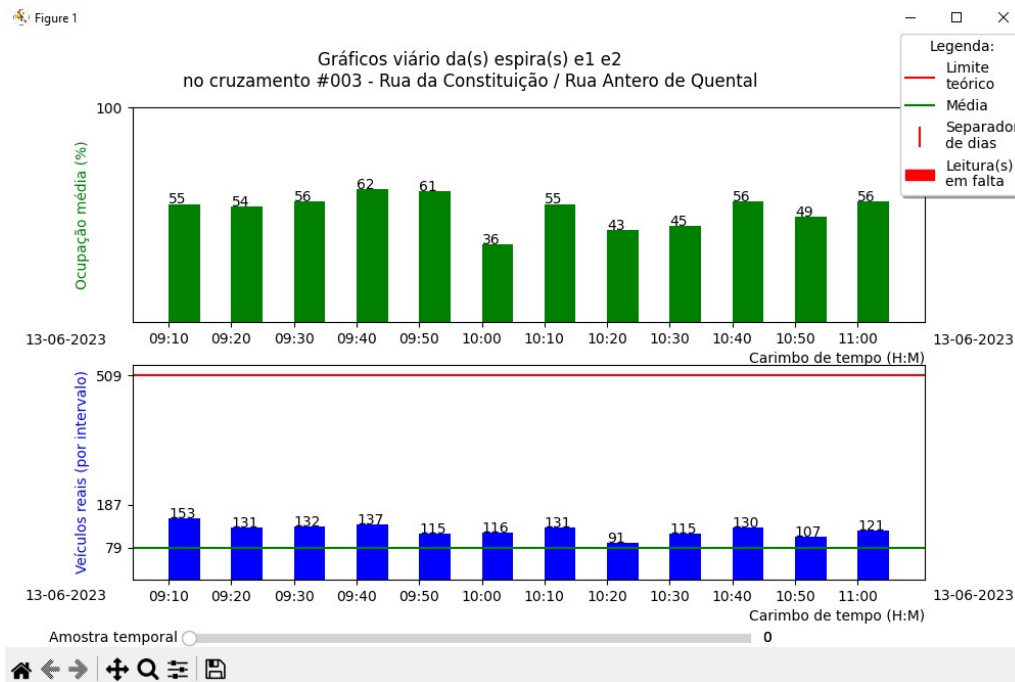


Figura 5.20: Exemplo de consulta a duas espiras, com contagem de veículos real.

5.2.4 Limitador de *outliers*

Tendo em conta o âmbito da aplicação desenvolvida, uma das funcionalidades mais importantes revela-se a opção de limitar os valores *outliers*. Desta forma, os resultados a seguir apresentados são de consulta de uma espira, e8, com várias leituras *outliers*, do cruzamento número 86, entre as 09:30:00 do dia 15/05/2023 e as 09:30:00 do dia 16/05/2023, realizada com o parâmetro de apresentação da contagem dos veículos de forma real.

Na Fig. 5.21 é apresentado o resultado para o exemplo proposto, sem tratamento dos valores anormalmente elevados. Destaca-se o gráfico de contagem dos veículos, onde o valor máximo de todas as leituras, para o intervalo de tempo requisitado pelo utilizador, é cerca de 5 vezes superior ao limite de débito máximo estabelecido.

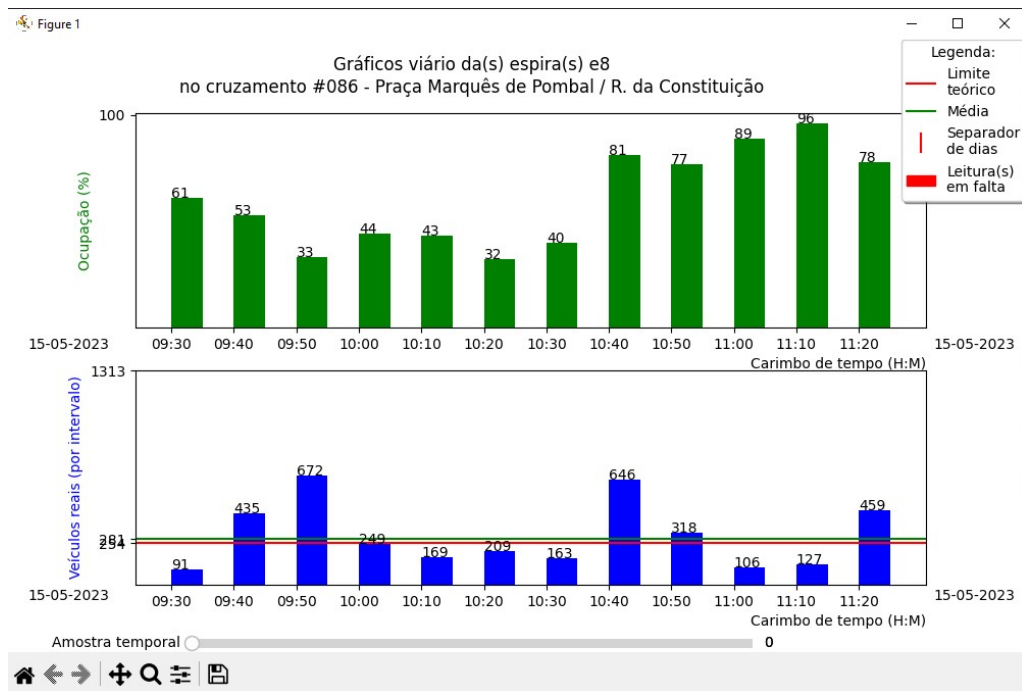


Figura 5.21: Exemplo de consulta com leituras *outliers* não limitadas.

Na Fig. 5.22 é apresentado o resultado para o exemplo proposto, com a limitação dos valores anormalmente elevados no valor de débito máximo teórico. Destaca-se que apesar da correção efetuada, o valor da média no gráfico de contagem dos veículos é cerca de 1,8 vezes inferior ao limite máximo, evidenciando a presença bastante expressiva dos valores *outliers* na consulta requisitada. Refere-se que neste caso, por observação no local, as leituras *outliers* resultavam de estacionamento indevido em cima da área de atuação da espira.

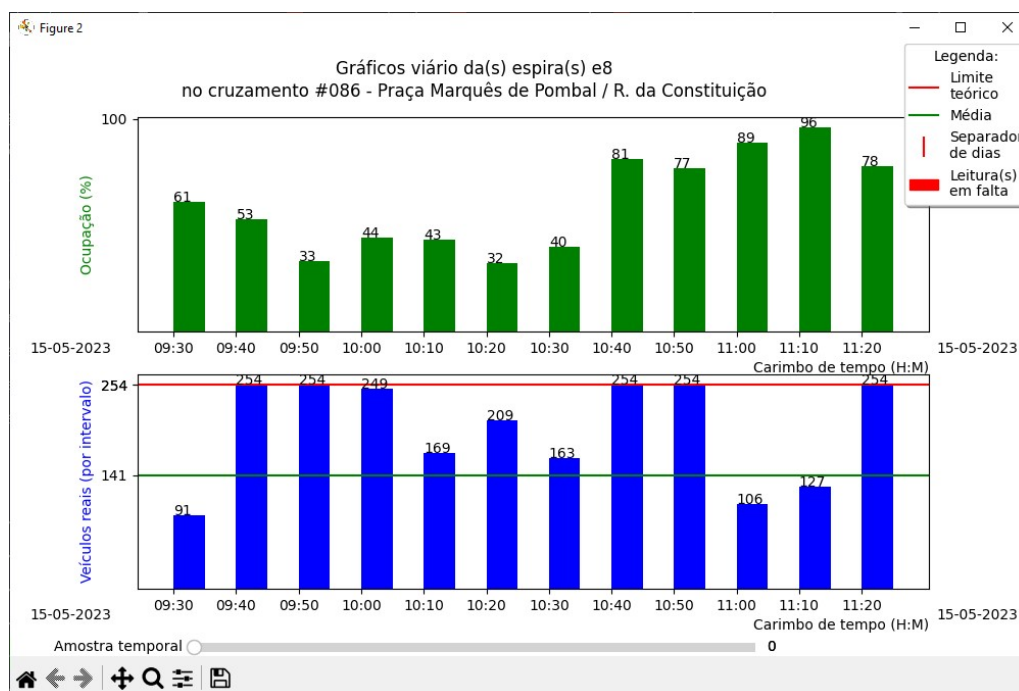


Figura 5.22: Exemplo de consulta com leituras *outliers* limitadas.

5.2.5 Leituras em falta

Como mencionado anteriormente neste documento, por vezes a API retorna registos do controlador de tráfego que não contemplam todas as espiras, geralmente nas primeiras 6 horas do dia. Tendo em conta que esta lacuna nas leituras apresenta consequências no funcionamento regular da aplicação, o programa verifica e preenche estas leituras, evidenciando-as na janela dos gráficos.

Neste sentido, são apresentados os resultados para a consulta das espiras e1 e e2 do cruzamento número 3, entre as 09:30:00 do dia 14/06/2023 e as 09:30:00 do dia 15/06/2023, dando destaque ao período entre as 3:30 e 5:20 do dia 15/06/2023. Esta consulta foi realizada com o parâmetro de apresentação da contagem dos veículos de forma real.

Na Fig. 5.23 é possível observar que entre as 04:00:00 e 04:10:00 do dia 15/06/2023, assim como entre as 04:50:00 e 05:00:00 do mesmo dia, ocorreu uma lacuna da leitura da espira e1. O programa ao detetar esta falta de medição, preencheu ambas as leituras com valor 0, destacando esta ocorrência com a substituição da cor do texto da etiqueta de preto para vermelho.

A Fig. 5.24 serve como uma leitura de controlo. No caso desta espira, apresenta, para o intervalo observável na janela do gráfico, todas as medições com leituras válidas sem lacunas.

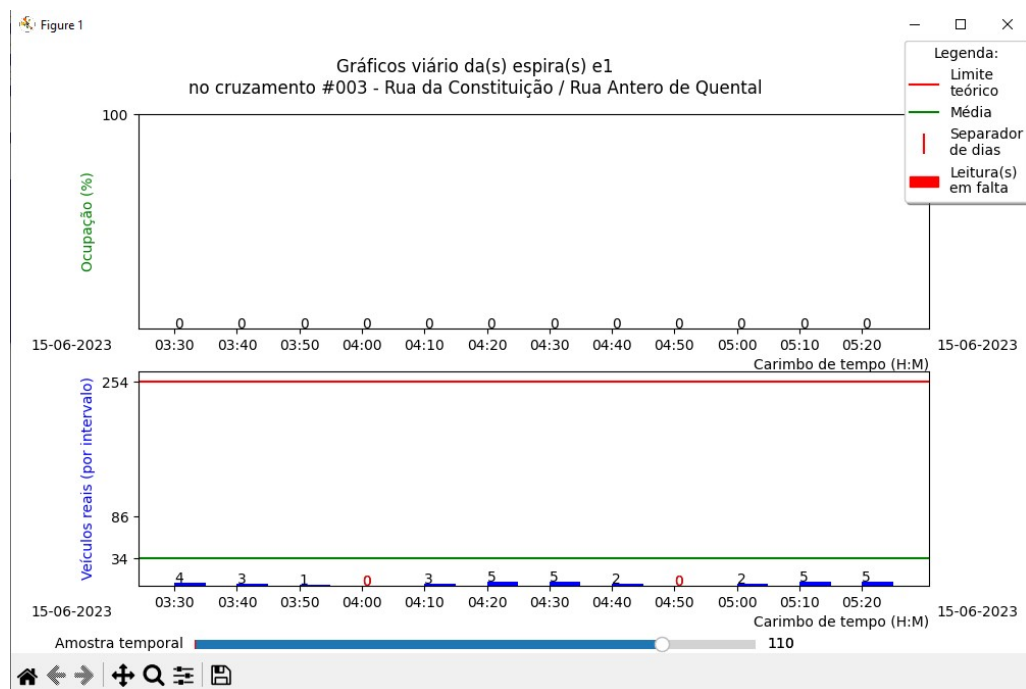


Figura 5.23: Exemplo de consulta a uma espira, com falta de leituras.

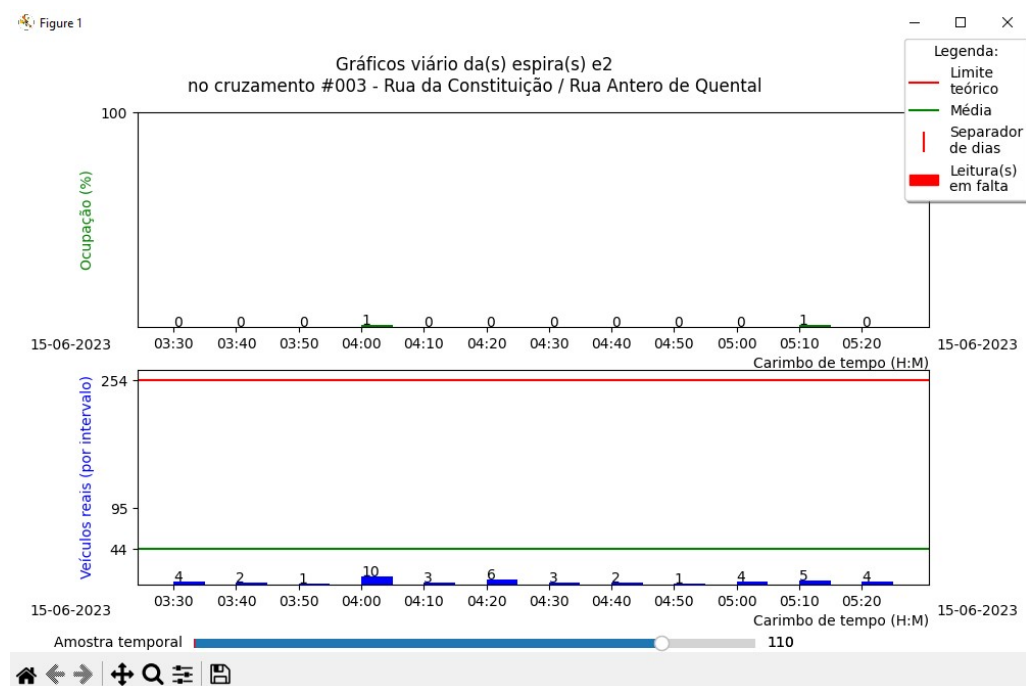


Figura 5.24: Exemplo de consulta a uma espira, sem falta de leituras.

A Fig. 5.25 apresenta a leitura simultânea das espiras consultadas anteriormente, e1 e e2. Revela-se importante reiterar que, no gráfico das contagens dos veículos para consulta de duas ou mais espiras, o valor das medições, para cada carimbo temporal, é a acumulação dos valores medidos das espiras.

No gráfico apresentado, destaca-se as leituras com barras e etiquetas a vermelho. Isto indica, para consulta de múltiplas espiras em simultâneo, que uma ou mais medições, para aquele carimbo de tempo, estão em falta. Neste exemplo em concreto, como observado anteriormente, estas lacunas nas leituras correspondem às medições provenientes da espira e1.

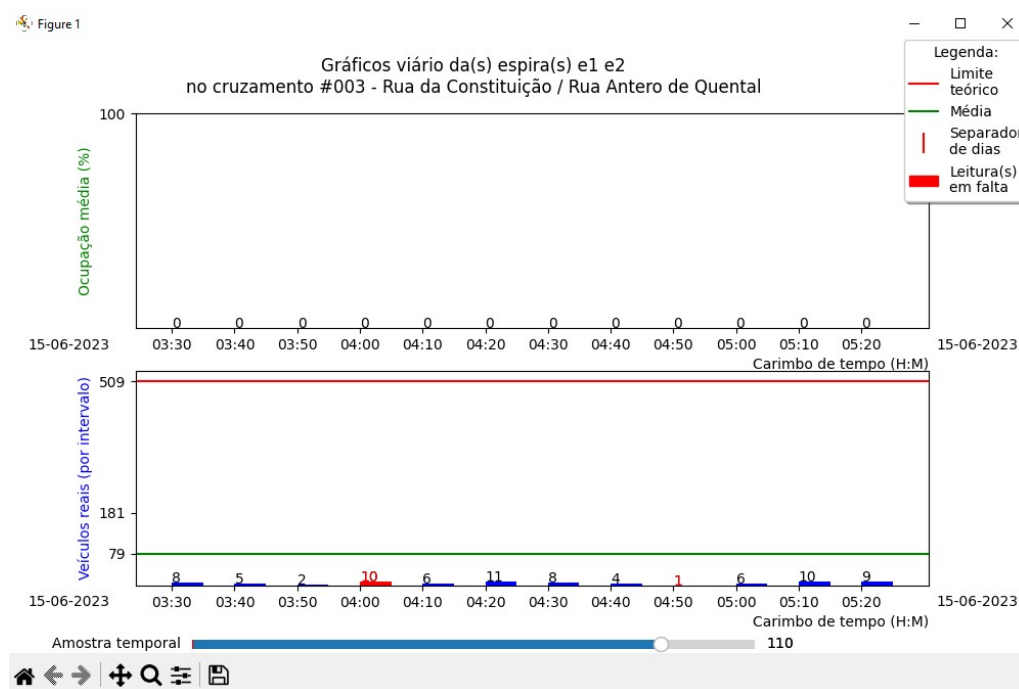
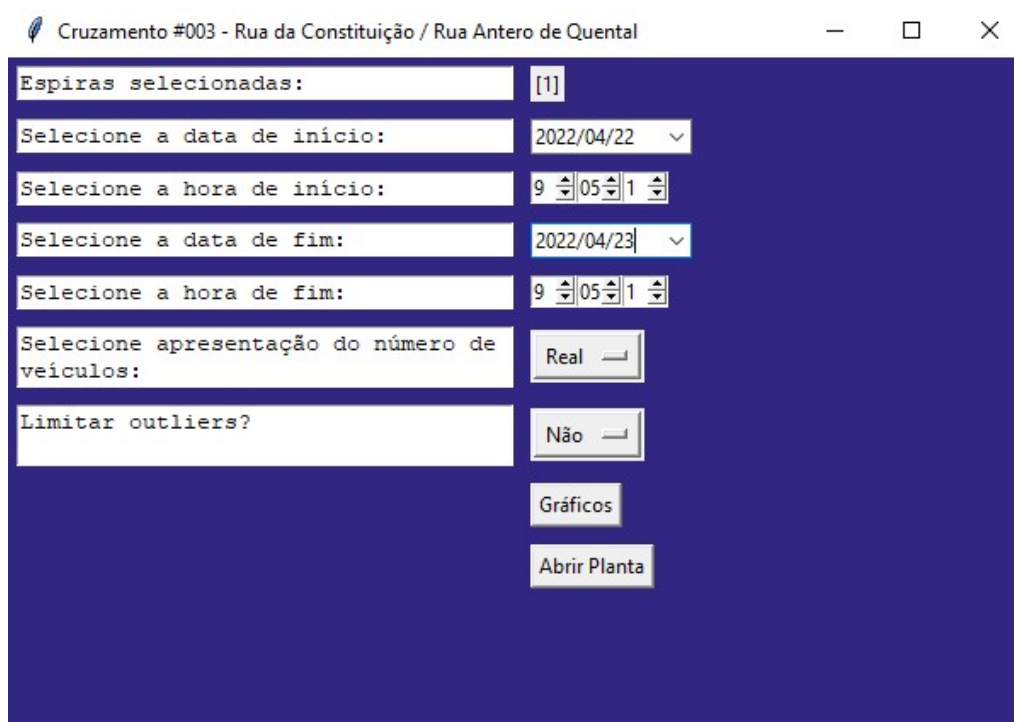


Figura 5.25: Exemplo de consulta a duas espiras, evidenciando a falta de valores.

5.2.6 Primeiras leituras de um controlador

Quando ocorre a instalação de um controlador de tráfego, as medições de tráfego próximas da hora agendada de tal instalação apresentam um comportamento errático, com carimbos temporais sem qualquer leitura.

Tendo como exemplo as condições para o excerto de código apresentado na secção 5.1.3.8, a Fig. 5.26 demonstra os parâmetros selecionados para a consulta, que inclui o intervalo de tempo de instalação do controlador de tráfego do cruzamento número 3. Esta consulta foi realizada com o parâmetro de apresentação da contagem dos veículos de forma real, assim como sem limitação de valores *outliers*.



Cruzamento #003 - Rua da Constituição / Rua Antero de Quental

Espiras seleccionadas: [1]

Selecione a data de início: 2022/04/22

Selecione a hora de início: 9:05:1

Selecione a data de fim: 2022/04/23

Selecione a hora de fim: 9:05:1

Selecione apresentação do número de veículos: Real

Limitar outliers? Não

Gráficos

Abrir Planta

Figura 5.26: Exemplo de um menu de parâmetros de consulta, de modo a incluir o intervalo de instalação do controlador de tráfego.

Como referido anteriormente neste documento, a resposta da API é sujeita a validações. Numa primeira fase, procede-se à eliminação de eventuais leituras duplicadas. Depois, uma nova eliminação de leituras com carimbo temporal referente a *Unix epoch*, 01/01/1970 às 00:00:00 (UTC). Estas leituras ocorrem nos primeiros carimbos temporais após a instalação do controlador. A última verificação lê os carimbos de tempo com leituras em vazio, registando estes num ficheiro JSON, assim como é o caso do excerto de código em 5.1.3.8.

A Fig. 5.27 apresenta os gráficos para o exemplo mencionado. Destacam-se algumas características pertinentes. Apesar de a consulta começar às 9:05:01, os resultados apenas apresentam leituras após as 15:20:00. Isto acontece pois as primeiras leituras apresentam carimbo temporal de *Unix epoch*, sendo assim eliminadas. Através do ficheiro em 5.1.3.8, observa-se que nesta consulta existem leituras com carimbos de tempo válidos mas com leituras em vazio, sendo que estas não são incluídas nos gráficos, com a mais recente sendo às 15:10:00, imediatamente anterior ao primeiro registo no gráfico. Ainda é de notar outro pormenor, as leituras a zero não são leituras em falta que foram preenchidas, evidenciado pelo facto de que as etiquetas destas leituras não se encontram a vermelho.

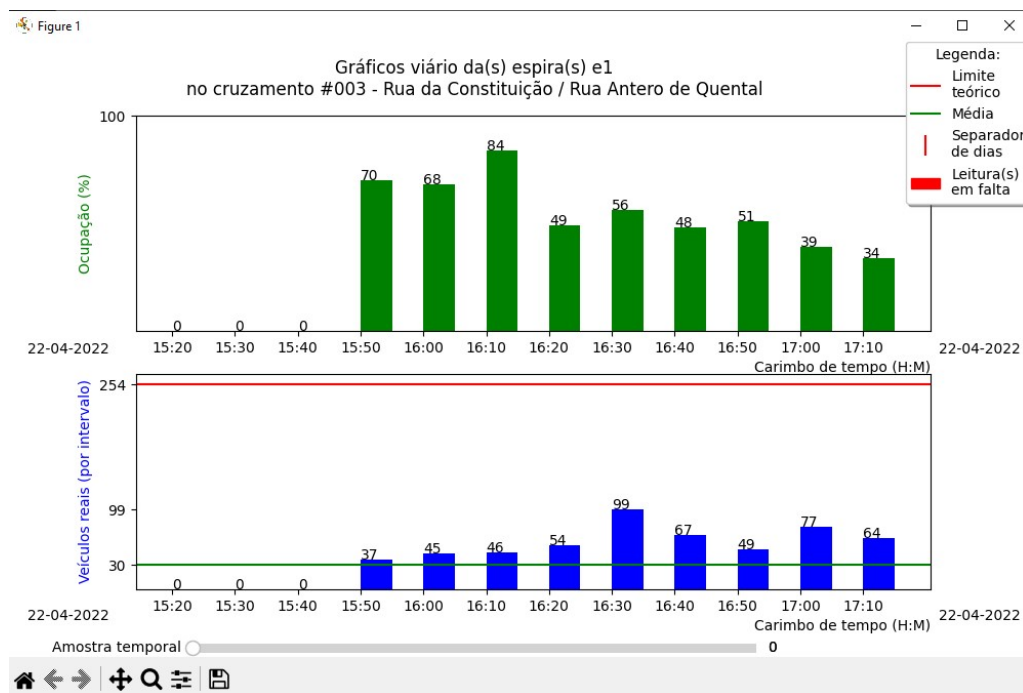


Figura 5.27: Exemplo da janela de gráficos para uma consulta que inclui o intervalo de instalação do controlador de tráfego.

Capítulo 6

Conclusões

Neste último capítulo apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, procedendo com uma reflexão dos desafios encontrados ao longo da evolução do projeto. Este capítulo compreende ainda propostas para melhorias e desenvolvimentos da aplicação em estudo.

6.1 Síntese geral e principais conclusões

A presente dissertação incidiu sobre um estudo na área de engenharia de tráfego, aplicando conceitos matemáticos como o estabelecimento de valores fora do comum numa série de registos, designados de valores *outliers*. Tendo como ponto de partida os dados viários gerados por um Sistema Inteligente de Transportes, procedeu-se à análise e tratamento da informação recolhida com o objetivo de validar as leituras fornecidas pelos detetores de tráfego, com devida representação gráfica dos resultados obtidos.

A aplicação desenvolvida neste âmbito, VIA, pretende analisar os grandes volumes de tráfego na cidade do Porto. Para este fim, o projeto procedeu-se com a colaboração da Câmara Municipal do Porto, fornecendo acesso aos dados viários disponíveis. O trabalho apresentado no documento tem um carácter de projeto-piloto, sendo que a implementação de tal restringiu-se, de momento, aos controladores de tráfego instalados nos cruzamentos intersetados pela Rua da Constituição, contemplando deste modo 8 cruzamentos para análise de tráfego. Para a Câmara Municipal do Porto, os resultados obtidos com este projeto permitem identificar os detetores de tráfego com funcionamento ineficaz, revelando-se assim uma ferramenta para apoio à decisão.

Por observação dos valores debitados pelos detetores de tráfego, verificou-se que certos detetores apresentam registos anormalmente elevados. Neste sentido,

a aplicação desenvolvida permite a análise e visualização dos dados de tráfego recolhidos do sistema de gestão de tráfego da Câmara Municipal do Porto, estabelecendo valores máximos de volume de tráfego em cada detetor, determinados pela conjugação das variáveis macroscópicas de tráfego e do número de vias que o detetor monitoriza. Deste modo, os valores superiores aos limiares estabelecidos são classificados como *outliers*.

A aplicação VIA, desenvolvida integralmente na linguagem de programação *Python*, contempla uma interface gráfica para interação com o utilizador. De modo a facilitar a distribuição da aplicação, a aplicação é independente de qualquer módulo *Python* instalado no computador do utilizador, incluindo de um interpretador. Porém, recomenda-se ao utilizador que não elimine ou mude a localização dos diretórios e ficheiros que se encontram dentro do diretório base VIA, uma vez que pode levar ao indevido funcionamento da aplicação.

O funcionamento da aplicação procede-se, numa primeira fase, com o contacto entre o programa e o sistema de gestão de tráfego, de modo a apresentar os cruzamentos existentes. Reitera-se que devido ao carácter de projeto-piloto, a aplicação contempla apenas 8 cruzamentos para consulta. Após a seleção de um cruzamento válido, apresenta-se ao utilizador a planta do cruzamento, assim como um menu para seleccionar os parâmetros de consulta, incluindo as espiras a consultar, intervalo de tempo, a forma como se apresentam os valores de contagem e se pretende que os valores *outliers* se encontrem limitados no gráfico.

Numa segunda fase, de apresentação de resultados, caso o utilizador proceda com uma consulta de parâmetros válidos, é gerada uma janela com um gráfico de percentagem de ocupação da(s) espira(s) requisita(s), assim como o gráfico da contagem de veículos. Este último destaca-se por ser o estudo principal do trabalho, revelando as leituras com valores *outliers*.

Tendo em conta os resultados obtidos, considera-se que o projeto proposto cumpriu com os seus principais objetivos, fornecendo ao utilizador um instrumento para consulta de dados viários, identificando e corrigindo registos com leituras invulgares, isto contemplado numa interface gráfica de fácil utilização e de distribuição simplificada.

6.2 Desafios encontrados

Como se presumia, o desenvolvimento desta aplicação apresentou os seus desafios e contratemplos. Em primeira instância, surgiu a necessidade de aprender como interagir com a API que fornece os dados de tráfego, de modo a retornar as respostas pretendidas. A API em questão apresenta parâmetros específicos para consulta, sendo que a documentação desta encontra-se escassa. Deste modo,

procedeu-se com testes aos parâmetros, alterando o conteúdo destes, observando a resposta resultante.

Resolvida a questão de utilização da API, revelava-se indispensável a automatização dos processos de verificação ao longo da execução da aplicação. Tendo em consideração os testes da conexão entre o computador do utilizador e o servidor que aloja a API em uso, passando pelo controlo dos diretórios e ficheiros da aplicação, assim como a validação dos parâmetros inseridos pelo utilizador, esta etapa de desenvolvimento requereu a expansão do domínio sobre a linguagem de programação *Python*, levando desta forma a um aperfeiçoamento do modo de programação, apresentando benefícios no desenvolvimento de tudo o projeto.

Para além das leituras atípicas encontradas nas series de registo de tráfego, correspondendo aos valores *outliers*, as respostas por parte da API contemplam outros casos excecionais, sendo essencial fazer a gestão destas ocorrências de modo a não comprometerem o normal funcionamento do programa.

No caso que a resposta incluía registos completamente vazios, procede-se com a eliminação destes da serie de registos, com a posterior anotação num ficheiro, de modo a distinguir estas leituras. Outro caso, aquando da falta de registo de um ou mais detetores, esta lacuna é preenchida com valor zero, sendo devidamente assinalada no gráfico de resultados. Ao realizar consultas muito próximas do intervalo de instalação de controlares de tráfego, por vezes são retornados carimbos de tempo inválidos, referentes a 01/01/1970 às 00:00:00 (UTC), denominado de evento *UNIX epoch*, sendo deste modo excluídos da serie de registos.

6.3 Melhorias e implementações futuras

O projeto descrito ao longo do documento, apresenta-se como uma base para uma possível plataforma a ser integrada no sistema de gestão de tráfego no município do Porto, devido à grande quantidade de dados disponíveis e em constante crescimento. A continuação dos trabalhos de extração de dados e a determinação de padrões ocultos na informação disponível demonstra potencial para o auxílio à regulação das condições de circulação na cidade do Porto.

6.3.1 Definição dinâmica de *outliers*

Com a observação dos resultados obtidos, o limite teórico de débito máximo revela-se bastante elevado quando comparado com os registos presentes no gráfico de contagem de veículos. Isto deve-se ao facto de que a fórmula utilizada para calcular tal valor apresenta um carácter simplista, em parte porque as medições com espiras eletromagnéticas são muito restringidas, não permitindo averiguar outras métricas sobre o veículo, para além da sua presença.

O Manual de Capacidade Rodoviária norte-americano, *Highway Capacity Manual*[20], contempla uma equação mais completa para determinar o débito de saturação para cada via do grupo de vias, tendo em consideração vários fatores de ajustamento do débito de saturação base, assim como é apresentado na Equação 6.1.

$$s = s_0 \times f_w \times f_{HV} \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{LU} \times f_{LT} \times f_{RT} \times f_{Lpb} \times f_{Rpb} \quad (6.1)$$

A descrição de cada variável mencionada na equação anterior encontra-se na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Variáveis para determinar débito de saturação.

Variável	Descrição
s	Débito de saturação
s_0	Débito de saturação base
f_w	Fator de ajustamento da largura da via
f_{HV}	Fator de ajustamento dos veículos pesados na corrente de tráfego
f_g	Fator de ajustamento devido ao declive da aproximação
f_p	Fator de ajustamento para a existência de uma via de estacionamento, e atividade de estacionamento adjacente à via
f_{bb}	Fator de ajustamento para o efeito de bloqueio criado por autocarros locais que param na interseção
f_a	Fator de ajustamento do tipo de área
f_{LU}	Fator de ajustamento da utilização da vias
f_{LT}	Fator de ajustamento de veículos que viram à esquerda num grupo de vias
f_{RT}	Fator de ajustamento de veículos que viram à direita num grupo de vias
f_{Lpb}	Fator de ajustamento de peões e bicicletas para grupos de viragem à esquerda
f_{Rpb}	Fator de ajustamento de peões e bicicletas para grupos de viragem à direita

Apesar de que muitas destas variáveis podem ser inferidas com recurso a dados previamente conhecidos, como a largura da via, declive da via ou o tipo de área em que esta via se insere (em distrito financeiro ou não), a maioria destas variáveis apenas podem ser registadas com medições diretas no local, tais como

o número de veículos pesados, manobras de estacionamento ou as viragens de veículos e peões.

Neste sentido, as câmaras de vídeo, em complemento com um algoritmo de reconhecimento de veículos, surgem como um instrumento de medição capaz de dar resposta a tais exigências. Através dos dados recolhidos por este sistema, incluindo a contagem de veículos, uma definição dinâmica de registos anormais poderá se proceder com maior rigor, levando a uma melhor análise dos dados de tráfego, que por sua vez resulta num melhor auxílio à tomada de decisão relativa a questões do foro rodoviário na cidade. A Câmara Municipal do Porto conta com um sistema de 10 câmaras de contagem de veículos em interseções-chave da cidade.

6.3.2 Mapeamento de imagens com recurso a um algoritmo

No decorrer da execução da aplicação, o utilizador interage com uma janela que contempla um mapa do cruzamento selecionado, de modo a escolher a(s) espira(s) a consultar. Este mapa, ou planta, é apresentado ao utilizador numa imagem em formato *JPEG*, que provém da conversão do ficheiro *PDF* para *JPEG* realizada pelo programa da aplicação de forma autónoma. As plantas de todos os cruzamentos da cidade do Porto encontram-se em formato *PDF* na plataforma centralizada de trânsito da Câmara Municipal do Porto. Apesar da conversão do formato do ficheiro ser contemplada pela aplicação, o mapeamento do local das espiras nas imagens das plantas não ocorre desta forma. Para tal, é necessário registar as coordenadas, em *pixel*, da área correspondente ao identificador desta, quer diretamente no ficheiro *JSON* lido pelo programa, quer pelo *script* em *Python* que gera este ficheiro, seguindo a devida estrutura do ficheiro.

De forma a tornar o funcionamento da aplicação menos dependente de intervenção humana, propõem-se, para melhoria futura, um algoritmo capaz de recolher os ficheiros com as plantas dos cruzamentos presentes na plataforma de trânsito e a conseguinte conversão para formato de imagem, incluindo o mapeamento de forma autónoma das áreas que contém identificação das espiras. Com esta funcionalidade, a aplicação deixaria de estar restringida aos 8 cruzamentos anteriormente mencionados, permitindo deste modo a consulta dos dados de tráfego registados por todas as espiras ligadas aos controladores de tráfego centralizados.

6.3.3 Implementação em base de dados

Tendo em conta que a aplicação em estudo foi desenvolvida localmente num computador, uma eventual melhoria futura seria a criação de uma base de dados para conter as informações requisitada por vários utilizadores. Ao ter em consideração que existe um elevado volume de dados de tráfego, referente a cada

espira inserida no servidor da API, propõe-se que esta implementação armazene os dados das consultas que são realizados à API.

Segundo a implementação proposta, quando um utilizador faz um pedido à API que contém os registos em bruto dos detetores de tráfego, este novo programa armazena a resposta da API, devidamente processada com os mecanismos de análise e tratamento de dados. Desta forma, poupar-se-iam recursos dos servidores que iriam alojar esta base de dados. Com esta forma de implementação, o programa podia ser acedido por vários utilizadores ao mesmo tempo, permitindo que a cada iteração do programa, esta base de dados tornar-se-ia cada vez mais completa.

Esta implementação, aquando consulta de um registo previamente inserido na base de dados, permite que esta consulta se processe de forma muito mais célere e sem a necessidade de gastar recursos, tanto do servidor com a API de dados em bruto, como servidor da nova base de dados que escusaria de efetuar o tratamento dos dados.

A implementação em base de dados permite que com a aplicação esta seja disponibilizada numa página *web*. O funcionamento desta proceder-se-ia de forma semelhante ao apresentado neste documento, porém poderia ser acedida de forma mais facilitada, levando a uma consulta mais difusa dos dados de tráfego. Quanto ao tipo de sistema de bases de dado a ser implementado, faz-se duas principais distinções: relacional e não-relacional.

As bases de dados relacionais apresentam uma longa história de uso. Deste modo, é uma tecnologia madura, comprovada e amplamente implementada, sendo que existem uma abundante variedade de produtos, ferramentas e conhecimentos. As bases de dados relacionais fornecem um arquivo de tabelas de dados relacionadas, de esquema fixo, utilizando a linguagem SQL (*Structured Query Language*) para gerir dados e suportar serviços inúmeros *web*.

As bases de dados não-relacionais, designados de *NoSQL*, referem-se a arquivos de dados de elevado desempenho, destacando-se pela facilidade de utilização, escalabilidade, resiliência e disponibilidade. Em vez de associar tabelas de dados normalizados, o *NoSQL* armazena dados não estruturados ou semi-estruturados, muitas vezes em documentos JSON. Cada vez mais, os serviços de volume elevado que necessitam de tempo de resposta de sub-segundo favorecem os arquivos de dados *NoSQL*[123].

O modelo de base de dados a ser implementado apenas poderá ser decidido com um estudo prévio da quantidade e estrutura dos dados em questão, tendo em conta os recursos que poderão ser aplicados neste projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] David Levinson, “Transportation Inputs and Outputs, for wikibook Fundamentals of Transportation.” <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/TransportationInputsOutputs.png>, Last access: Dezembro 22, 2022. [cited on p. v, 2]
- [2] M. do Porto, “Bandeira,” Last access: January 20, 2023. [cited on p. v, 8]
- [3] M. do Porto, “O edifício da câmara municipal do porto,” Last access: January 20, 2023. [cited on p. v, 8, 9]
- [4] M. do Porto, “Despacho n.º 5602/2022,” Last access: January 19, 2023 2022. [cited on p. v, 9, 10, 11, 12]
- [5] F. Leslie, “New york - welcome to the land of freedom - an ocean steamer passing the statue of liberty: Scene on the steerage deck / from a sketch by a staff artist.,” Jul 1887. [cited on p. v, 16]
- [6] C. M. P. Ltd/Alamy, “The surprising origins of the postal service,” Aug 2011. [cited on p. v, 18]
- [7] AlMare, “File:minturno via-appia.jpg,” Last access: January 18, 2023 2002. [cited on p. v, 19]
- [8] C. Rakeman, “The paintings of carl rakeman,” Last access: January 18, 2023 1823. [cited on p. v, 20]
- [9] J. Weber, “*America’s New Design for Living: The Interstate Highway System and the Spatial Transformation of the U.S.*,” pp. 553–567. 12 2011. [cited on p. v, 21]
- [10] Bejjani, Marwan and Elborai, Shihab and Haddad, Mark and Cordahi, Gustave, “Sustainable mobility: Inverting the transport pyramid | Strategy Middle East.” <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/insights/>

- 2021/sustainable-mobility/sustainable-mobility.pdf, Last access: Fevereiro 10, 2023. [cited on p. v, 25]
- [11] I. M. d. S. d. Jesus, “Sistemas inteligentes de transporte,” *Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto*, 2001. [cited on p. v, 25, 26, 27, 28]
 - [12] L. Figueiredo, I. Jesus, J. T. Machado, J. R. Ferreira, and J. M. De Carvalho, “Towards the development of intelligent transportation systems,” in *ITSC 2001. 2001 IEEE intelligent transportation systems. Proceedings (Cat. No. 01TH8585)*, pp. 1206–1211, IEEE, 2001. [cited on p. v, 26]
 - [13] G. Nowacki, “Development and standardization of intelligent transport systems,” *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 6, no. 3, pp. 403–411, 2012. [cited on p. v, 26, 27, 28]
 - [14] J. Guerrero-Ibáñez, S. Zeadally, and J. Contreras-Castillo, “Sensor technologies for intelligent transportation systems,” *Sensors*, vol. 18, no. 4, p. 1212, 2018. [cited on p. v, 29, 30, 31, 32, 33]
 - [15] P. M. P. Ferreira, *Relatório de Estágio: Análise da eficiência do Sistema de controlo de tráfego da cidade do Porto*. PhD thesis, Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2015. [cited on p. v, 39, 40]
 - [16] J. de Dios Ortúzar and L. G. Willumsen, *Modelling transport*. John wiley & sons, 2011. [cited on p. v, 46, 54]
 - [17] J. P. M. P. Tavares, *Aplicabilidade e robustez de modelos de afectação de tráfego em redes urbanas*. PhD thesis, Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2003. [cited on p. vi, 22, 45, 46, 47]
 - [18] C. Vilarinho, “Calibração de modelos microscópicos de simulação de tráfego em redes urbanas [dissertation],” *Civil engineering: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, 2008. [cited on p. vi, 48, 49, 52]
 - [19] A. Costa and J. Macedo, “Manual do planeamento de acessibilidades e transportes, engenharia de tráfego: Conceitos básicos,” *Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, Porto, Portugal*, 2008. [cited on p. vi, 49, 50, 51, 52, 53]
 - [20] T. R. Board, E. National Academies of Sciences, and Medicine, *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington, DC: The National Academies Press, 2022. [cited on p. vii, 61, 94]
 - [21] D. Levinson, H. Liu, W. Garrison, M. Hickman, A. Danczyk, M. Corbett, and B. Nee, “Fundamentals of transportation/introduction — wikibooks, the free textbook project,” Last access: January 2, 2023 2021. [cited on p. 1]

- [22] G. Yannis and A. Chaziris, “Transport system and infrastructure,” *Transportation research procedia*, vol. 60, pp. 6–11, 2022. [cited on p. 1]
- [23] J. Pan, I. S. Popa, K. Zeitouni, and C. Borcea, “Proactive vehicular traffic rerouting for lower travel time,” *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 62, no. 8, pp. 3551–3568, 2013. [cited on p. 2]
- [24] J. J. Laird, J. Nellthorp, and P. J. Mackie, “Network effects and total economic impact in transport appraisal,” *Transport policy*, vol. 12, no. 6, pp. 537–544, 2005. [cited on p. 3]
- [25] M. Cepeda, J. Schoufour, R. Freak-Poli, C. M. Koolhaas, K. Dhana, W. M. Bramer, and O. H. Franco, “Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review,” *The Lancet Public Health*, vol. 2, no. 1, pp. e23–e34, 2017. [cited on p. 3]
- [26] S. C. Anenberg, J. Miller, D. K. Henze, R. Minjares, and P. Achakulwisut, “The global burden of transportation tailpipe emissions on air pollution-related mortality in 2010 and 2015,” *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 9, p. 094012, 2019. [cited on p. 3]
- [27] A. A. Mohammed, K. Ambak, A. M. Mosa, and D. Syamsunur, “A review of traffic accidents and related practices worldwide,” *The Open Transportation Journal*, vol. 13, no. 1, 2019. [cited on p. 3]
- [28] T. Baalisampang, R. Abbassi, V. Garaniya, F. Khan, and M. Dadashzadeh, “Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation,” *Ocean Engineering*, vol. 158, pp. 350–366, 2018. [cited on p. 3]
- [29] J. M. B. Morillas, G. R. Gozalo, D. M. González, P. A. Moraga, and R. Vélchez-Gómez, “Noise pollution and urban planning,” *Current Pollution Reports*, vol. 4, no. 3, pp. 208–219, 2018. [cited on p. 3]
- [30] T. Münzel, M. Sørensen, and A. Daiber, “Transportation noise pollution and cardiovascular disease,” *Nature Reviews Cardiology*, vol. 18, no. 9, pp. 619–636, 2021. [cited on p. 3]
- [31] S. Schroer and F. Hölker, “Light pollution reduction,” *Handbook of advanced lighting technology*, pp. 991–1010, 2017. [cited on p. 3]
- [32] V. Krishnakumar, J. Sastry, and G. N. Swamy, “Implication of thermal discharges into the sea-a review,” 1991. [cited on p. 3]
- [33] T. Outlook, “Seamless transport for greener growth,” *Organisation for Economic Co-operation and Development. Accessed June*, vol. 20, p. 2015, 2012. [cited on p. 3]

- [34] M. Nogueira, “Tomada de posse dos órgãos municipais marcada para quarta-feira no pavilhão rosa mota,” Last access: January 20, 2023. [cited on p. 7]
- [35] I. de Azul e Branco, “O coração do rei d. pedro iv de portugal,” Last access: January 20, 2023. [cited on p. 7]
- [36] F. Brito, “Histórias da cidade: Almeida garrett é o anfitrião na sala de visitas do porto,” Last access: January 20, 2023. [cited on p. 8]
- [37] D. Teodorovic and M. Janic, *Transportation engineering: Theory, practice and modeling*. Butterworth-Heinemann, 2016. [cited on p. 15, 16]
- [38] S. M. Fitzpatrick and R. Callaghan, “Magellan’s crossing of the pacific,” *The Journal of Pacific History*, vol. 43, no. 2, pp. 145–165, 2008. [cited on p. 15]
- [39] M. Janić, *Advanced transport systems*. Springer, 2014. [cited on p. 15]
- [40] M. A. Levine, “Domestication and early history of the horse,” *The domestic horse: the origins, development and management of its behaviour*, pp. 5–22, 2005. [cited on p. 17]
- [41] P. R. S. Moorey, “Pictorial evidence for the history of horse-riding in iraq before the kassite period,” *Iraq*, vol. 32, no. 1, pp. 36–50, 1970. [cited on p. 17]
- [42] D. Anthony, D. Y. Telegin, and D. Brown, “The origin of horseback riding,” *Scientific American*, vol. 265, no. 6, pp. 94–101, 1991. [cited on p. 17]
- [43] G. L. Possehl, *The Indus civilization: a contemporary perspective*. Rowman Altamira, 2002. [cited on p. 17]
- [44] K. Kwiatkowska and D. Manasterski, “Amber routes in central europe’s prehistory—an overview,” in *International Amber Researcher Symposium. Amber. Deposits-Collection-The Market*, pp. 77–79, 2013. [cited on p. 17]
- [45] H. Kalkan, “New observations on the road of ephesus-hypaepa-sardeis and persian royal road ephesos-hypaipa-sardeis yolu üzerine yeni gözlemler ve pers kral yolu,” *Journal of Human Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 448–456, 2014. [cited on p. 17]
- [46] L. Luo, X. Wang, C. Liu, H. Guo, and X. Du, “Integrated rs, gis and gps approaches to archaeological prospecting in the hexi corridor, nw china: a case study of the royal road to ancient dunhuang,” *Journal of Archaeological Science*, vol. 50, pp. 178–190, 2014. [cited on p. 17]

- [47] X. Liu, *The Silk Road in world history*. Oxford University Press, 2010. [cited on p. 17]
- [48] “The silk road,” Last access: January 6, 2023 2019. [cited on p. 17]
- [49] R. A. Gabriel, *The great armies of antiquity*. Greenwood Publishing Group, 2002. [cited on p. 18]
- [50] R. Laurence, *The roads of Roman Italy: mobility and cultural change*. Routledge, 2002. [cited on p. 18, 19]
- [51] W. Kaszynski, *The American highway: the history and culture of roads in the United States*. McFarland, 2000. [cited on p. 18]
- [52] K. D. Matthews, “The embattled driver in ancient rome,” *Expedition*, vol. 2, no. 3, p. 22, 1960. [cited on p. 19]
- [53] E. Harvey, “Pavage grants and urban street paving in medieval england, 1249–1462,” *The Journal of Transport History*, vol. 31, no. 2, pp. 151–163, 2010. [cited on p. 19]
- [54] I. Baker, “Asphalt,” in *Fifty Materials That Make the World*, pp. 11–13, Springer, 2018. [cited on p. 19]
- [55] N. Gkikas, *Automotive ergonomics: driver-vehicle interaction*. CRC Press, 2012. [cited on p. 20]
- [56] L. Brooke, *Ford model T: the car that put the world on wheels*. Motorbooks, 2008. [cited on p. 20]
- [57] R. F. Weingroff, “Federal-aid highway act of 1956: Creating the interstate system,” Last access: January 9, 2023. [cited on p. 21]
- [58] P. G. Newman and J. R. Kenworthy, *Cities and automobile dependence: An international sourcebook*. 1989. [cited on p. 21]
- [59] J. G. Wardrop, “Road paper. some theoretical aspects of road traffic research,” *Proceedings of the institution of civil engineers*, vol. 1, no. 3, pp. 325–362, 1952. [cited on p. 21]
- [60] M. Beckmann, C. B. McGuire, and C. B. Winsten, “Studies in the economics of transportation,” tech. rep., 1956. [cited on p. 21]
- [61] I. Prigogine and R. Herman, “Kinetic theory of vehicular traffic,” tech. rep., 1971. [cited on p. 21]
- [62] D. Braess, A. Nagurney, and T. Wakolbinger, “On a paradox of traffic planning,” *Transportation science*, vol. 39, no. 4, pp. 446–450, 2005. [cited on p. 21]

- [63] B. Wolshon, A. Pande, *et al.*, *Traffic engineering handbook*. John Wiley & Sons, 2016. [cited on p. 21]
- [64] N. Geroliminis and C. F. Daganzo, “Macroscopic modeling of traffic in cities,” tech. rep., 2007. [cited on p. 22]
- [65] J. Machado, “Modelação e simulação de sistemas de tráfego,” *Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto*, 2004. [cited on p. 22]
- [66] J. Tavares and J. Pereira, “Modelos de simulação e de previsão de tráfego,” *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto*, 2015. [cited on p. 22]
- [67] O. Teixeira, “Mobilidade e acessibilidade urbana. estudo de caso do município de viana,” *Instituto Superior de Educação e Ciências. Obtido de <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/21551/1/TFM.pdf>*, 2014. [cited on p. 23]
- [68] P. Gerland, S. Hertog, M. Wheldon, V. Kantorova, D. Gu, G. Gonnella, I. Williams, L. Zeifman, G. Bay, H. Castanheira, Y. Kamiya, L. Bassarsky, V. Gaigbe-Togbe, and T. Spoorenberg, *World Population Prospects 2022: Summary of results*. 07 2022. [cited on p. 23]
- [69] Inrix, “Scorecard.” [cited on p. 23]
- [70] W. H. Organization, *Global status report on road safety 2015*. World Health Organization, 2015. [cited on p. 23]
- [71] S. C. Anenberg, A. Belova, J. Brandt, N. Fann, S. Greco, S. Guttikunda, M.-E. Heroux, F. Hurley, M. Krzyzanowski, S. Medina, *et al.*, “Survey of ambient air pollution health risk assessment tools,” *Risk analysis*, vol. 36, no. 9, pp. 1718–1736, 2016. [cited on p. 24]
- [72] A. Oyofe, “1.1 what is a sustainable urban mobility plan?.” [cited on p. 25]
- [73] T. Brandt, “Information systems in automobiles – past, present, and future uses,” 08 2013. [cited on p. 26]
- [74] H. Tokuyama, “Intelligent transportation systems in japan,” *Public Roads*, vol. 60, no. 2, pp. 41–45, 1996. [cited on p. 27]
- [75] M. Williams, “Prometheus-the european research programme for optimising the road transport system in europe,” in *IEE Colloquium on Driver Information*, pp. 1–1, IET, 1988. [cited on p. 27]
- [76] I. Catling, “The drive programme in the european community,” in *IEE Colloquium on Driver Information*, pp. 2/1–2/4, 1988. [cited on p. 27]

- [77] A. Mishra, A. Priya, and B. Scholar, “A comprehensive study on intelligent transportation systems,” *SMART MOVES JOURNAL IJOSCIENCE*, vol. 4, p. 10, 10 2018. [cited on p. 27]
- [78] H. Sazali and I. M. Firdaus, “Highway infrastructure: visions & challenges in the next decades,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 512, p. 012047, IOP Publishing, 2019. [cited on p. 28]
- [79] “Fourth framework programme of european community activities in the field of research and technological development and demonstration, 1994-1998,” Last access: April 30, 2023. [cited on p. 28]
- [80] C. George, B. Cezar, B. C. Paulina, P. D. Paul, *et al.*, “Business models for extending of 112 emergency call center capabilities with e-call function insertion,” *Annals of the University of Oradea, Economic Science Series*, vol. 19, no. 2, 2010. [cited on p. 28]
- [81] “Streams its platform,” Last access: April 30, 2023. [cited on p. 28]
- [82] L. A. Klein, *ITS sensors and architectures for traffic management and connected vehicles*. CRC Press, 2017. [cited on p. 29, 30, 31, 32, 33, 34]
- [83] “Chapter 4 - in-roadway sensor technologies,” Last access: May 01, 2023. [cited on p. 30, 31, 34]
- [84] B. González, F. J. Jiménez, and J. De Frutos, “A virtual instrument for road vehicle classification based on piezoelectric transducers,” *Sensors*, vol. 20, no. 16, p. 4597, 2020. [cited on p. 30]
- [85] R. Abinaya, V. Varsha, and K. Hariharan, “An intelligent street light system based on piezoelectric sensor networks,” in *2017 4th International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS)*, pp. 138–142, 2017. [cited on p. 30]
- [86] “Road tube: Diamond traffic products,” Last access: May 07, 2023. [cited on p. 31]
- [87] Last access: May 07, 2023. [cited on p. 31]
- [88] “Piezoelectric traffic sensor,” Last access: May 07, 2023. [cited on p. 31]
- [89] Last access: May 07, 2023. [cited on p. 34]
- [90] “Xtralis asim tri-tech traffic detectors tt 29x series,” Last access: May 05, 2023. [cited on p. 34]
- [91] “Tdc4 e 06 - adtec technologies,” Last access: May 05, 2023 2015. [cited on p. 34, 35]

- [92] “Installation manual tri-tech tt 290 series,” Last access: May 06, 2023. [cited on p. 35]
- [93] “Iso/tc 204 - intelligent transport systems,” Last access: May 05, 2023. [cited on p. 35]
- [94] J. Shibata and R. French, “Progress in intelligent transportation systems in the us, europe and japan,” in *ISATA magazine*, pp. 27–29, R&D French Associates, 1999. [cited on p. 36]
- [95] M. Obaidat, “Feasibility of the deployment of intelligent transportation systems (its) in jordan,” 05 1997. [cited on p. 37, 38]
- [96] F. H. Administration and M. Systems. Federal Highway Administration, 1996. [cited on p. 37, 38]
- [97] J. Shibata and R. L. French, “A comparison of intelligent transportation systems progress around the world through 1996,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 30, no. 8, pp. 1057–1061, 1997. [cited on p. 38]
- [98] C.-Y. Chan, W.-B. Zhang, E. M. El Koursi, and E. Lemaire, “Safety assessment of advanced vehicle control and safety systems (avcss): A case study,” 2001. [cited on p. 38]
- [99] S. E. Shladover, “Automated vehicles for highway operations (automated highway systems),” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 219, no. 1, pp. 53–75, 2005. [cited on p. 38]
- [100] G. Saem, “The way of mobility,” Last access: May 11, 2023 2015. [cited on p. 39]
- [101] “The c-roads platform – an overview of harmonised c-its deployment in europe,” Last access: May 12, 2023. [cited on p. 39, 40]
- [102] “C-roads annual pilot overview report 2021,” Last access: May 12, 2023. [cited on p. 41, 42, 43]
- [103] G. Foerster, “Traffic state estimation using hierarchical clustering and principal components analysis: a practical approach,” *Fraunhofer Institute for Transportation and Infrastructure Systems (IVI)*, Alemanha, 2008. [cited on p. 45]
- [104] S. P. Hoogendoorn and P. H. Bovy, “State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 215, no. 4, pp. 283–303, 2001. [cited on p. 51, 54]

- [105] A. Ferrara, S. Sacone, S. Siri, A. Ferrara, S. Sacone, and S. Siri, “Microscopic and mesoscopic traffic models,” *Freeway traffic modelling and control*, pp. 113–143, 2018. [cited on p. 51]
- [106] E. Lieberman, A. K. Rathi, *et al.*, “Traffic simulation,” *Traffic flow theory*, 1997. [cited on p. 54]
- [107] X. Li, Z. Li, J. Han, and J.-G. Lee, “Temporal outlier detection in vehicle traffic data,” in *2009 IEEE 25th International Conference on Data Engineering*, pp. 1319–1322, IEEE, 2009. [cited on p. 55]
- [108] J. Lopes, *Traffic Prediction for Unplanned Events on Motorways*. PhD thesis, PhD thesis, Universidade Técnica de Lisboa-IST, 2012. [cited on p. 55]
- [109] J. W. Osborne and A. Overbay, “The power of outliers (and why researchers should always check for them),” *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, vol. 9, no. 1, p. 6, 2004. [cited on p. 55]
- [110] V. Chandola, A. Banerjee, and V. Kumar, “Outlier detection: A survey,” *ACM Computing Surveys*, vol. 14, p. 15, 2007. [cited on p. 55]
- [111] C. Leys, C. Ley, O. Klein, P. Bernard, and L. Licata, “Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median,” *Journal of experimental social psychology*, vol. 49, no. 4, pp. 764–766, 2013. [cited on p. 56]
- [112] C. Messer and J. Bonneson, “Capacity analysis of interchange ramp terminals-final report,” *Texas A&M Research Foundation*, 1997. [cited on p. 61]
- [113] I. N. de Estatística, “Censos 2021 - população,” Last access: June 14, 2023. [cited on p. 61]
- [114] A. da Costa and J. Macedo, “Manual de planeamento das acessibilidades e da gestão viária -níveis de serviço em estradas e auto-estradas,” *Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte*, 2008. [cited on p. 61]
- [115] I. Idris, *Python data analysis*. Packt Publishing Ltd, 2014. [cited on p. 62]
- [116] R. Stephens, “Redmonk top 20 languages over time: June 2022,” Last access: June 17, 2023. [cited on p. 62]
- [117] P. S. Foundation, “Python software foundation,” Last access: June 17, 2023. [cited on p. 62]
- [118] R. Kenneth and P. S. Foundation, “Requests: Http for humans™,” Last access: June 17, 2023. [cited on p. 62]

- [119] T. M. development team, “Matplotlib: Visualization with python,” Last access: June 17, 2023. [cited on p. 62]
- [120] J. A. Clark and contributors, “Pillow,” Last access: June 17, 2023. [cited on p. 63]
- [121] P. S. Foundation, “tkinter — python interface to tcl/tk,” Last access: June 17, 2023. [cited on p. 63]
- [122] D. Cortes and W. Caban, “Pyinstaller manual,” Last access: June 19, 2023. [cited on p. 65]
- [123] A. Meier and M. Kaufmann, *SQL & NoSQL databases*. Springer, 2019. [cited on p. 96]

Anexo A

Anexo A

Função *image_convert()*: conversão e armazenamento de ficheiros PDF para formato imagem JPEG

```
input_path = current_dir + '\\plantas\\PDF\\'
output_path = current_dir + '\\plantas\\JPG\\'
if not os.path.exists(output_path):
    os.makedirs(output_path)

if not os.path.exists(input_path):
    root = tk.Tk()
    root.title("Diretório em falta!")
    root.geometry('450x100')

    text_box = Text(
        root,
        height=10,
        width=45,
        padx=10, pady=10
    )
    text_box.insert('end',
        'Inserir plantas dos cruzamentos em VIA\\plantas\\PDF!')
    text_box.config(state='disabled', bg=err_color)
    text_box.pack(expand=True, fill=tk.BOTH)
    root.mainloop()
    raise SystemExit()

input_files = [f for f in os.listdir(input_path)]
```

```

        if f.endswith(( '.pdf', '.PDF'))]

output_files = [f.replace('_Planta', '') for f in listdir(output_path)
                 if isfile(join(output_path, f))]

for filename in input_files:
    file_id = str(filename).split('SLAT')[1].replace('_Planta', '')
        .replace('.pdf', '.jpg')
    if file_id not in output_files:
        pdffile = input_path + filename
        with pdfium.PdfContext(pdffile) as pdf:
            image = pdfium.render_page_topil(
                pdf, 0, scale = 150/72)#dpi = 150
            image.save(output_path + file_id)

```

Anexo B

Anexo B

Ficheiro *images__coordinates.json*: Ficheiro JSON com as coordenadas das espiras eletromagnéticas nas plantas dos cruzamentos

```
{
  #'número do cruzamento': {
    #'nome da espira ': [
      #coordenada x,
      #coordenada y
    #]
  #}
  "003": {
    "e1 ": [
      1801,
      938
    ],
    "e2 ": [
      1792,
      992
    ],
    "e3 ": [
      1783,
      1046
    ],
    "e4 ": [
      1216,
      1326
    ],
  },
}
```

```

    "e5": [
        1260,
        378
    ],
    "e6": [
        1151,
        1319
    ],
    "e7_lq": [
        1059,
        1312
    ],
    "e8_lq": [
        1321,
        350
    ],
    "e9_lq": [
        1284,
        102
    ],
    "e10_lq": [
        529,
        801
    ],
    "e11_ct": [
        704,
        760
    ],
    "e12_ct": [
        693,
        797
    ],
    "e13_ct": [
        688,
        834
    ]
},
"005": {
    "e1": [
        1602,
        749
    ],
    "e2": [
        1599,
        797
    ],
    "e3": [

```

```

    969,
    999
  ],
  "e4_lq": [
    2361,
    881
  ],
  "e5_lq": [
    2354,
    924
  ],
  "e6_lq": [
    169,
    563
  ],
  "e7_lq": [
    1204,
    284
  ]
],
},
"014": {
  "e1": [
    1864,
    932
  ],
  "e2": [
    1857,
    978
  ],
  "e3": [
    1263,
    403
  ],
  "e4": [
    1313,
    413
  ],
  "e5": [
    778,
    831
  ],
  "e6_lq": [
    2337,
    1070
  ],
  "e7_lq": [
    254,

```

```

        643
    ]
},
"074": {
    "e1 ": [
        1079,
        121
    ],
    "e2 ": [
        1174,
        1316
    ]
},
"075": {
    "e1 ": [
        1758,
        873
    ],
    "e2 ": [
        819,
        1333
    ],
    "e3 ": [
        749,
        1322
    ],
    "e4 ": [
        775,
        158
    ],
    "e5_lq ": [
        2197,
        997
    ],
    "e6_lq ": [
        2211,
        938
    ],
    "e7 ": [
        847,
        165
    ]
},
"086": {
    "e1 ": [
        2152,
        699
    ]
}

```

```

],
  "e2": [
    2148,
    738
  ],
  "e3": [
    2141,
    775
  ],
  "e4": [
    1784,
    1112
  ],
  "e5": [
    1826,
    1122
  ],
  "e6": [
    1868,
    1132
  ],
  "e7": [
    1914,
    295
  ],
  "e8": [
    475,
    96
  ],
  "e9": [
    526,
    104
  ],
  "e10_lq": [
    1727,
    1323
  ]
],
"088": {
  "e1": [
    2240,
    812
  ],
  "e2": [
    1092,
    1305
  ],
  ],

```

```

    "e3_ct": [
        418,
        447
    ],
    "e4_ct": [
        410,
        510
    ],
    "e5_ct": [
        383,
        577
    ]
},
"112": {
    "e1": [
        2131,
        771
    ],
    "e2": [
        2121,
        830
    ],
    "e3": [
        2109,
        891
    ],
    "e4": [
        1364,
        101
    ],
    "e5": [
        1426,
        120
    ],
    "e6": [
        1495,
        139
    ],
    "e7_lq": [
        460,
        571
    ],
    "e8_lq": [
        1061,
        1317
    ]
}

```

}

Anexo C

Anexo C

Leitura das métricas da(s) espira(s) selecionada(s), preenchimento de lacunas e aglomeração de registos caso mais que uma espira esteja seja selecionada

```
#lista de espiras selecionadas
espiras_select = ['e' + str(element) for element in espiras]

for item in aggregated:
    i = 0
    for value in item['AggregatedDetectorValues']:
        if value['DetectorName'].split('_',1)[0] in espiras_select:
            i = i+1
            occupancy.append(value['Occupancy'])
            vehicleph.append(value['VehiclesPerHour'])
            time_stamp.append(item["IntervalFrom"].split('+', 1)[0])

#caso haja leituras em falta , preencher lacunas
if i < len(espiras_select):
    for element in item['AggregatedDetectorValues']:
        err_stamp.append(item["IntervalFrom"].split('+', 1)[0])
    while i < len(espiras_select):
        vehicleph.append(0)
        occupancy.append(0)
        i = i+1

chunk_size = len(espiras_select)
```

```
#Caso haja mais que 1 espira para consulta
if len(espiras_select) > 1:
    #Veiculos por hora
    chunked_vph = [vehicleph[i:i+chunk_size]
                   for i in range(0, len(vehicleph), chunk_size)]
    vehicleph = [sum(item) for item in chunked_vph]
    #Ocupação
    chunked_occ = [occupancy[i:i+chunk_size]
                   for i in range(0, len(occupancy), chunk_size)]
    #media da ocupação
    occupancy = [sum(item)//chunk_size for item in chunked_occ]
    occ_label = "Ocupação média (%)"
else:
    occ_label = "Ocupação (%)"
```

Anexo D

Anexo D

Cálculo do limite de débito máximo teórico e limitador de leituras *outliers*

```
#Função para cálculo do valor teórico de outlier
def theory_max(vpe):
    emp_factor = 1.15
    deb_factor = 0.7
    debit = 1900
    return vpe * int(len(espiras_select) * ((debit * deb_factor)/hr)
                    * emp_factor * interval)

#Vias Por Espira
vpe = 1
espiras_str = ' '.join(espiras_select)

#Cruzamentos onde duas vias são lidas por uma única espiro
if espiras_str == 'e1' and cross_id == '088':
    vpe = 2
if espiras_str == 'e2' and cross_id == '088':
    vpe = 2
if espiras_str == 'e1' and cross_id == '075':
    vpe = 2

out_max = theory_max(vpe)
#Se opção de limitar outlier estiver ativa,
    substitui outliers pelo máximo teórico
if outliers_choice == "Sim":
    vehicleph = [out_max if x > out_max else x for x in vehicleph]
```

