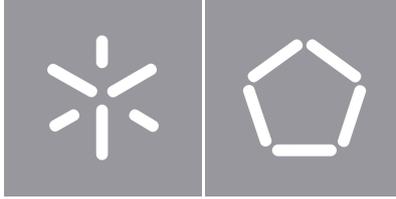


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carolina Castro de Oliveira

**Monitorização do Estado do Pavimento
e da Congestão das Vias em Cidades
Inteligentes**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carolina Castro de Oliveira

**Monitorização do Estado do Pavimento
e da Congestão das Vias em Cidades
Inteligentes**

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Informática

Trabalho efetuado sob a orientação de
Paulo Manuel Martins Carvalho
Maria Solange Pires Ferreira Rito Lima

Direitos de Autor e Condições de Utilização do Trabalho por Terceiros

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho:



CC BY-ND

[/https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)

Declaração de Integridade

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, Braga, novembro 2023

Carolina Castro de Oliveira

Resumo

Nos últimos anos, cada vez mais pessoas que anteriormente viviam em zonas rurais migram para centros urbanos à procura de novas oportunidades. Face a este movimento, vários problemas e adversidades foram-se agravando, nomeadamente, o aumento do fluxo rodoviário, que cria problemas de trânsito, o aumento dos níveis de poluição, o acesso à saúde, entre outros. Desta forma, torna-se imperativo gerir de forma eficaz e sustentável os recursos, com a finalidade de melhorar a qualidade de vida dos habitantes destas cidades.

Neste contexto, juntamente com os avanços tecnológicos que se tem observado, surge o conceito de Cidades Inteligentes, que recorrendo a redes de sensores recolhem todos os dados necessários para "virtualizar" as cidades. Desse modo, a informação coletada está centralizada, para que assim seja possível gerir os recursos disponíveis de forma informada, responsável e eficiente, para que seja possível responder às necessidades da população.

Com este trabalho, pretende-se estudar dois problemas concretos no âmbito das Cidades Inteligentes, nomeadamente na área do Transporte Inteligente, recorrendo à simulação de redes de sensores, constituídas por sensores de aceleração instalados na rede de transporte públicos da cidade, a partir da qual vão ser recolhidos dados. O primeiro problema que se tenciona solucionar está relacionado com a monitorização do estado do pavimento. Com os dados provenientes dos acelerómetros, espera-se ser possível estimar o estado de conservação das vias rodoviárias e, desta forma, as entidades responsáveis passam a ser capazes de realizar decisões informadas e apropriadas face ao estado de determinada estrada, procedendo assim à sua restauração caso necessário. Uma segunda vertente que se pretende explorar foca a monitorização da congestão das vias rodoviárias em que, com base na mesma rede de transportes, se projeta ser possível determinar os níveis de fluxo rodoviário. Por fim, é ainda expectável que beneficiando dos transportes públicos dos quais já se está a tirar proveito, seja plausível medir os níveis de poluição aérea.

Palavras-chave Cidades Inteligentes, Transporte Inteligente, Monitorização do tráfego, Estado do pavimento, Acelerómetros, *Internet* das coisas, Sensores

Abstract

In recent years, we have been witnessing more and more people who previously lived in rural areas are migrating to urban centers in search of new opportunities. Faced with this movement, several problems and adversities have worsened, namely, the increase in the flow of traffic that creates traffic problems, increased levels of pollution, and access to health, among others. Thus, it becomes imperative to manage the resources effectively and sustainably, in order to improve the quality of life of the inhabitants in these cities.

In this context, and with the technological advances that have been observed, the concept of Smart Cities emerges, by using sensor networks, it's possible to collect all the data needed to "virtualize" the cities. In this way, the information collected is centralized to manage the available resources in an informed, responsible, and efficient way to meet the population's needs.

This work aims to study two specific problems in the scope of smart cities, namely in the area of Intelligent Transportation, using a simulation of a network of sensors, based on accelerometers, installed in the city's public transportation network, from which data will be collected. The first problem that is intended to be solved is related to sidewalk condition monitoring. With the data from the accelerometers, it is expected that it will be possible to estimate the condition of the roads, and in this way, the responsible entities will be able to make informed and appropriate decisions regarding the condition of a given road, and thus, proceed with its restoration, if necessary. The second aspect that's intended to be explored focuses on monitoring the congestion of roads, which based on the same transport network is projected to be possible to determine the levels of road flow. Finally, if possible, it is also expected that the public transport vehicles, that are already being taken advantage of, can be used to measure the levels of air pollution.

Keywords Smart Cities, Smart Transportation, Traffic Monitoring, Pavement Condition, Accelerometers, Internet of things, Sensors

Conteúdo

I	Material Introdutório	1
1	Introdução	2
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Metodologia de investigação	4
1.4	Estrutura do documento	4
2	Estado da arte	6
2.1	<i>Internet of Things</i>	6
2.2	<i>Smart Cities e Big Data</i>	7
2.3	<i>Smart Transportation</i>	9
2.4	Trabalhos relacionados	10
2.4.1	BusNet	10
2.4.2	S-mile	12
2.4.3	Outros projetos	12
2.5	Tecnologias	13
2.5.1	Técnicas de sistemas de monitorização de tráfego	13
2.5.2	Sensores	14
2.6	Comunicação sem fios	20
2.6.1	WiFi	20
2.6.2	LoRaWan	21
2.6.3	Tecnologias móveis	21
2.6.4	IEEE 802.15.4	22
2.6.5	Comparação e escolha	22

2.7	Principais desafios	23
2.8	Ferramenta de simulação	24
2.9	Resumo do capítulo	25
II	Core da Dissertação	27
3	Abordagem ao problema	28
3.1	Desafios e soluções propostas	28
3.2	Utilizadores do sistema	29
3.3	Ambiente de implementação e situação atual	29
3.4	Factos e pressupostos	30
3.4.1	Factos	30
3.4.2	Pressupostos	30
3.5	Modelo de domínio	31
3.6	Fluxo sistema	32
3.7	Requisitos de Infra-estrutura	33
3.8	Requisitos funcionais	34
3.9	Requisitos não funcionais	36
3.10	Diagrama do sistema	39
3.11	Protótipos da interface da aplicação <i>Web</i>	39
3.11.1	Página inicial	40
3.11.2	Página de rota	40
3.11.3	Listagem de condição do pavimento	41
3.11.4	Listagem de tráfego	42
3.12	Resumo do capítulo	43
4	Desenvolvimento	44
4.1	Ambientação	44
4.1.1	Sensores	44
4.1.2	Criação de rotas	46
4.2	Implementação	47
4.2.1	Valores de referência	47
4.2.2	Teste experimental em contexto real	49

4.2.3	Rotas de estudo	53
4.2.4	Scripts	59
4.3	Resumo do capítulo	63
5	Análise dos resultados	64
5.1	Apresentação dos resultados obtidos	64
5.1.1	Rota 7	65
5.1.2	Rota 40	67
5.1.3	Rota 43	69
5.2	Análise e conclusão dos resultados obtidos	70
5.3	Resumo do capítulo	71
6	Conclusões e trabalho futuro	72
6.1	Principais conclusões	72
6.2	Perspetiva de trabalho futuro	74
III	Apêndices	81
A	Material de suporte	82
A.1	Manual de instruções	82

Lista de Figuras

1	Integração de dispositivos IoT [5]	6
2	5Vs de <i>Big Data</i> [7]	8
3	Busnet logo [12]	10
4	S-mile logo [14]	12
5	Sensores estacionários intrusivos [19]	16
6	Sensores estacionários não intrusivos [19]	18
7	Sensores móveis (Adaptado de [19] e [20]) [7]	19
8	5 tipos de comunicação IoV [21]	20
9	Pneus e sistemas de suspensão [28]	24
10	Exemplo de uma rede de sensores implementada no CupCarbon [30]	25
11	Modelo de domínio	31
12	Exemplo de estados do pavimento.	32
13	Via congestionada [37]	32
14	Diagrama de fluxo	33
15	Diagrama representativo do sistema	39
16	Página inicial	40
17	Página de rota	41
18	Listagem de condição do pavimento	42
19	Listagem de tráfego	43
20	Sensores disponíveis no CupCarbon	44
21	Criação de rotas	46
22	Deslocação do sensor móvel ao longo da rota	47
23	Sugestão dos valores limites do IRI para diferentes velocidades (adaptada de [40])	48
24	Menu inicial da <i>phyphox</i> [42]	50

25	Gráficos gerados pela aplicação <i>phyphox</i>	51
26	Relação entre os gráficos gerados e o estado de pavimento correspondente	52
27	Percurso da rota 7 [42]	53
28	Percurso da rota 7 representada no CupCarbon	54
29	Resultado do teste experimental na rota 7	55
30	Percurso da rota 40 [43]	56
31	Percurso da rota 40 representada no CupCarbon	56
32	Resultado do teste experimental na rota 40	57
33	Percurso da rota 43 [44]	58
34	Percurso da rota 43 representada no CupCarbon	58
35	Resultado do teste experimental na rota 43	59
36	Exemplo dos valores imprimidos para o ficheiro dos resultados	65
37	Resultado do teste experimental na rota 7	67
38	Resultado do teste experimental na rota 40	69
39	Resultado do teste experimental na rota 43	70

Lista de Tabelas

- 1 Aplicações ITS 14
- 2 Exemplos de sensores intrusivos 16
- 3 Exemplos de sensores não intrusivos 17
- 4 Comparação de tecnologias de comunicação sem fios 22

- 5 Resultados da implementação da rota 7 66
- 6 Resultados da implementação da rota 40 68
- 7 Resultados da implementação da rota 43 69

Lista de acrónimos

API Application Programming Interface.

CSV Comma-Separated Values file.

GPS Global Positioning System.

GPS Global Positioning System.

IoT Internet of Things.

IoV Internet of Vehicles.

IRI International Roughness Index.

ITS Intelligent Transport System.

LoRaWan Long Range Wide Area Network.

LR-WPAN Low-Rate Wireless Personal Area Network.

OSM Open Street Map.

TUB Transportes Urbanos de Braga.

V2I Vehicle-to-Infrastructure.

V2P Vehicle-to-Pedestrian.

V2R Vehicle-to-Roadside.

V2S Vehicle-to-Sensor.

V2V Vehicle-to-Vehicle.

XLS Microsoft Excel Spreadsheet.

Glossário

Smart Cities São cidades que utilizam várias tecnologias como sensores, redes sem fios, aplicações móveis, entre outros, com a finalidade de centralizar todos os dados recolhidos de forma a virtualizar as cidades e fazer uma gestão eficiente dos recursos.

Smart Transportation Este conceito refere-se à aplicação de várias tecnologias com o objetivo de gerir e monitorizar os sistemas de transporte de forma segura e eficiente.

Parte I
Material Introdutório

Capítulo 1

Introdução

Desde há muito tempo que se tem verificado um aumento progressivo do número de pessoas que abandonam as suas vidas nas zonas rurais pelas condições e oportunidades que existem nas zonas urbanas [1]. Torna-se por isso importante que as cidades estejam prontas para receber estas pessoas, havendo a necessidade de aperfeiçoar os métodos de gestão e monitorização das mesmas.

Desta forma, torna-se interessante estudar a integração das novas tecnologias recentemente desenvolvidas nas cidades, com o objetivo de gerir, de forma eficiente e responsável, os recursos utilizados. Desta necessidade, surgiram as Cidades Inteligentes que conectam múltiplos dispositivos e tecnologias, de forma a centralizar toda a informação recolhida, que permite virtualizar as cidades. Os principais objetivos da incorporação destas tecnologias focam no desenvolvimento sustentável das cidades, assim como o bem-estar da sua população. Alguns exemplos das suas áreas de operação são a gestão eficiente dos transportes públicos, sustentabilidade ambiental, gestão de saneamento, redes de abastecimento de água, educação, saúde, etc.

Na Europa, as Cidades Inteligentes que mais se destacam são Copenhaga, Helsínquia, Tessalónica e Viena [2]. Estas cidades apresentam projetos em diversas áreas como a saúde, mobilidade, infraestruturas, segurança, entre muitas outras.

Destes pressupostos, um setor de elevado interesse para as grandes cidades designa-se *Smart Transportation*, que envolve a modernização das redes de transportes públicos, tornando-a tecnologicamente evoluída e menos poluente. Neste contexto, a presente dissertação procura, a partir das redes de transportes públicos, recolher vários dados que serão estudados por entidades, como por exemplo as câmaras municipais, para tomar decisões informadas.

1.1 Motivação

De acordo com estudos recentes conduzidos pelas Nações Unidas, prevê-se que em 2050, dois terços da população encontrar-se-á a viver em cidades [3]. Consequentemente, torna-se imperativo planear uma gestão organizada e sustentável dos vários setores que compõem estes centros metropolitanos. Este aumento de habitantes acarreta vários problemas tais como o aumento dos níveis de poluição e desigualdade social mais acentuada. Outra adversidade que se tem verificado é o aumento do congestionamento rodoviário, que devido ao aumento da população, juntamente com facto de cada vez mais pessoas possuírem as suas próprias viaturas, está a tornar urgente procurar soluções inteligentes para lidar com o mesmo.

É a partir desta necessidade que emerge este trabalho que propõe, a partir de redes de transportes públicos, integrar novas tecnologias como sensores sem fios, com o intuito de monitorizar diversos aspetos de elevado interesse, como o tráfego, estado do pavimento rodoviário, assim como os níveis de poluição. Desta forma, tirando partido dos transportes públicos, o único custo monetário do projeto seria a aquisição dos sensores, a sua instalação e manutenção.

1.2 Objetivos

Os objetivos principais deste projeto centram-se na monitorização do estado do pavimento e congestão das vias, recorrendo a sensores instalados nos transportes públicos das cidades. Em particular, pretende-se estudar, desenvolver, testar e avaliar uma arquitetura de monitorização inteligente para o problema em mãos. Para este efeito, utilizar-se-á um ambiente de simulação para desenhar e explorar uma rede de transportes públicos, de forma a obter os dados recolhidos pelos sensores.

Para atingir os objetivos principais da presente tese, tem-se como objetivos intermédios:

- estudo do estado da arte relacionado com o tema do trabalho;
- estudo e desenvolvimento da arquitetura do sistema, recorrendo ao levantamento de requisitos e desenvolvimento de diagramas;
- implementação da solução, que consiste no desenvolvimento dos *scripts* e na definição dos cenários de teste;
- teste do conceito, aplicando a solução implementada a vários cenários de teste;

- análise dos resultados obtidos.

1.3 Metodologia de investigação

De modo a atingir os objetivos traçados anteriormente, o desenvolvimento deste projeto será decomposto em duas fases. Na primeira, será realizado o estudo detalhado do estado da arte. Pretende-se desta forma, adquirir maior conhecimento do domínio do problema, os seus maiores desafios, analisar trabalhos relacionados com o tema proposto e a familiarização das tecnologias disponíveis, nomeadamente sensores que podem vir a ser utilizados. Simultaneamente, serão estudadas algumas ferramentas de simulação, com o objetivo de escolher a mais indicada e desta forma inicializar a ambientação à mesma.

Na segunda fase, após concluído o estudo do domínio, será realizado o levantamento dos requisitos funcionais e não funcionais do sistema, com o objetivo de em seguida definir a sua arquitetura. Posteriormente, recorrendo à ferramenta de simulação previamente escolhida, serão estudadas e realizadas várias simulações, com o intuito de alcançar uma solução adequada para o problema. Durante este processo, os resultados obtidos serão analisados e comparados de forma a, caso necessário, realizar várias iterações sobre o modelo proposto de forma a encontrar a solução mais satisfatória.

1.4 Estrutura do documento

No Capítulo 1 deste documento é feita uma introdução ao problema a ser tratado nesta dissertação, os objetivos que se pretendem cumprir e a metodologia de investigação que se pretende seguir.

No Capítulo 2, Estado da Arte, é realizada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos que se relacionam com a presente dissertação, assim como o estudo de trabalhos realizados nesta área de estudo. Neste capítulo ainda são estudadas as tecnologias mais utilizadas, os principais desafios que podem ser esperados na próxima fase do trabalho, como também apresentada a ferramenta de simulação que vai ser utilizada.

No Capítulo 3, será apresentado um esboço inicial do sistema desenvolvido na próxima fase da dissertação. Deste modo, são descritos os utilizadores do sistema, definidos os requisitos do infra-estrutura, funcionais e não funcionais do sistema, assim como o desenvolvimento de diagramas que ilustrem o sistema a desenvolver.

No Capítulo 4 inicia-se a componente prática da dissertação, começando pela exploração da ferramenta de simulação. De seguida, são definidos os valores de referência, definidas as rotas de estudo e

desenvolvidos os *scripts* de simulação dos sensores.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nas várias simulações realizadas para cada uma das rotas de estudo, assim como a análise e discussão dos resultados obtidos.

No último capítulo, Capítulo 6, é apresentada uma reflexão geral do projeto desenvolvido, concluindo com a perspectiva de trabalho a realizar no futuro como continuação da presente dissertação.

Capítulo 2

Estado da arte

Neste capítulo será realizado um levantamento do estado de arte relacionado com o tema da presente dissertação, as tecnologias utilizadas nos sistemas de monitorização de tráfego e condições da via.

2.1 Internet of Things

Internet of Things (IoT) é um conceito relativamente recente, que rapidamente se tornou imprescindível para o desenvolvimento das Cidades Inteligentes. Segundo [4], e como ilustra a Figura 1, IoT é definido como sendo uma rede de objetos físicos variados, como veículos, eletrodomésticos, *smartphones*, instrumentos médicos, entre muitos outros. Todos os constituintes desta rede encontram-se conectados entre si, sendo capazes de comunicar e partilhar informação utilizando para tal protocolos pré estipulados, sendo assim possível garantir segurança, controlo e monitorização em tempo real. Desta forma, passa a ser possível, a partir dos dados recolhidos pelos vários dispositivos, digitalizar as cidades de forma a tornar áreas como transporte, energia, saúde e segurança mais ‘inteligentes’.



Figura 1: Integração de dispositivos IoT [5]

Os autores em [4] identificam as principais características de IoT como sendo:

- **Interconectividade:** qualquer dispositivo da rede pode estar interconectado com a infraestrutura de comunicação;
- **Dinâmica:** o estado dos dispositivos pode alterar dinamicamente, ou seja, o número de dispositivos na rede pode mudar de forma dinâmica;
- **Heterogeneidade:** os dispositivos são heterogêneos no sentido em que têm por base diferentes *hardwares* e redes;
- **Escala:** o número de dispositivos que pertencem à rede é enorme, o que torna importante saber gerir e tratar os dados de forma eficiente;
- **Segurança:** necessidade de proteger os dados recolhidos por todos os dispositivos;
- **Conectividade:** permite a acessibilidade à rede e compatibilidade.

Adicionalmente, foram também expostos os maiores desafios para o futuro da IoT, passando estes a ser apresentados:

- **Privacidade e segurança:** tal como já foi apontado anteriormente, a segurança é um dos maiores requisitos quando de fala de IoT, visto que estamos a lidar com um grande número de dados que podem conter informações privadas, logo surge a necessidade de os proteger contra qualquer tipo de ataque e vulnerabilidade;
- **Custo:** com a tendência do crescimento de IoT é necessário adotar componentes que possuam as capacidades necessárias, mas que apresentem custos baixos;
- **Interoperabilidade:** necessidade de desenvolver interfaces comuns que possibilitem a comunicação entre dispositivos heterogêneos;
- **Gestão de dados:** dado o volume de dados produzidos é importante fazer uma gestão e tratamento dos mesmos eficiente;
- **Energia:** ter em atenção a energia consumida por todos os dispositivos da rede.

2.2 Smart Cities e Big Data

Os autores de [6] definem as cidades inteligentes como uma solução de vida integrada que interliga várias áreas como energia, transporte, infraestrutura, etc, de forma inteligente e eficiente. Alguns dos

benefícios apontados são a utilização eficiente de recursos, aumento da qualidade de vida da população, diminuição da poluição e maior nível de transparência na informação partilhada.

Focando no conceito de *Big Data*, este pode ser explicado com base nas suas cinco características fundamentais, também conhecidas como os 5Vs, ilustradas na Figura 2, que passam a ser apresentadas:

1. **Volume** - refere-se ao volume de dados a serem gerados pelas várias fontes;
2. **Velocidade** - velocidade com que os dados são gerados, armazenados, analisados e processados;
3. **Variedade** - refere-se à diversidade dos tipos de dados a ser gerados por múltiplas fontes. Os dados podem ser estruturados, semiestruturados e não estruturados sendo necessário uniformizá-los de forma a poderem ser todos tratados em conjunto;
4. **Veracidade** - refere-se à qualidade e precisão dos dados recolhidos;
5. **Valor** - diz respeito ao valor que *Big Data* tem para oferecer a um negócio.

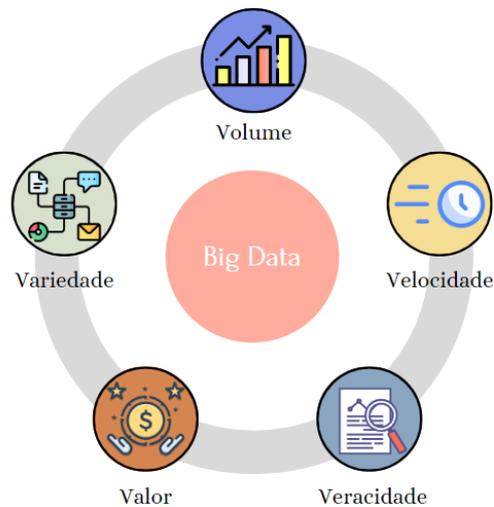


Figura 2: 5Vs de *Big Data* [7]

Os sistemas de *Big Data* são responsáveis por armazenar, processar, minerar os dados gerados para que dos mesmos seja possível retirar informações relevantes e que possam interessar ao negócio/instituição responsável.

Desta forma, é óbvia a relação entre estes dois conceitos. As cidades inteligentes, com o objetivo de melhorar a qualidade geral de vida dos seus habitantes, recolhem enormes quantidades de dados

de múltiplos tipos de dispositivos, tornando-se necessário existir tecnologias auxiliares que permitam, a partir destes, extrair informação pertinente. É nesse sentido que existe uma relação intrínseca entre estas cidades e estes sistemas.

O trabalho realizado em [6] identifica os principais desafios de utilizar *Big Data* aplicada às cidades inteligentes:

- **Fontes de dados e características:** os dados são gerados a partir de várias fontes e com vários formatos, o que dificulta o armazenamento e o tratamento dos mesmos;
- **Qualidade dos dados:** muitas vezes os dados têm origem em *crowd sourcing*, o que significa que os dados poderão sofrer falta de estrutura e conseqüentemente, haverá maior probabilidade de ocorrerem problemas de consistência, disparidade e heterogeneidade;
- **Segurança e privacidade:** é extremamente importante garantir alta segurança aos dados, principalmente durante o seu armazenamento e partilha, visto que estes podem conter informações pessoais sobre a população e até mesmo dados governamentais;
- **Custo:** os custos devem ser mantidos os mais baixos possíveis, o que poderá ser difícil quando também se quer diminuir os gastos energéticos.

2.3 Smart Transportation

Os autores de [8] propõe que as áreas de aplicação das *Smart Cities* podem ser divididas em quatro categorias principais, saúde, ambiente, energia e transporte. Na área da saúde, a introdução de novas tecnologias, permite conectar os dispositivos médicos pessoais de monitorização com os próprios profissionais de saúde. Já no caso do ambiente, a utilização de tecnologias como sensores, resultam na coleção de vários dados ambientais que podem ser utilizados com o objetivo de melhorar a qualidade de vida nestas cidades. No setor da energia, os principais problemas que se pretende solucionar são a produção de energia e os planos de distribuição conforme a necessidade da população. Por fim, temos o transporte, que é a área que será o foco da presente dissertação.

Esta área é conhecida por *Smart Transportation* ou *Smart Mobility*. De acordo com os autores em [8], *Smart Transportation* pode ser descrito como um sistema composto por todos os veículos, sinais rodoviários e bases de controlo, em que todos estes partilham dados entre si. Devido ao aumento da concentração da população nas cidades, este campo de estudo torna-se cada vez mais interessante e urgente estudar, visto que possibilita [8] [9] [10]: diminuir o congestionamento de tráfego, o impacto

ambiental, o consumo energético, os custos de manutenção, as emissões de co2, o tempo de viagem e, ao mesmo tempo, aumentar a segurança rodoviária. De acordo com [9] e [11], o conceito de *Smart Transportation* engloba várias áreas de estudo, passando algumas destas a ser apresentadas:

- **Segurança rodoviária** - como se pode concluir pelo nome, fornece as tecnologias e mecanismos necessários para aumentar a segurança rodoviária de todos os participantes;
- **Sistemas de gestão do transporte de mercadoria** - diz respeito à logística do transporte de qualquer tipo de mercadoria, que cada vez mais se torna importante visto ao aumento da popularidade do comércio *online*. Os principais objetivos em que estes sistemas se focam é a redução de congestão, poluição ambiental e auditiva;
- **Sistemas de gestão de emergência** - refere-se a uma área de elevada importância devido à necessidade de ação rápida. Esta área está relacionada com a escolha da rota de qualquer veículo de emergência como ambulâncias, bombeiros, polícia, etc;
- **Mobilidade elétrica e verde** - na qual o principal foco está em minimizar o impacto ambiental do tráfego, procurando tornar este mais sustentável;
- **Gestão do tráfego** - é uma das áreas de maior foco, visto que a grande maioria das restantes áreas podem tirar partido desta. Esta procura aumentar a eficiência do fluxo rodoviário, fazendo com que as pessoas passem menos tempo no trânsito.

2.4 Trabalhos relacionados

Nesta secção vão ser apresentados alguns trabalhos desenvolvidos na área de *Smart Transportation*.

2.4.1 BusNet



Figura 3: Busnet logo [12]

Em 2007 iniciou-se o desenvolvimento do projeto, denominado *BusNet* [13], cujo logótipo se encontra ilustrado na Figura 3, que consiste num sistema de monitorização da poluição ambiental e do estado do

pavimento das estradas, com base na instalação de sensores numa rede de transportes públicos. De forma semelhante à presente dissertação, os sensores utilizados são acelerómetros que permitem medir as vibrações sentidas durante o percurso dos autocarros.

Os autores em [13] identificaram os três principais problemas que, atualmente, existem na maioria dos sistemas de sensores das cidades e para cada um deles explicam como, recorrendo aos transportes públicos já existentes, estes problemas são resolvidos.

Problema: O elevado número de sensores que são necessários para cobrir a distância necessária.

Solução: Com a instalação dos sensores nos autocarros que percorrem as estradas que pretendemos monitorizar, passa a ser necessária uma menor quantidade de sensores, o que se traduz também num menor custo.

Problema: Dificil manutenção e gestão dos vários sensores do sistema.

Solução: A gestão e manutenção dos sensores pode ser realizada a partir do momento que os autocarros voltam à central.

Problema: A proteção de sensores que estão vastamente dispersos e que podem sofrer danos causados por animais, condições climáticas, vandalismo, etc.

Solução: Visto que os autocarros no final da sua rota diária são estacionados num local à partida seguro, estes problemas passam a ter uma importância reduzida.

O grande fator diferenciador entre *BusNet* e a arquitetura que será proposta nesta dissertação está no facto da primeira ter recolha de dados apenas no momento que o autocarro retorna à estação. Para os objetivos do projeto, monitorização da poluição e estado do pavimento, considerou-se que era satisfazível recolher os dados com uma certa latência. No entanto, como um dos objetivos desta dissertação também passa pela monitorização do tráfego rodoviário, considera-se indispensável que os dados sejam recolhidos em tempo real.

Complementarmente, são ainda identificados vários aspetos que serão muito importantes durante a reflexão e análise da arquitetura a propor, que serão apresentados na Secção 2.7.

2.4.2 S-mile



Figura 4: S-mile logo [14]

Em [15] é apresentado um sistema de monitorização da condição do pavimento, que se encontra integrado na aplicação *S-mile*, cujo logótipo se encontra ilustrado na Figura 4,. Este projeto torna-se interessante estudar ,dado que são utilizados *smartphones* para recolher dados necessários para a monitorização do estado do pavimento. Qualquer pessoa que utilize um veículo para transporte, tanto sendo pessoal, transporte público ou empresarial, apenas terá de instalar a aplicação *S-mile* no seu dispositivo móvel para que possa proceder à obtenção dos dados.

Os dados recolhidos são enviados em tempo real para o centro de recolha e processamento. Cada medição possui as seguintes informações: identificação do veículo, horas, coordenadas geográficas, aceleração linear sobre um sistema de coordenadas de três eixos e a velocidade no momento da recolha. Com a combinação destes, passa a ser possível extrapolar o nível de degradação da estrada.

2.4.3 Outros projetos

Em [16] e [17] é explorada a utilização de sensores de aceleração como uma solução para a monitorização de tráfego e das condições do pavimento. Ao contrário da maioria dos sensores frequentemente utilizados nesta área, os acelerómetros apresentam baixo consumo energético e requerem menor poder de processamento. Estes sensores medem as vibrações num espaço tridimensional, cada medição é uma junção de três valores, um para cada eixo, x, y e z.

Segundo os autores de [17], estes sensores são capazes de:

- identificar as condições do pavimento das estradas. Quanto maior o número de vibrações e quanto mais fortes, é possível inferir que a estrada se encontra em más condições. Adicionalmente, se houver um pico repentino nas medições, pode-se deduzir que existe uma depressão ou lomba na superfície da estrada;
- identificar comportamentos dos condutores;

- detetar o número de paragens do veículo. Concluiu-se que, a partir do momento que o número de paragens é superior a um limite, pode-se considerar que a via se encontra congestionada. Quanto mais tráfego existir, mais frequentes e prolongadas vão ser estas paragens.

Os autores em [16] também focam na importância do GPS, principalmente para o cálculo da velocidade do veículo, visto que os valores recolhidos pelos acelerómetros são afetados pela mesma. Por esta razão, durante o tratamento dos dados, a velocidade é um dos fatores que devem ser tidos em consideração. Complementarmente, o GPS também é utilizado para manter informação da posição geográfica dos automóveis. No final deste estudo, os autores chegaram à mesma conclusão que em [17], que os acelerómetros são uma solução viável para o problema da monitorização do estado do pavimento das vias.

2.5 Tecnologias

Nesta secção, vão ser apresentadas várias tecnologias relevantes na área de *Smart Transportation* nomeadamente, técnicas de sistemas de monitorização de tráfego, sensores e a comunicação entre os mesmos.

2.5.1 Técnicas de sistemas de monitorização de tráfego

Em [18] foi realizado um estudo sobre as técnicas utilizadas nos sistemas de monitorização de tráfego rodoviário que, devido ao grande aumento do número de automóveis e da população que se tem verificado nos últimos anos, se tornam cada vez mais indispensáveis. Estes sistemas podem ser aplicados para por exemplo, identificar veículos que circulam, determinar os níveis de tráfego, medir a velocidade dos automóveis, identificar a presença de acidentes, entre muitos outros.

Os autores deste estudo [18] classificaram o tráfego em dois tipos distintos, tráfego recorrente e tráfego não recorrente. O primeiro é caracterizado por ocorrer frequentemente no mesmo sítio e aproximadamente à mesma hora. O tráfego não recorrente ocorre de forma aleatória e, devido a se tratar de um evento inesperado, é necessário que a sua deteção seja rápida para que se possam tomar as medidas necessárias de forma a evitar o seu agravamento.

Adicionalmente, foram identificadas três técnicas de monitorização do tráfego rodoviário:

1. **Detetores de tráfego “in situ”**, como detetores de laser e tubos pneumáticos, que podem ser montados abaixo, acima ou na superfície da estrada.

2. **Redes de sensores instaladas em veículos (Vehicular sensor networks - VSNs)**, que vai de encontro com o que se pretende fazer na presente tese. Conforme os veículos se mobilizam ao longo da cidade, são recolhidos dados relativos ao trânsito que são transmitidas para a central de monitorização de tráfego, onde os dados serão tratados e posteriormente analisados por profissionais.
3. **Processamento de imagem e vídeo** a partir de câmaras colocadas em locais estratégicos que permitem em tempo real monitorizar as estradas e concluir quais os níveis de congestão.

2.5.2 Sensores

O estudo das tecnologias atualmente utilizadas nos sistemas de transporte inteligente (Intelligent Transport System - ITS), foi realizado com base nos artigos [19] e [20]. Segundos estes artigos, estes sistemas integram tecnologias avançadas de sensores, comunicação e controlo nas infraestruturas rodoviárias e veículos já existentes. Desta forma, várias aplicações recorrem aos ITS para melhorar o fluxo do tráfego, evitar acidentes e melhorar segurança e conforto dos passageiros. Estas aplicações podem ser divididas em três categorias identificadas na Tabela 1.

Categoria	Exemplos de aplicações
Monitorização e controlo de tráfego	Adaptação de semáforos de forma a tentar otimizar o fluxo de tráfego.
	Fornecer, em tempo real, rotas alternativas de acordo com as condições de tráfego existentes.
	Deteção automática de acidente.
Segurança no trânsito	Gestão automatizada de velocidade.
	Sistemas de assistência ao motorista.
	Travagem de emergência assistida.
Assistência ao condutor e infoentretenimento	Fornecer informação de navegação.
	Alertas de tráfego em tempo real
	Displays de alta-definição.

Tabela 1: Aplicações ITS

Os sensores que compõe estes sistemas formam uma rede responsável por recolher os dados provenientes de diferentes sensores para que na central de gestão do tráfego, estes sejam combinados, processados e analisados.

No entanto, os sensores têm as suas próprias limitações, nomeadamente os custos, cobertura, resiliência, precisão e o ruído que acompanha as medições realizadas, podendo mesmo levar à falha da rede que formam. Posto isto, é evidente a importância de integrar múltiplos sensores de forma a introduzir redundância nos dados para que a rede se torne mais robusta e tolerante a falhas. Este processo é conhecido como *data fusion* [20], que através dos dados redundantes torna a rede mais resiliente e permite produzir resultados mais precisos e consistentes.

Os sensores podem ser categorizados em duas classes, sensores estacionários e sensores móveis, dependendo do local em que estão instalados.

2.5.2.1 Sensores estacionários

Estes sensores são instalados numa localização fixa, perto ou sobre a estrada, e são utilizados para medir o movimento de veículos na estrada. Apesar destes sensores disporem de uma excelente resolução temporal, estes são geograficamente limitados visto que estão fixos num único local. Adicionalmente, estes apresentam um elevado custo de instalação e manutenção. Estes sensores podem ser divididos em dois grupos: intrusivos e não intrusivos.

- **Sensores intrusivos**

Estes sensores por norma são instalados na superfície das estradas e apresentam elevada precisão. Na Tabela 2 encontram-se descritos três tipos de sensores, estando estes ilustrados na Figura 5.

Sensores	Descrição
Sensores magnéticos passivos	Através da medição de perturbações medidas no campo magnético da Terra, são capazes de detectar veículos. São robustos perante más condições atmosféricas e apresentam grande tolerância ao tráfego.
Tubos pneumáticos	Sentem a alteração da pressão do ar quando um carro passa sobre o tubo. Estes sensores são frágeis e por isso facilmente são danificados por veículos pesados. No entanto, têm baixo custo e instalação e manutenção fáceis.
Laço de indução	São os sensores mais comuns devido ao seu baixo custo e elevada precisão e robustez às condições atmosféricas. Conseguem contar o número de veículos, medir a sua velocidade, ocupação, etc. As suas principais desvantagens são o seu elevado custo de instalação e manutenção e serem facilmente danificados.

Tabela 2: Exemplos de sensores intrusivos

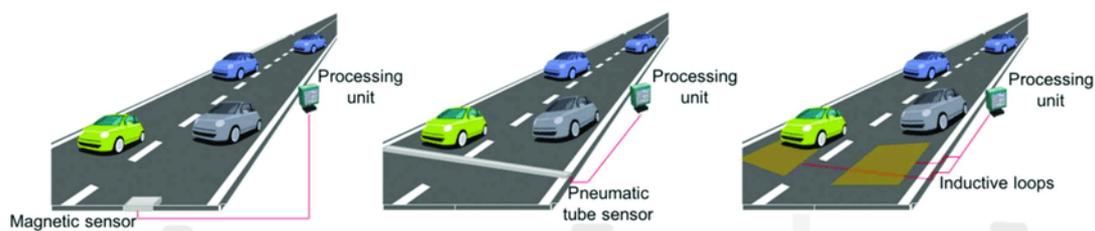


Figura 5: Sensores estacionários intrusivos [19]

- **Sensores não intrusivos**

Estes sensores causam perturbação mínima nas operações normais do tráfego durante a instalação, operação e manutenção. Na Tabela 3 encontram-se descritos três tipos de sensores, estando estes ilustrados na Figura 6.

Sensores	Descrição
Radares de micro-ondas	Permitem detetar veículos em várias vias. Estes transmitem uma baixa radiação de micro-ondas que é refletida por todos os objetos presentes na zona de deteção. As suas desvantagens estão no facto de serem fortemente suscetíveis a interferências eletromagnéticas e não serem capazes de detetar veículos que se encontram abaixo de uma determinada velocidade.
Sensores de laser	São sensores infra-vermelhos que transmitem um feixe de laser e medem o tempo de retorno do sinal refletido. São capazes de detetar a presença do veículo, o seu comprimento, velocidade, etc. Estes sensores podem ser afetados por fatores como pó, neve, sujidade na lente, etc.
Sistemas de vídeo	Estes sistemas incluem câmaras de vídeo, computadores para o processamento de dados e algoritmos para interpretação de imagem de forma a traduzi-las para dados de tráfego. São capazes de monitorizar várias vias simultaneamente. A principal desvantagem é a sua suscetibilidade a más condições atmosféricas.

Tabela 3: Exemplos de sensores não intrusivos



Figura 6: Sensores estacionários não intrusivos [19]

2.5.2.2 Sensores móveis

Sensores móveis, como o nome indica, movem-se ao longo do tráfego, estando, normalmente, instalados nas viaturas, como está ilustrado na Figura 7. Estes sensores focam, essencialmente, na segurança e comodidade dos ocupantes dos veículos e são utilizados em aplicações como assistência de estacionamento, sistemas de navegação, GPS, etc. Em [19], os autores agruparam estes sensores em seis classes:

- **Segurança** – asseguram a segurança dos condutores e passageiros, reconhecem os riscos de acidentes quase em tempo real. Exemplos: sensores de velocidade, radares e sensores de proximidade;
- **Diagnóstico** – recolhem dados sobre o estado do veículo para detetar falhas nos componentes de modo a evitar avarias. Exemplos: sensores de pressão, sensores de Airbag e sensores de temperatura;
- **Tráfego** – utilizados para monitorizar as condições de tráfego em zonas específicas. Exemplos: câmaras, radares e sensores de proximidade;
- **Assistência** – recolhem dados que suportam aplicações que podem ser utilizadas pelos ocupantes da viatura, como aplicações que localizam estacionamento livre ou que apresentam rotas alternativas no caso de elevado tráfego. Exemplos: sensores de posição, sensores de humidade e sensores da composição do gás;
- **Ambiente** – monitorizam as condições ambientais, com o propósito de alertar passageiros e condutores. Exemplos: sensores de pressão, sensores de temperatura e câmaras;

- **Utilizador** – focam na deteção do estado de saúde do condutor e da monitorização do seu comportamento e performance para evitar a ocorrência de acidentes. Exemplos: sensores de eletrocardiogramas (EEG), sensores de frequência cardíaca e termístores.

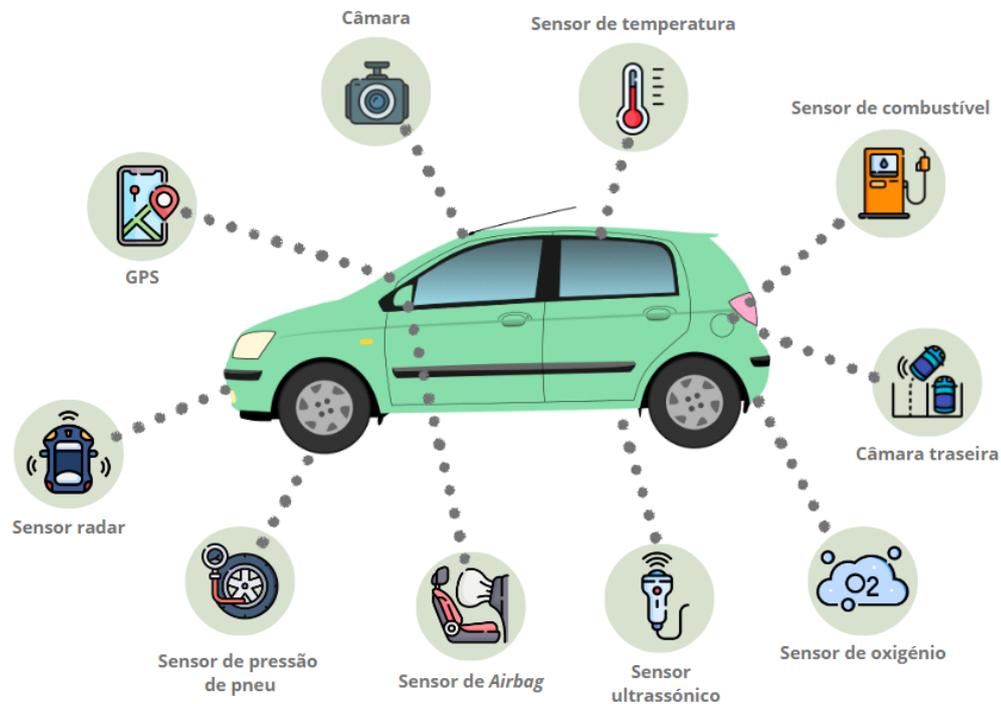


Figura 7: Sensores móveis (Adaptado de [19] e [20]) [7]

2.5.2.3 Internet dos veículos

Após apresentados os sensores mais utilizados nos ITS, é necessário saber como os dados recolhidos por estes podem ser utilizados pelas várias aplicações. Para isso, é imprescindível que exista comunicação entre os vários componentes destes sistemas.

Os autores em [20] identificam vários tipos de comunicação, nomeadamente V2V que se refere à comunicação entre veículos, que lhes permite trocar informações relevantes como velocidade, localização, posição, etc e comunicação V2I, que se trata da comunicação entre veículos e a infraestrutura rodoviária, onde são passadas informações como sinais rodoviários, semáforos, etc.

Desta forma, é possível conectar todos os veículos, passageiros, infraestruturas, pedestres e sensores, de forma a criar o conceito de Internet dos Veículos (*Internet of Vehicles - IoV*), composta por três elementos distintos: rede inter-veicular (V2V e V2I), rede intra-veicular (dentro do próprio veículo) e internet móvel do veículo.

A arquitetura da IoV está dividida em três camadas principais. A primeira foca a gestão de todos os sensores no interior do veículo responsáveis por reunir todos os dados relevantes. A segunda foca o controlo da comunicação V2V, V2I, V2P (Veículo para Pedestre) e V2S (Veículo para Sensor), que fornece conectividade entre todos os componentes da rede. Por fim, a terceira camada gere a inteligência da IoV, fornecendo armazenamento, análise, processamento e realização de decisões com base nos riscos medidos[20] Na Figura 8 estão ilustradas aos tipos de comunicação referidos acima, com o acréscimo de V2R, que se refere à comunicação entre o veículo e a estrada.

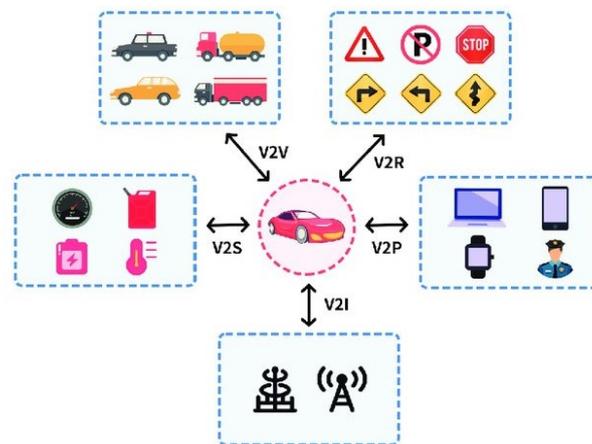


Figura 8: 5 tipos de comunicação IoV [21]

2.6 Comunicação sem fios

Nesta secção vão ser estudados protocolos de comunicação *wireless*, com o objetivo de escolher aquele que mais se adequa para a comunicação entre os sensores e a central de processamento.

2.6.1 WiFi

WiFi trata-se de um dos protocolos mais amplamente conhecidos devido à sua elevada utilização no dia-a-dia da população. Esta trata-se de uma rede sem fios de curto alcance, mas com elevada largura de banda e baixa latência. WiFi teve um impacto enorme na forma como as pessoas se conectam à internet [22], o que emparelhado com o seu baixo custo, o tornou um dos protocolos mais populares até aos dias de hoje.

Deve ser utilizado quando [23]:

- é necessário muita largura de banda ou baixa latência, como por exemplo para comunicação em

tempo real e transmissões de vídeo;

- não é necessário cobrir uma elevada área como por exemplo, casa, negócio, escola, etc;
- se necessita de uma conexão segura;
- se procura uma solução de baixo custo.

2.6.2 LoRaWan

LoRaWan, *Long Range Wide Area Network*, é outro protocolo de comunicação que é maioritariamente utilizado na área de IoT [24], nomeadamente na conexão de redes de sensores. Como o próprio nome infere, uma das suas principais características é o seu longo alcance, acompanhado do baixo consumo energético. No entanto, este não se foca na rapidez de entrega dos dados, tendo por isso baixa largura de banda, o que pode ser visto como uma desvantagem [25].

Deve ser utilizado quando:

- se necessita de baixo consumo energético;
- se necessita de cobrir uma elevada área;
- não é muito importante ter uma conexão muito rápida;
- os dados a transmitir não são muito grandes.

2.6.3 Tecnologias móveis

As tecnologias móveis (celulares) têm vários protocolos. Como o nome indica, esta tecnologia é utilizada sobretudo para conectar dispositivos móveis como telemóveis [25]. Este protocolo, em semelhança do LoRaWan apresenta grande alcance e baixo consumo energético, apesar do presente apresentar um consumo superior ao do LoRaWan. No entanto este tem um limite máximo de dados consoante o plano fornecido pela empresa de comunicação. Uma grande vantagem deste protocolo que o destaca das outras alternativas é a sua disponibilidade visto que, mesmo no caso de falha local de energia, a conexão estaria assegurada.

Deve ser utilizado quando:

- se necessita de cobrir uma elevada área;
- não é necessária uma grande quantidade de dados;

- não é determinante ter uma conexão muito rápida;
- se necessita de baixo consumo energético.

2.6.4 IEEE 802.15.4

O último protocolo a estudar é o 802.15.4, também conhecido por *Low-Rate Wireless Personal Area Network* (LR-WPAN). As principais características deste protocolo são o seu baixo consumo energético, baixo custo, baixo alcance e baixa largura de banda [26]. É um protocolo muito utilizado para brinquedos com controlo remoto e automatização em casas. Deve ser utilizado quando:

- apenas se necessita de cobrir uma área pequena;
- se procura uma solução de baixo custo;
- se necessita de baixo consumo energético.

2.6.5 Comparação e escolha

Protocolos	Alcance	Consumo energético	Largura de banda	Latência
WiFi	20-150m	2-20W	Até 600Mbps em 2.4/5GHz WiFi 802.11n Até 1.3Gbps em 5GHz WiFi 802.11ac	1-30ms
LoRaWan	5-15km	até 2W	0.3k-27kbps, 463/868MHz	<1s
Cellular	0.8-8km	~ 6W (4G) ~ 12W (5G)	Download: até 1Gbps (4G) Download: até 10Gbps (5G)	200ms (4G) 1ms (5G)
802.15.4	10-20m	<0.5W	250 kbps; 2.4GHz	<4ms

Tabela 4: Comparação de tecnologias de comunicação sem fios

Passando agora à comparação e decisão de qual dos protocolos utilizar na comunicação entre os sensores e a central de processamento, para a qual se pode recorrer à Tabela 4, visto que as tecnologias

móveis são utilizadas maioritariamente para dispositivos móveis, deixa de fazer sentido serem utilizadas no sistema em questão. De forma semelhante, como o 802.15.4 tem um alcance significativamente mais baixo quando comparado com as outras opções, também deixa de ser uma opção viável para o sistema que se pretende desenvolver.

Neste sistema de monitorização do estado do pavimento e de tráfego, são principalmente importantes 2 aspetos: o grande alcance, visto que os sensores vão estar localizados em autocarros que estarão em circulação pela cidade, e o seu baixo consumo energético visto que não haverá uma fonte de energia contínua. Estes dois requisitos acabam por beneficiar a escolha da LoraWan.

Complementarmente, segundo o estudo desenvolvido em [27], apesar da sua baixa largura de banda, para longas distâncias verificou-se que LoRaWan apresenta menor latência e consome bastante menos energia do que quando comparado com WiFi, o que ainda consolida mais a escolha de LoRaWan para o sistema a desenvolver.

2.7 Principais desafios

Neste trabalho, como já foi referido, pretende-se, com base na utilização de acelerómetros, desenvolver um sistema de monitorização de congestão e de estado nas vias. A utilização destes sensores em sistemas desta complexidade, torna inevitável que surjam problemas capazes de comprometer a integridade de todo o sistema. Por esta razão, torna-se relevante refletir sobre estes de forma a tentar minimizar o seu efeito.

Os autores de [13], cujo projeto se assemelha ao que se pretende realizar nesta dissertação, identificaram ao longo do seu estudo vários dos problemas provenientes da utilização de acelerómetros instalados em automóveis. Em primeiro lugar salientaram o elevado custo de adquirir uma extensa rede composta por estes sensores e por essa razão seria irreal pretender instalar um sensor por autocarro. Numa fase inicial deste projeto, como, individualmente, os acelerómetros são financeiramente acessíveis, considera-se que seria suficiente ter sensores apenas nos autocarros com rotas mais abrangentes e cujo percurso englobe as zonas que se consideram mais importantes de monitorizar. Adicionalmente verificaram que fatores como o sistema de suspensão, o tamanho dos pneus, representados na figura 9, e a distribuição do peso no veículo têm influência nas leituras realizadas pelos acelerómetros. Para minimizar o impacto que os dois primeiros têm, devem ser escolhidos autocarros que tenham estas componentes semelhantes e até iguais se possível. Já relativamente ao peso, como um autocarro circula com um número imprevisível de passageiros, não há forma de conseguir controlar este fator.

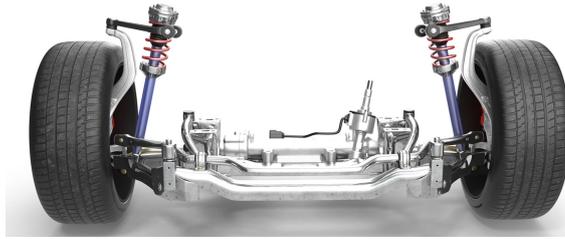


Figura 9: Pneus e sistemas de suspensão [28]

Outra adversidade que pode ser encontrada está relacionada com o comportamento do motorista. Por norma, os condutores têm tendência a tentar evitar as zonas das estradas em piores condições [13], por essa razão, estradas em más condições podem não ser identificadas como tal.

Outros fatores que são importantes ter em consideração aquando da utilização destes sensores são o facto destes serem limitados em termos de memória, por isso possivelmente teria de ser utilizado um sistema de armazenamento adicional e não serem capazes de fazer comunicação dos dados recolhidos, sendo por isso necessário acrescentar um intermediário que funcione como um *proxy*, fazendo a conexão entre o sensor e a central de processamento. Por fim, outro percalço que pode surgir é a necessidade de arranjar valores base que servirão de referência para fazer as predições. Estes aspetos vão ser abordados em maior detalhe na Secção 3.1.

2.8 Ferramenta de simulação

Como já foi referido anteriormente, neste projeto pretende-se explorar uma rede de transportes públicos para recolher e reportar dados sensoriais. Para esse efeito, vai ser utilizada a ferramenta de simulação CupCarbon, que se trata de uma ferramenta *open source*, desenvolvida para ser utilizada no contexto das Cidades Inteligentes e IoT. Esta é considerada uma das ferramentas mais importantes nestas áreas de estudo, visto que permite desenvolver, visualizar e validar algoritmos de monitorização [29].

O CupCarbon proporciona dois ambientes de simulação [29]:

- o primeiro permite construir cenários de mobilidade e geração de eventos naturais, assim como a simulação de veículos e objetos voadores;
- o segundo representa a simulação de eventos numa rede de sensores sem fios, tendo em conta o cenário do primeiro ambiente.

Esta ferramenta oferece uma interface bastante intuitiva, recorrendo a OSM (*OpenStreetMap*) que permite "instalar" os sensores diretamente no mapa, formando redes de sensores, capazes de intercomunicar,

como ilustrado na Figura 10. Este é um dos pontos importantes desta ferramenta visto que vai possibilitar simular as rotas dos autocarros da cidade em estudo e colocar sensores ao longo da mesma.

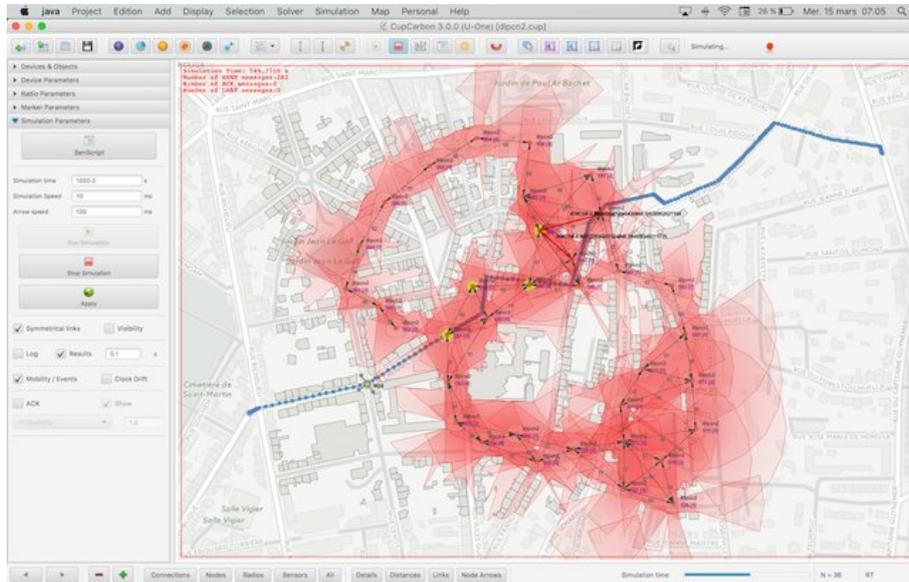


Figura 10: Exemplo de uma rede de sensores implementada no CupCarbon [30]

No que se refere aos sensores, é possível programar cada um dos sensores da rede individualmente, através de *scripts*, que utilizam a linguagem de programação *SenScript*. Desta forma, é possível definir uma rede de sensores em que todos eles comunicam entre si, mas em que cada um deles têm um comportamento próprio.

Por último, outra funcionalidade que vale a pena salientar é a ferramenta permitir fazer a exportação e armazenamento dos resultados num ficheiro CSV.

2.9 Resumo do capítulo

Este capítulo iniciou com uma breve introdução a conceitos como Internet of Things, *Smart Cities* e *Smart Transportation*. Em seguida, foi realizado um levantamento e estudo de trabalhos relacionados com o tema desta dissertação, com o principal objetivo de identificar algumas tecnologias e problemas que destas advêm. Após isto, foram estudadas as principais tecnologias utilizadas nestes sistemas de monitorização, focando sobretudo nos sensores. Com este estudo, conclui-se que os sensores estão divididos em duas classes, sensores estacionários, que têm uma localização fixa, e sensores móveis que se deslocam ao longo do tráfego.

Foram ainda também estudados alguns protocolos de comunicação *wireless* como WiFi e LoRaWan,

culminando numa escolha informada de qual deles seria mais apropriado para utilizar na comunicação entre sensores e a central de processamento. Seguidamente, foram expostos os principais desafios que se foram recolhendo ao longo deste estudo, assim como uma possível primeira abordagem de como lidar com estes.

Para concluir este capítulo, foi apresentada a ferramenta de simulação que se prevê utilizar nas próximas fases do projeto.

Parte II

Core da Dissertação

Capítulo 3

Abordagem ao problema

Antes de avançar para a implementação da simulação do sistema de monitorização, é pertinente refletir sobre qual vai ser a abordagem ao problema e definir o primeiro esboço do sistema final, tendo por base a revisão bibliográfica realizada no Capítulo [Estado da arte](#). Para tal, este capítulo inicia com a reflexão sobre os principais desafios a serem ultrapassados, o ambiente de simulação e o seu funcionamento básico. Em seguida, proceder-se-á ao levantamento dos principais requisitos de infra-estrutura, funcionais e não funcionais, bem como a definição de modelos que traduzam o funcionamento do sistema.

3.1 Desafios e soluções propostas

Neste trabalho, após o que foi estudado no capítulo anterior, optou-se por associar sensores de aceleração a sensores de GPS para a recolha dos dados principalmente devido às seguintes razões:

- custo relativamente baixo quando comparado com o de outros sensores;
- outros estudos terem explorado e validado a viabilidade da utilização destes sensores em projetos da mesma área e com objetivos semelhantes;
- dados gerados requererem menor poder de processamento;
- devido à necessidade de relacionar as vibrações recolhidas pelos acelerómetros com o local de recolha.

Na Secção [2.7](#) foram referidos os desafios com os quais nos podemos deparar durante o desenvolvimento deste sistema. Fatores como o sistema de suspensão e o tamanho dos pneus influenciam os valores medidos pelos sensores, devendo por isso ser controlados, de forma a que os autocarros onde os sensores estejam instalados apresentem estes componentes o mais semelhantes possíveis.

De forma a poder desenvolver a simulação recorrendo ao CupCarbon, torna-se imprescindível recolher valores de referência da aceleração medida por acelerómetros instalados em veículos. Para este fim, estes valores devem ser recolhidos num ambiente controlado e com a rota conhecida, para que seja possível associar os valores a eventos como a passagem do veículo sobre uma depressão ou numa zona com tráfego.

Adicionalmente, o comportamento do motorista também foi identificado como um fator influenciador dos resultados obtidos. Posto isto, torna-se importante ter este aspeto em mente aquando do processamento dos dados, eliminando para isso *outliers* que se verifiquem para não levar o utilizador do sistema em erro.

3.2 Utilizadores do sistema

O público alvo do sistema serão as câmaras municipais, redes de transportes urbanos e quaisquer empresa ou instituição que possam usufruir da informação que o sistema recolhe. É esperado que sistema que se pretende implementar seja capaz de dar informação relativa a vários parâmetros como:

- tempo de atraso dos autocarros;
- tempo médio que a viagem demorará até ao destino final;
- condições do estado do pavimento;
- níveis de tráfego em tempo real para uma determinada rota.

Sendo assim, qualquer entidade que tenha interesse ou necessidade de obter estas informações poderá recorrer a este sistema para tal. Adicionalmente, o sistema também poderá ser disponibilizado para a população das cidades, para que os seus habitantes possam consultar a informação disponibilizada.

3.3 Ambiente de implementação e situação atual

O sistema que se pretende implementar terá em consideração as ruas de Braga, embora possa ser facilmente adaptado a outras cidades. Desta forma, serão utilizadas algumas rotas pré-definidas da rede de Transportes Urbanos de Braga (TUB) para simular o trajeto dos autocarros. Todas as componentes do sistema deverão respeitar rigorosamente os requisitos expostos em [Requisitos funcionais](#).

Recentemente, tem-se verificado um agravamento acentuado do estado do pavimento das estradas de Braga, tendo mesmo já causado pequenos acidentes [31] e danificado várias viaturas [32]. Estes

problemas enfatizam a importância que os sistemas de monitorização do estado de pavimento tem nas cidades. Com estes sistemas, as entidades responsáveis pela gestão das vias e segurança rodoviária, como as câmaras municipais, podem averiguar quais as estradas que necessitam mais urgentemente de restauração.

Outro problema que se tem vindo a exacerbar em Braga é o congestionamento das vias rodoviárias. Segundo [33], Braga é a terceira cidade portuguesa que apresenta maiores níveis de trânsito, estando previsto que os seus habitantes percam cerca de 89 horas por ano no trânsito [34]. Com o sistema que se pretende desenvolver, passa a ser possível recolher e processar, em tempo real, a informação relativa ao nível de congestionamento das estradas compreendidas nas rotas dos autocarros.

3.4 Factos e pressupostos

Nesta secção serão expostos os factos mais significativos do sistema a desenvolver, assim como os pressupostos que se deve ter em consideração aquando do levantamento de requisitos.

3.4.1 Factos

- Os sensores de aceleração e GPS estarão instalados no interior de autocarros que percorram rotas que se pretendam monitorizar.
- Os dados recolhidos pelos sensores são enviados para a central de processamento que posteriormente disponibiliza a informação de forma organizada na aplicação *web*.

3.4.2 Pressupostos

- As cidades nas quais este sistema for implementado dispõem de uma rede de transportes públicos com rotas pré-definidas e conhecidas.
- Os autocarros serão equipados com sensores de aceleração e GPS com capacidade de comunicação via LoRaWan.
- As cidades em que o sistema for instalado dispõem de redes LoRaWan que abranjam as rotas que se pretendem monitorizar.
- As cidades possuem um servidor central capaz de realizar o processamento e análise dos dados recolhidos pelos sensores.

- As entidades que usufruírem do sistema dispõe de uma base de dados onde os dados possam ser armazenados.
- Será mantida pelo menos uma cópia da base de dados.

3.5 Modelo de domínio

De modo a ser possível apresentar o funcionamento básico do sistema foi desenvolvido o modelo de domínio que representasse as suas entidades e as relações entre estas.

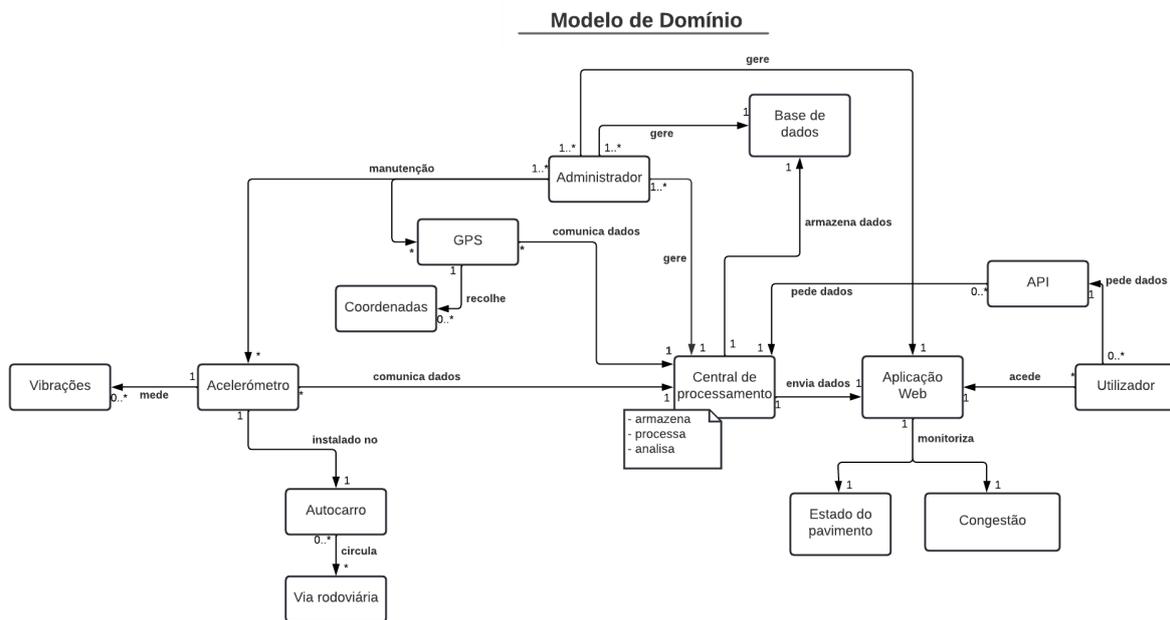


Figura 11: Modelo de domínio

Passando à análise da Figura 11, existe um acelerómetro, responsável por medir as vibrações, que se encontra instalado num determinado autocarro que circula nas vias rodoviárias de uma cidade. As vibrações recolhidas pela acelerómetro são enviadas, em tempo real, para a central de processamento. De forma semelhante, também existe um sensor GPS, responsável por recolher e enviar à central de processamento as coordenadas em que as vibrações são sentidas.

Uma vez na central de processamento, os dados irão ser processados, analisados e armazenados numa base de dados, para que logo a seguir sejam enviados para a aplicação web, disponibilizando toda a informação recolhida aos utilizadores. De forma complementar, os dados passam a estar também disponíveis numa API para os utilizadores que pretenderem fazer pedidos à mesma.

Desta forma, a aplicação disponibiliza os dados necessários para que seja feita a monitorização tanto do estado do pavimento, como da congestão das vias, cujos exemplos se encontram ilustrados nas Figuras 12 e 13, respetivamente.



(a) Pavimento em mau estado [35]



(b) Pavimento em bom estado [36]

Figura 12: Exemplo de estados do pavimento.



Figura 13: Via congestionada [37]

3.6 Fluxo sistema

Com a finalidade de complementar o modelo de domínio, foi também desenvolvido um diagrama para representar o fluxo dos dados no sistema.

Examinando o diagrama exposto na Figura 14, verifica-se que só começa a haver recolha de dados quando o autocarro entra em andamento. Mal isto aconteça, os sensores de aceleração e GPS iniciam a recolha de dados, sendo estes transmitidos em tempo real para a central de processamento via LoRaWan. Uma vez na central, como já referido, os dados irão ser processados, com o objetivo de facilitar a sua análise e compreensão por parte dos utilizadores.



Figura 14: Diagrama de fluxo

3.7 Requisitos de Infra-estrutura

Em seguida, vão ser apresentados os requisitos de infra-estrutura, que identificam as restrições associadas ao correto funcionamento do sistema. Para cada um deles, será apresentada uma descrição e o motivo para o mesmo existir.

Descrição: O sistema deverá utilizar acelerómetros instalados no interior de autocarros.

Motivo: A recolha dos dados deve ser realizada num ambiente minimamente controlado e desta forma também utiliza um recurso já pre-existente em qualquer cidade.

Descrição: Os sensores utilizados devem ter capacidade de comunicação via LoRaWan.

Motivo: Por razões já expostas na Secção 2.6.5, optou-se por utilizar o protocolo LoRaWan para a comunicação entre os sensores e a central de processamento.

Descrição: Os autocarros nos quais estiverem instalados os sensores devem possuir sistemas de suspensão e pneus de tamanho semelhante.

Motivo: Como estudado na Secção 2.7 um dos fatores que pode influenciar os valores recolhidos pelos sensores de aceleração são os sistemas de suspensão e o tamanho dos pneus. Ao tentar uniformizar estas componentes dos veículos pretende-se que o seu impacto seja minimizado.

Descrição: O sistema deverá fazer a recolha e o envio dos dados para as centrais de processamento em tempo real.

Motivo: Um dos requisitos mais importantes para atingir os objetivos deste projeto trata-se de disponibilizar as informações em tempo real aos utilizadores.

Descrição: A central deve processar e analisar os dados em tempo real, assim como armazená-los na base de dados.

Motivo: Novamente, para respeitar o requisitos de disponibilizar os dados em tempo real, é necessário que a central de processamento seja capaz de processar e armazenar os dados em tempo real

Descrição: Cada sensor deve estar bem identificado e associado a uma rota.

Motivo: Desta forma, é possível associar um sensor e os dados que este recolheu a uma rota específica. Sem isto, apesar desta conexão ser possível a partir da junção das coordenadas GPS recolhidas ao longo de cada rota, era necessário mais tempo de processamento para o fazer e não seria possível distinguir sensores que pertencessem à mesma rota.

Descrição: Os administradores são responsáveis pela gestão e manutenção do sistema.

Motivo: É necessário garantir o funcionamento contínuo do sistema, para isso, é necessária a manutenção e gestão de todas as componentes, tanto dos acelerómetros instalados nos autocarros como da aplicação *web*.

3.8 Requisitos funcionais

Com o objetivo de identificar as funcionalidades do sistema que se pretende desenvolver, procedeu-se ao levantamento dos requisitos funcionais do mesmo.

Para definir cada um dos requisitos levantados utilizou-se um formato que compreende: um identificador numérico, descrição, finalidade e uma pós-condição que verifica a implementação do requisito em questão.

Requisito 1

Descrição: Os utilizadores devem registar-se no sistema.

Finalidade: Obter acesso à aplicação e permitir ao sistema distinguir e manter registo das atividades de cada utilizador.

Pós-condição: Os utilizadores realizam o registo na aplicação e o sistema armazena as informações relativas a cada um dos utilizadores.

Requisito 2

Descrição: Um utilizador deve autenticar-se.

Finalidade: Permitir ao utilizador aceder às informações disponíveis na aplicação.

Pós-condição: Após a autenticação, o utilizador passa a ter acesso a todas as informações disponibilizadas na aplicação.

Requisito 3

Descrição: Os utilizadores podem aceder ao *dashboard* da página inicial.

Finalidade: Obter acesso às informações gerais apresentadas no *dashboard*.

Pós-condição: O utilizador tem acesso à informação presente no *dashboard*.

Requisito 4

Descrição: Os utilizadores devem conseguir aceder à listagem da condição de pavimento.

Finalidade: Conseguir consultar a listagem relativa ao estado de conservação das várias rotas disponibilizadas.

Pós-condição: O utilizador consulta a listagem.

Requisito 5

Descrição: Os utilizadores devem conseguir aceder à listagem de fluxo de tráfego.

Finalidade: Conseguir consultar a listagem relativa ao tráfego existente nas várias rotas disponibilizadas.

Pós-condição: O utilizador consulta a listagem.

Requisito 6

Descrição: Os utilizadores devem ser capazes de filtrar as listagens por classificação.

Finalidade: Simplificar a consulta da tabela, eliminando informação desnecessária.

Pós-condição: Só é apresentada informação que o utilizador necessita.

Requisito 6

Descrição: Os utilizadores devem ser capazes de ordenar as listagens.

Finalidade: Simplificar a consulta da tabela, fazendo a sua ordenação consoante a preferência do utilizador.

Pós-condição: A tabela encontra-se ordenada segundo a opção escolhida pelo utilizador.

Requisito 7

Descrição: Os utilizadores devem ser capazes de consultar uma rota.

Finalidade: Permitir o acesso às informações relativas à rota selecionada, eliminando qualquer tipo de informação desnecessária relativa a outras rotas.

Pós-condição: O utilizador consulta a rota.

Requisito 8

Descrição: Os utilizadores registados podem fazer pedidos de dados à API, para uma rota específica ou todas.

Finalidade: Disponibilizar as informações fora da aplicação *web*.

Pós-condição: Os utilizadores registados podem obter informações sobre as rotas realizando um pedido à API disponibilizada.

3.9 Requisitos não funcionais

Prosseguindo para os requisitos não funcionais, estes são responsáveis por definir a qualidade do sistema, impondo restrições sobre o mesmo de forma a assegurar que o sistema responde as necessidades dos utilizadores. Estes requisitos podem ser divididos em várias categorias apresentadas em seguida.

Aparência

Os requisitos de aparência ditam o aspeto e estética do sistema.

- A aplicação web deverá ter uma interface intuitiva, que permita o utilizador navegar na aplicação de forma natural.
- A aplicação deverá utilizar cores como vermelho para representar as situações desfavoráveis como piso em mau estado e elevado fluxo rodoviário.
- A aplicação deverá permitir visualizar através de imagens as várias rotas disponíveis.
- O sistema deverá ser responsivo, adaptando a sua apresentação dependendo do dispositivo utilizado.

Usabilidade

Este grupo de requisitos não funcionais dizem respeito à facilidade de utilização do sistema de forma a garantir que o sistema seja *user friendly*.

- Na primeira utilização da aplicação 90% dos utilizadores deverão conseguir consultar a informação relativa a uma rota.
- A aplicação *web* deverá ser intuitiva e fácil de perceber para qualquer pessoa independentemente da faixa etária e/ou nível de alfabetização.

Desempenho

Estes requisitos estão relacionados com aspetos de velocidade de acesso, latência, entrega em tempo real, etc, de forma a atingir o desempenho esperado.

- A API deve suportar vários pedidos realizados em simultâneo.
- A transmissão dos dados dos sensores para a base de dados deve ser feita em tempo real, aquando da recolha dos mesmos.

Operacional

Estes requisitos garantem que existem as condições necessárias para o correto funcionamento do sistema.

- Os dados devem estar armazenados de forma persistente numa base de dados, evitando assim a necessidade de armazenamento a nível dos sensores e a constante comunicação com os mesmos.
- Os sensores são responsáveis por medir as vibrações sentidas no interior dos autocarros e enviar os dados para a respetiva central de processamento.
- A central de processamento deverá enviar os dados tratados para a aplicação *web*.

Manutenção e suporte

Num sistema como estes, que recorra a sensores, torna-se extremamente importante a manutenção dos mesmos. Os requisitos de manutenção como o nome indica, garantem a reparação ou o aperfeiçoamento de componentes do sistema.

- Os sensores devem regularmente receber manutenção para evitar a sua falha.

Segurança

Por fim, mas sem desvalorizar a sua importância, os requisitos de segurança têm foco em problemas relacionados com o acesso, proteção e integridade dos dados. Para um sistema destes é imprescindível proteger os seus dados, implementando, para isso, medidas que maximizem a segurança dos mesmos.

- Deve existir uma cópia dos dados para garantir resiliência ao sistema.
- Fazer encriptação dos dados mais importantes como os dados de autenticação.
- Garantir autenticação segura com *two-factor authentication*.
- Prevenção contra ameaças informáticas como *SQL Injections*, tomando as medidas de segurança e proteção devidas.

3.10 Diagrama do sistema

Tendo em consideração todo o estudo que foi feito até ao momento, foi desenhada uma representação gráfica do sistema (ver Figura 15).

Os primeiros intervenientes são os **autocarros** e os **sensores de aceleração e GPS** neles instalados. Os acelerómetros são responsáveis por medir as vibrações sentidas no interior dos autocarros, que juntamente com as coordenadas em que foram recolhidas, são enviados em tempo real para a central de processamento via LoRaWan.

Na **central de processamento** irá proceder-se ao armazenamento, processamento e análise dos dados recebidos, passando estes a estar disponíveis tanto para a aplicação Web como para a API.

Por fim, estão presentes também os **utilizadores** que se encontram registados na aplicação Web. Estes utilizadores podem ser instituições e empresas que usufruem deste sistema, como câmaras municipais, as redes de transportes urbanos de cada cidade, entre outras.

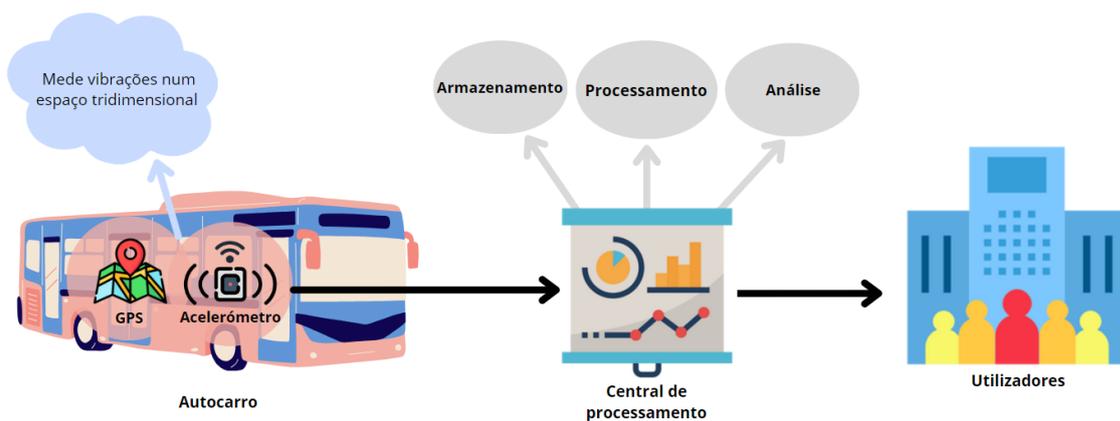


Figura 15: Diagrama representativo do sistema

3.11 Protótipos da interface da aplicação Web

Ainda nesta fase, recorrendo à ferramenta Figma, foram elaborados protótipos, de baixa fidelidade, da interface gráfica da aplicação *web*. Desta forma, passa a existir uma representação visual inicial daquilo que se espera que a aplicação disponibilize aos utilizadores.

Em seguida, encontram-se apresentados os protótipos desenvolvidos. Já o fluxo entre as diferentes

páginas pode ser consultado em [38].

3.11.1 Página inicial

Neste primeiro protótipo, Figura 16 encontra-se a página inicial. Aqui, o utilizador tem uma vista geral das informações disponíveis.



Figura 16: Página inicial

3.11.2 Página de rota

Nesta página, ilustrada na Figura 17, estão disponíveis todos os dados relativos a uma rota específica. Nesta é possível analisar o mapa da rota que contém todas as paragens que a constituem; informações relativas ao tráfego, em que se pode estudar como o tráfego rodoviário varia ao longo do dia e ainda observar as vibrações sentidas no decorrer na rota, passando a obter conhecimento de como se encontra o pavimento da mesma.

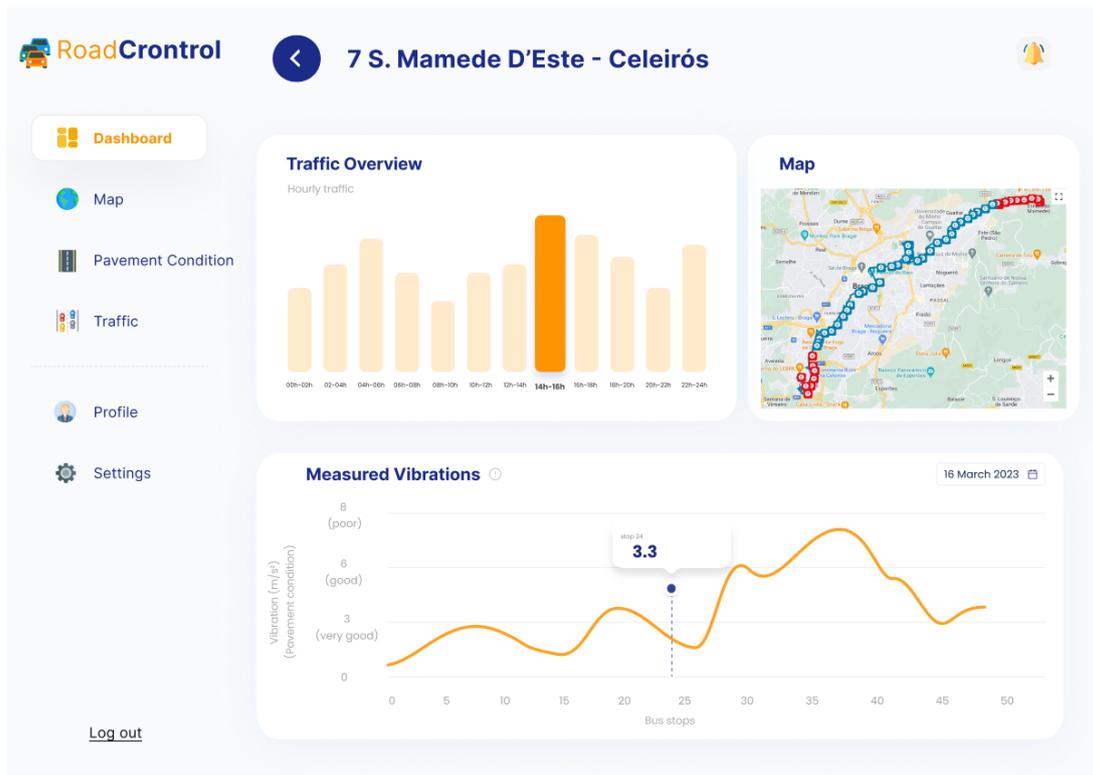


Figura 17: Página de rota

3.11.3 Listagem de condição do pavimento

Passando ao terceiro protótipo, Figura 18, nesta página, como o nome indica, pode ser consultada a listagem completa da condição de pavimento para cada uma das rotas. Havendo ainda a opção de filtrar e/ou ordenar a listagem conforme a preferência do utilizador.

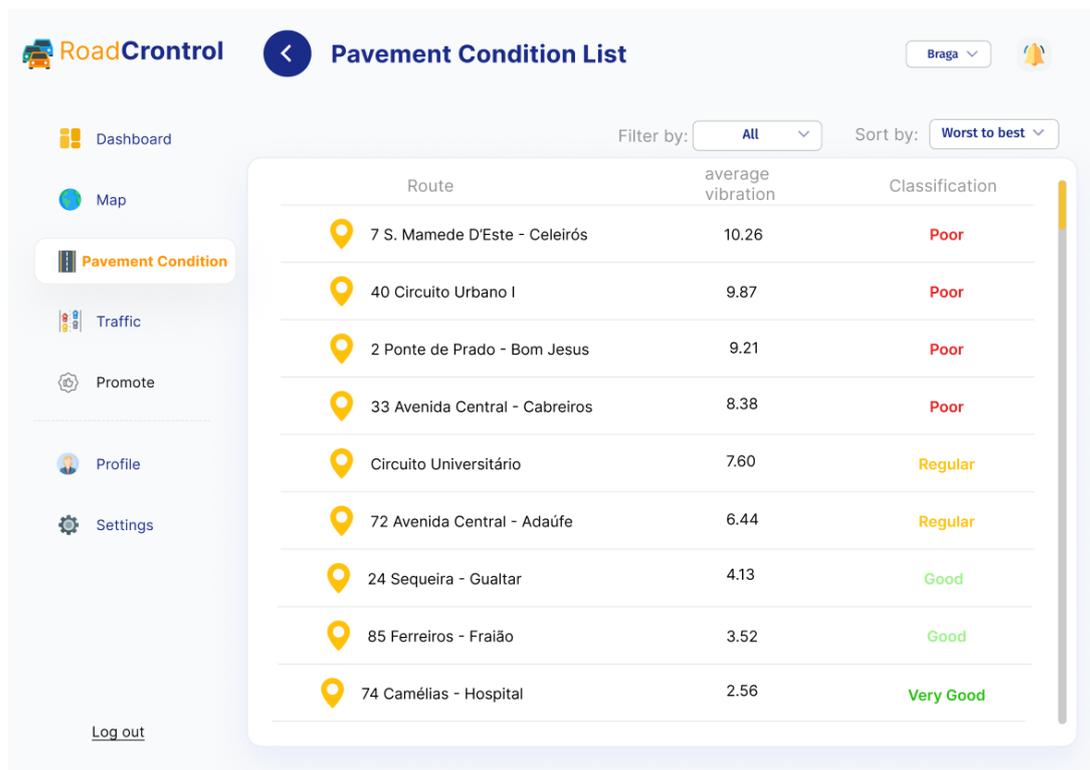


Figura 18: Listagem de condição do pavimento

3.11.4 Listagem de tráfego

Por último, na Figura 19 encontra-se a página de listagem de tráfego que é essencialmente igual à anterior, sendo que esta apresenta informação relativa ao tráfego rodoviário presente em cada uma das rotas.

Route	Classification
7 S. Mamede D'Este - Celeirós	Poor
40 Circuito Urbano I	Poor
2 Ponte de Prado - Bom Jesus	Poor
33 Avenida Central - Cabreiros	Poor
Circuito Universitário	Regular
72 Avenida Central - Adaúfe	Regular
24 Sequeira - Gualtar	Good
85 Ferreiros - Fraião	Very Good
74 Camélias - Hospital	Very Good

Figura 19: Listagem de tráfego

3.12 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram identificados os desafios do sistema e as respetivas abordagens, assim como os seus utilizadores, factos e pressupostos. Em seguida, foram desenvolvidos o modelo de domínio e de fluxo de sistema para facilitar no processo de levantamento de requisitos funcionais e não funcionais. Por fim, foi apresentado um diagrama representativo do sistema, assim como os protótipos da interface da aplicação *web*.

Capítulo 4

Desenvolvimento

Ao longo deste capítulo vai ser abordada a componente prática desta dissertação, começando pela ambientação à ferramenta escolhida, CupCarbon, onde são analisados os vários sensores disponibilizados, evidenciados na Figura 20, assim como a demonstração de como se definem as rotas.

Seguidamente, passar-se-á à implementação onde vão ser definidos os valores de referência para as simulações, desenvolvidos e apresentados os *scripts* utilizados, assim como a implementação das rotas de estudo.

4.1 Ambientação

Como já foi estudado na Secção 2.8, o CupCarbon é uma ferramenta que disponibiliza um conjunto de sensores que permitem desenvolver diversas simulações. Nesta primeira secção são apresentados os sensores disponibilizados, assim como as funcionalidades de cada um deles. Em seguida, será abordado o processo de criação de rotas, que será importante neste trabalho visto que queremos simular rotas de autocarros.

4.1.1 Sensores

Nesta secção será realizada uma breve introdução aos vários sensores disponibilizados pelo CupCarbon. As descrições que vêm abaixo apresentam-se pela ordem que os sensores ocorrem na Figura 20.



Figura 20: Sensores disponíveis no CupCarbon

Sensor node

É o sensor principal do CupCarbon. Este é composto por 3 partes: módulos de radio, responsáveis pela comunicação entre sensores, podendo esta ser IEEE 802.15.4, WiFi ou LoRa, uma unidade de deteção e bateria. Estes sensores podem estar associados a uma rota, tornando-se desta forma sensores móveis.

Sensor direcional

É essencialmente igual ao sensor *node* mas apresenta uma unidade sensorial diferente, na medida em que é direcional.

Estação Base

É exatamente igual ao sensor *node* com a exceção de ter bateria infinita.

Sensor gas

Este sensor serve para simular valores aleatórios ou dentro de um intervalo definido, seguindo uma distribuição Gaussiana, de forma a simular dados que seriam lidos a partir do ambiente.

Clima

Este módulo é utilizado para gerar parâmetros climáticos, principalmente controlar a temperatura.

Sensor móvel

Este tipo de sensores estão associados a uma rota definida a partir de marcadores. Durante a simulação, este sensor vai-se deslocar por todos os marcadores da rota.

Marcadores

Os marcadores podem ser utilizados com múltiplos objetivos como adicionar sensores *node*, gerar rotas e adicionar edifícios.

Cada um dos sensores implementados pode apresentar diferentes funcionalidades, para tal é necessário desenvolver um *script* na linguagem de programação *SenScript*, que reflita o comportamento

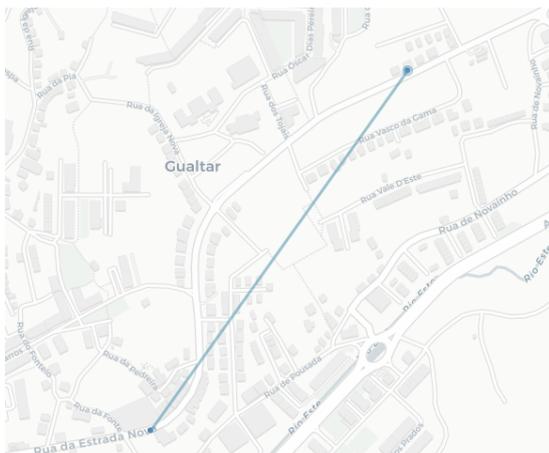
desejado para o sensor. Em seguida, basta associar o *script* ao respetivo sensor.

4.1.2 Criação de rotas

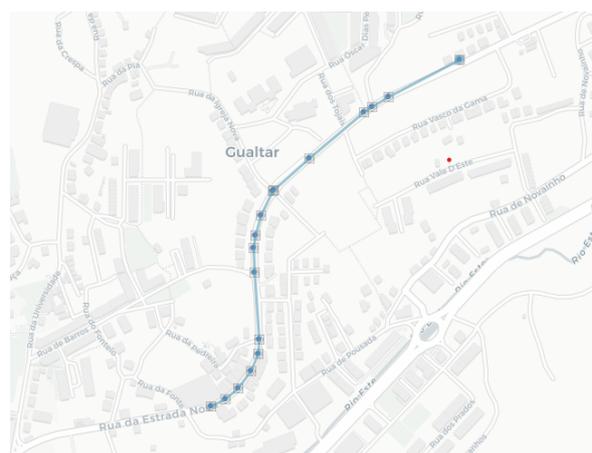
Após a análise do tipo de sensores existentes e feita a ambientação com os mesmos, o passo seguinte é a definição das rotas.

No CupCabon, a criação de rotas é feita recorrendo aos marcadores, sendo necessário definir 2 pontos de referência, a origem da rota e o destino, originando assim uma rota que se traduz numa reta entre os dois pontos (ver Figura 21a). No entanto, esta opção não tem em consideração os edifícios e estradas que existem entre os dois pontos.

Alternativamente, uma rota pode ser também definida utilizando a opção *route from markers* (ver Figura 21b), de a partir dos dois pontos criados vai originar uma rota que respeita as ruas existentes no mapa, permitindo ainda que sejam feitas alterações a essa mesma rota.



(a) Rota automática criada a partir de dois pontos



(b) Rota criada com "Route from markers"

Figura 21: Criação de rotas

Após definida a rota, é necessário criar um nodo móvel, que nesta simulação representará o autocarro, ao qual vai ser associado um ficheiro GPS para guardar a rota que percorre, assim como um sensor para que a comunicação com outros sensores seja possível, como representado na Figura 22.

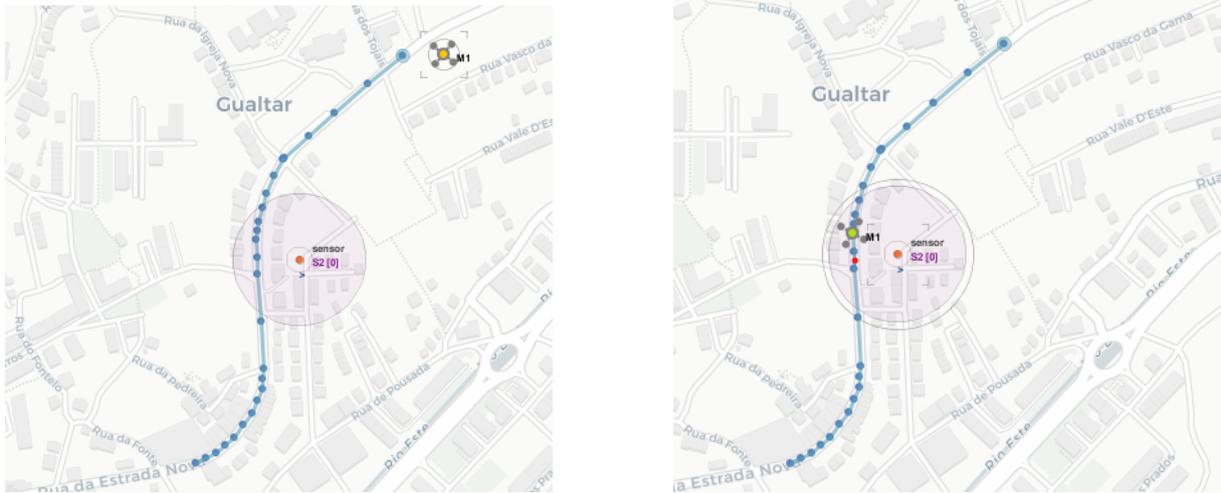


Figura 22: Deslocação do sensor móvel ao longo da rota

4.2 Implementação

Nesta secção vão ser apresentados os valores de referência utilizados nas simulações, os testes realizados em contexto real, as rotas de estudo, assim como os *scripts* desenvolvidos.

4.2.1 Valores de referência

Primeiramente, antes de se iniciar a implementação das simulações, é necessário definir valores de referência para simular os dados recolhidos pelos sensores de aceleração. Para tal, decidiu-se utilizar como base o *International Roughness Index* (IRI), que se trata de um índice vastamente utilizado para qualificar a irregularidade do pavimento das estradas [39]. IRI traduz o movimento vertical que um passageiro sentiria num segmento de um quilometro, sendo muitas vezes expresso em m/km. É ainda importante referir que o valor de IRI é influenciado pela velocidade a que o automóvel se desloca.

Road operating speed (km/h)	Proposed values for IRI (m/km)			
	Very Good	Good	Regular	Bad
100 km/h	< 0.73	0.73 - 1.45	1.45 - 2.07	> 2.07
90 km/h	< 0.78	0.78 - 1.55	1.55 - 2.22	> 2.22
80 km/h	< 1.04	1.04 - 2.09	2.09 - 2.98	> 2.98
70 km/h	< 1.15	1.15 - 2.31	2.31 - 3.29	> 3.29
60 km/h	< 1.54	1.54 - 3.09	3.09 - 4.41	> 4.41
50 km/h	< 2.05	2.05 - 4.1	4.1 - 5.86	> 5.86
40 km/h	< 3.23	3.23 - 6.47	6.47 - 9.24	> 9.24
30 km/h	< 5.1	5.1 - 10.19	10.19 - 14.56	> 14.56

Figura 23: Sugestão dos valores limites do IRI para diferentes velocidades (adaptada de [40])

Na Figura 23 encontra-se ilustrada uma tabela retirada do estudo [40], onde é possível consultar os valores propostos para o IRI para diferentes velocidades. Para simplificar a implementação, vão ser considerados os valores para 50km/h, visto que esse é o limite de velocidade máxima na maioria das estradas por onde os autocarros se deslocam.

Deste modo, as classificações que serão feitas e os respetivos intervalos são:

- Muito bom → <2.05 m/km
- Bom → 2.05 – 4.1 m/km
- Regular → 4.1 – 5.86 m/km
- Mau → > 5.86 m/km

Os valores de referência definidos acima encontram-se na unidade m/km , todavia, os acelerómetros realizam as medições em m/s^2 , existindo assim a necessidade de encontrar uma relação entre os dois.

Em [41] é explorada essa mesma relação, sendo que os autores propuseram a fórmula $IRI = a/b$, na qual a representa a aceleração e b uma constante fixa que depende da velocidade a que o automóvel se encontra. Mais uma vez e de forma a manter coerência com os valores de IRI apresentados anteriormente, será considerada a velocidade de 50km/h, para a qual $b = 0.137$.

$$IRI = a/0.137$$

$$a = 0.137 * IRI$$

Desta forma, convertendo os valores anteriormente listados, os valores de referência para a simulação passam a ser:

- Muito bom $\rightarrow < 0.281 \text{ m/s}^2$
- Bom $\rightarrow 0.281 - 0.562 \text{ m/s}^2$
- Regular $\rightarrow 0.562 - 0.803 \text{ m/s}^2$
- Mau $\rightarrow > 0.803 \text{ m/s}^2$

No entanto, como será referido na Secção 4.2.4, é utilizado o comando *randb* para simular a recolha dos valores pelos sensores de aceleração. Contudo, este comando só é capaz de gerar valores inteiros, pelo que passa a ser necessário adaptar os intervalos acima definidos. Para tal, todos os valores foram normalizados, multiplicando por dez e em seguida arredondados para o respetivo número inteiro.

Como resultado, por fim, os valores de referência a ser utilizados na simulação serão:

- Muito bom $\rightarrow < 3 \text{ m/s}^2$
- Bom $\rightarrow 3 - 6 \text{ m/s}^2$
- Regular $\rightarrow 6 - 8 \text{ m/s}^2$
- Mau $\rightarrow > 8 \text{ m/s}^2$

4.2.2 Teste experimental em contexto real

Com o objetivo de passar este conceito para um contexto real, de forma a comprovar que é plausível induzir o estado do pavimento com base em vibrações medidas no interior de veículos e verificar os valores de referência definidos, foi realizado um teste experimental para cada uma das rotas que vão ser apresentadas na Secção 4.2.3.

Para este propósito, foi utilizada uma aplicação, **Phyphox**, instalada num *smartphone*. Esta trata-se de uma aplicação gratuita, capaz de utilizar vários sensores disponíveis nos telemóveis, como acelerómetro, giroscópio, magnetómetro e GPS, para recolher dados (ver Figura 24). Durante a recolha destes dados, são gerados gráficos intuitivos que permitem visualizar os mesmos de forma imediata e simplificada, como ilustrado nas Figuras 25. Para além disso, os dados recolhidos podem também ser exportados para ficheiros CSV ou XLS para poderem ser analisados com maior pormenor.



Figura 24: Menu inicial da *phyphox* [42]

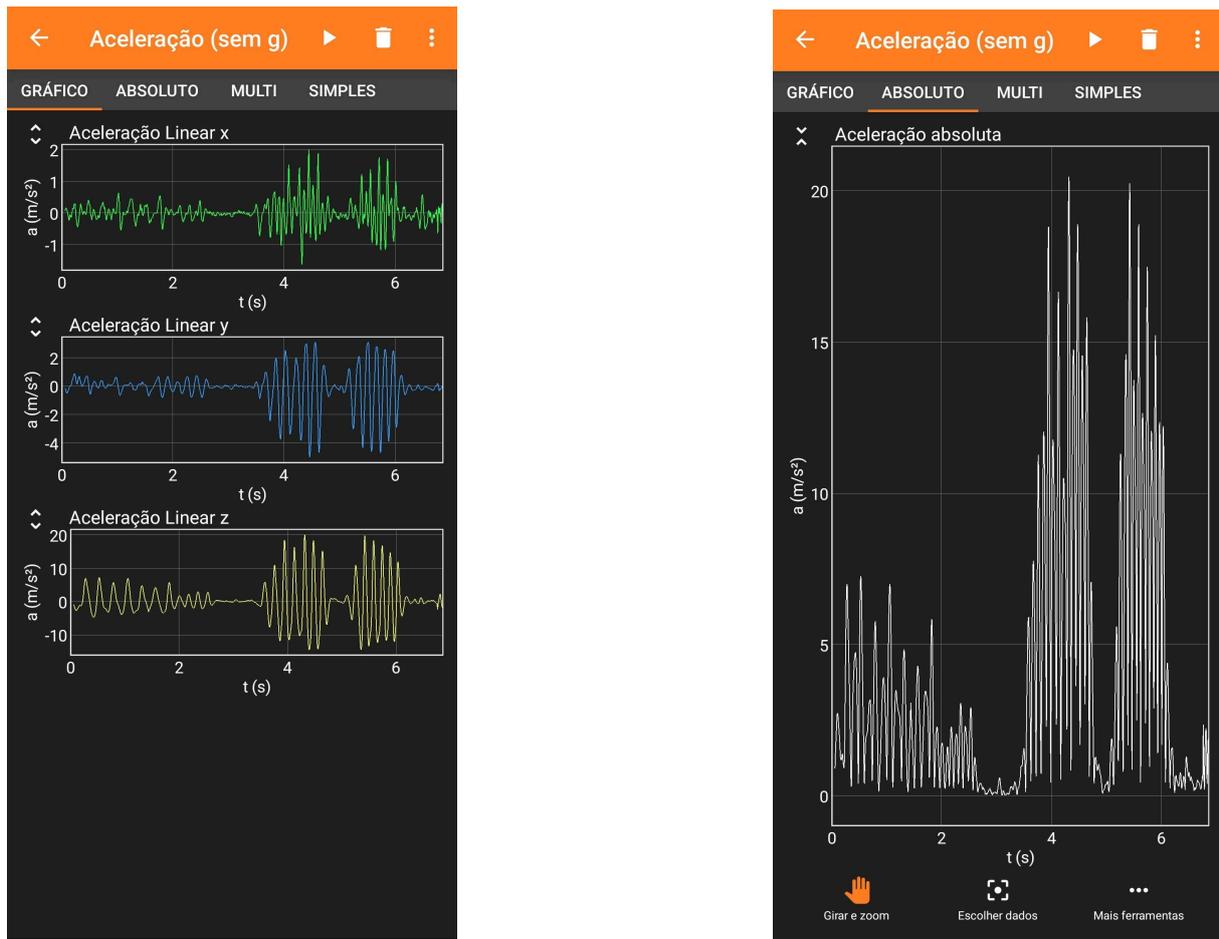
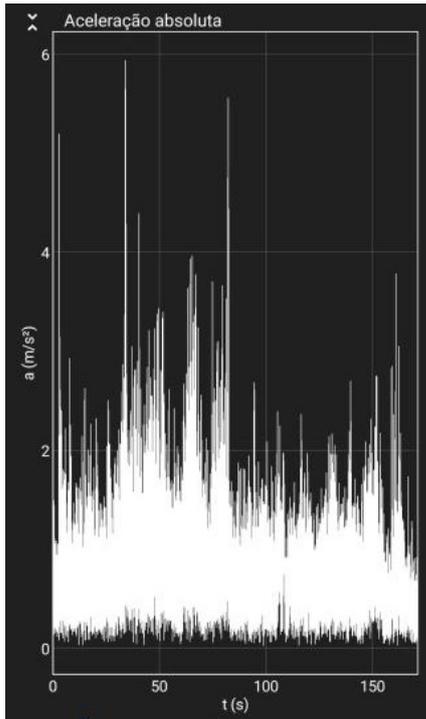


Figura 25: Gráficos gerados pela aplicação *phyphox*

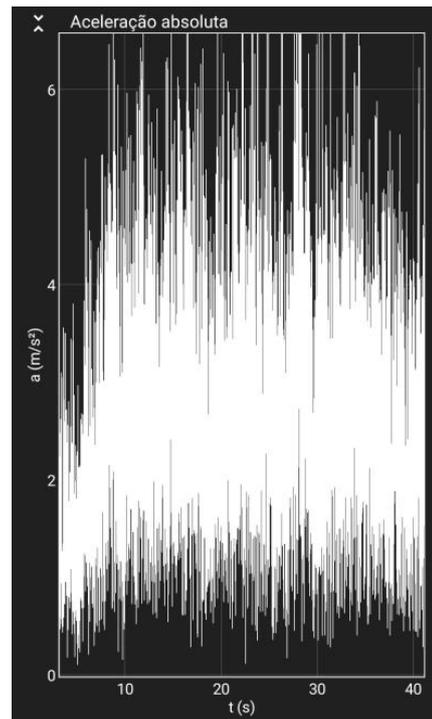
Para cada uma das rotas foi realizado um teste no qual foram recolhidas as vibrações sentidas no interior de um veículo, utilizando um carro pessoal. O teste consistiu em dividir cada uma das rotas em vários troços de estrada e, para cada um destes, fazer uma recolha de dados. Assim, mais tarde, é possível relacionar as vibrações recolhidas à respetiva secção de estrada em que foram capturadas. Desta forma, passou a ser possível, a partir das vibrações recolhidas em cada um dos troços, deduzir o estado do pavimento dos mesmos.

Deste modo, realizando um teste por cada rota, passa-se a ter uma noção do estado do pavimento de cada um dos troços que as compõem. Desta forma, as simulações posteriormente desenvolvidas passam a ser mais próximas da realidade, visto que estamos a usar dados reais como valores de referência e porque possuímos um conhecimento básico acerca do estado dos pavimentos que fazem parte da rota em questão.

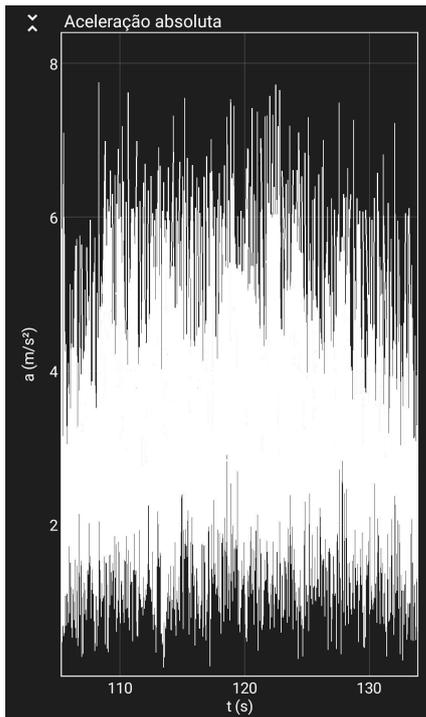
Em seguida, na Figura 26 serão apresentados alguns exemplos de gráficos retirados dos vários testes realizados para cada estado do pavimento possível.



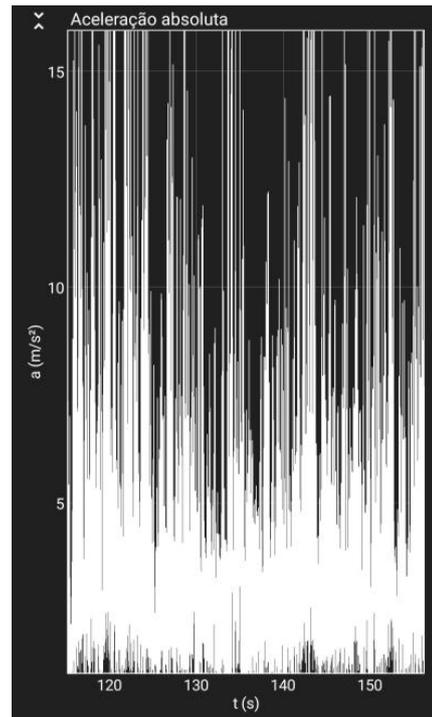
(a) Muito bom estado



(b) Bom estado



(c) Estado regular



(d) Mau estado

Figura 26: Relação entre os gráficos gerados e o estado de pavimento correspondente

4.2.3 Rotas de estudo

Por fim, depois de definidos os valores de referência, procedeu-se à determinação de quais as rotas que vão ser estudadas e analisadas. Como nesta simulação se pretende simular o comportamento de sensores instalados no interior de autocarros, optou-se por considerar apenas rotas que fossem utilizadas pelos Transportes Urbanos de Braga.

Para a criação das rotas no *CupCarbon* foi utilizada a opção de *route from markers*, já apresentada na Secção 4.1.2. Complementarmente, também foram adicionados sensores *node* em todas as paragens de cada rota, assim como entre paragens quando foi considerado pertinente, que serão responsáveis pela geração dos dados.

Em seguida vão ser apresentadas as rotas que vão ser utilizadas nesta implementação.

4.2.3.1 Rota 7 (S. Mamede d'Este - Celeirós)

A primeira rota foi escolhida devido ao facto de ser muito utilizada, visto que abrange um elevado número de freguesias da cidade de Braga, passando inclusive perto da Universidade do Minho, algumas escolas secundárias e no centro da cidade.

Na Figura 27 encontra-se o percurso realizado pelos autocarros que percorrem esta rota. Já na Figura 28 é possível observar a rota gerada no *CupCarbon*, em conjunto com os sensores *node* colocados ao longo da mesma.

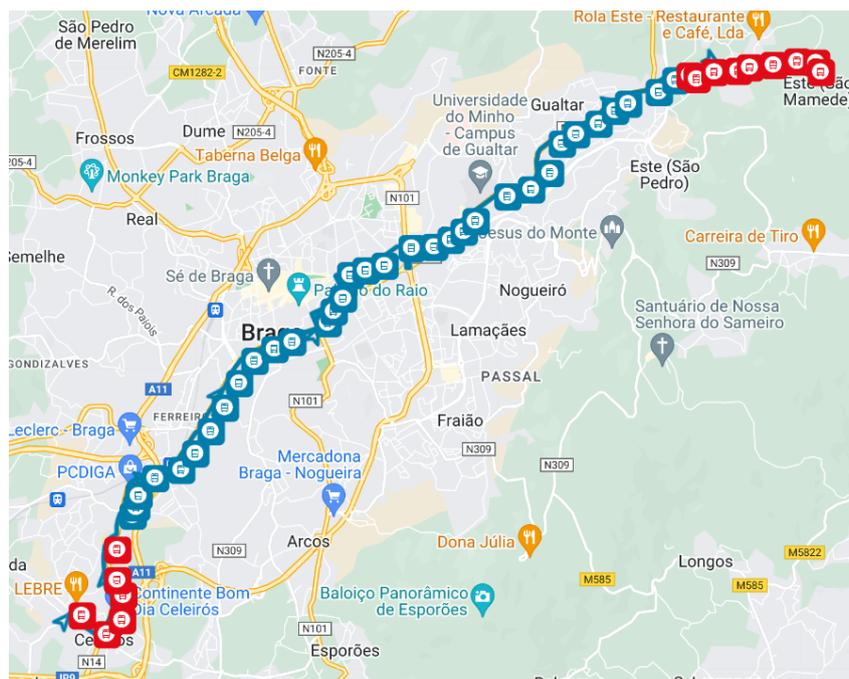


Figura 27: Percurso da rota 7 [42]

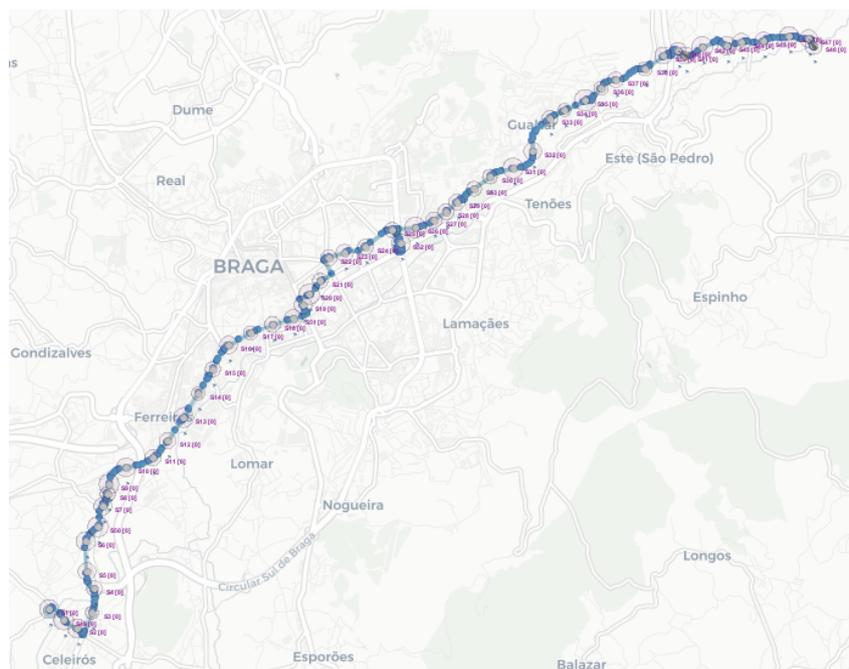


Figura 28: Percurso da rota 7 representada no CupCarbon

Como já referido, para cada uma das rotas foi realizado um teste em contexto real no qual foi possível deduzir o estado de conservação das vias, para cada um dos troços que compõem a rota. A Figura 29 apresenta uma forma simplificada de visualizar os resultados obtidos no teste, na qual se pode verificar, para cada um dos troços, qual o estado do pavimento inferido com base nos dados de vibração recolhidos. Como se pode observar, nesta rota existem todos os tipos de estados de pavimento. Adicionalmente, também é possível analisar como foi feita a divisão da rota em troços, representado a preto, estando estes numerados, para que mais tarde, a análise dos resultados seja mais direta e simplificada.

Para cada umas das outras rotas apresentadas adiante, este procedimento foi repetido.

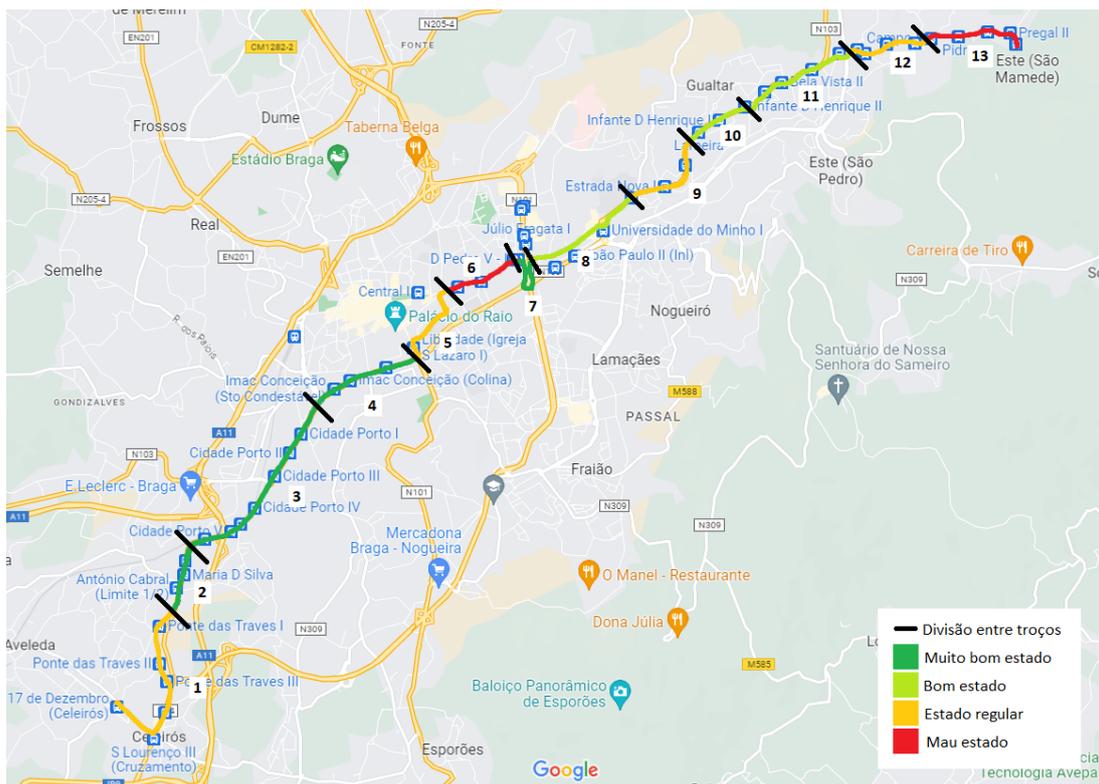


Figura 29: Resultado do teste experimental na rota 7

4.2.3.2 Rota 40 (Circuito Urbano I)

A segunda rota escolhida, conhecida por circuito urbano I, cuja rota se pode observar na Figura 30, trata-se de uma rota que engloba vários pontos de interesse da cidade de Braga como o hospital, universidade, Braga Parque, centro da cidade, o mercado municipal, residências universitárias, entre outros. Por essa mesma razão e devido ao facto de ser uma rota extensa, contendo um total de 46 paragens, esta rota foi uma das seleccionadas para estudada na presente dissertação.

Novamente, esta rota foi também criada no *CupCarbon*, como se pode verificar na Figura 31, e os resultados do teste em contexto real podem ser analisados na Figura 32.

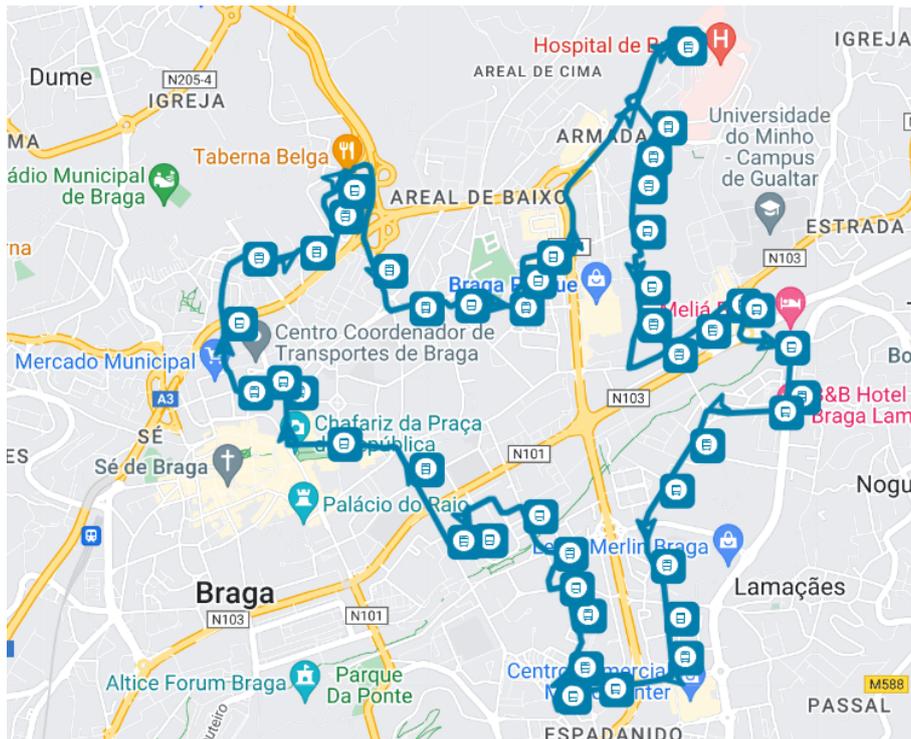


Figura 30: Percurso da rota 40 [43]

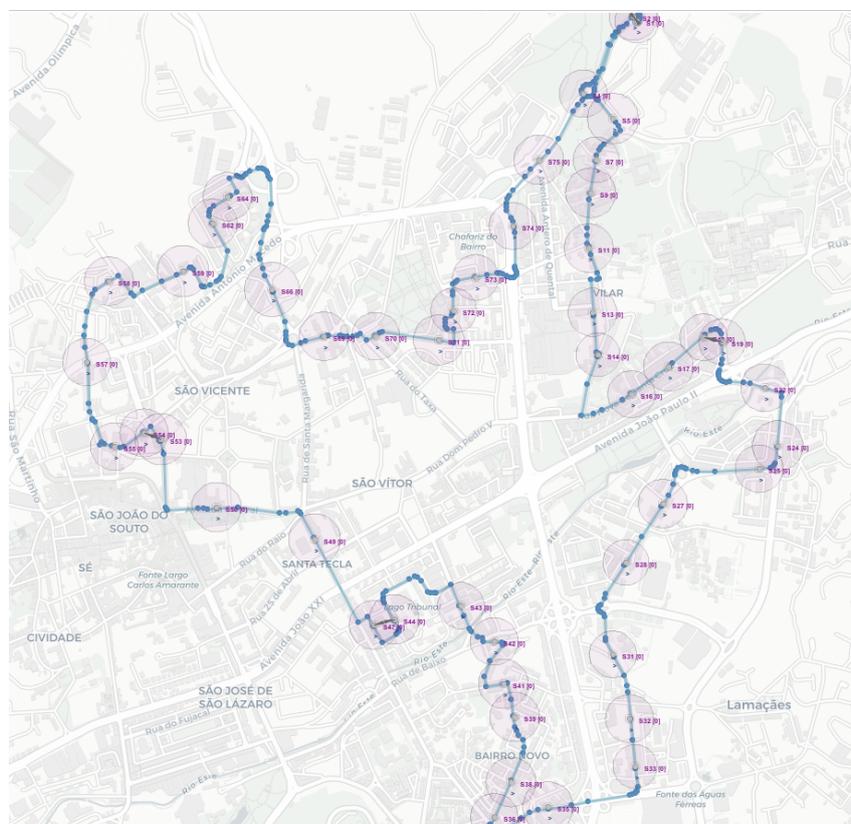


Figura 31: Percurso da rota 40 representada no CupCarbon

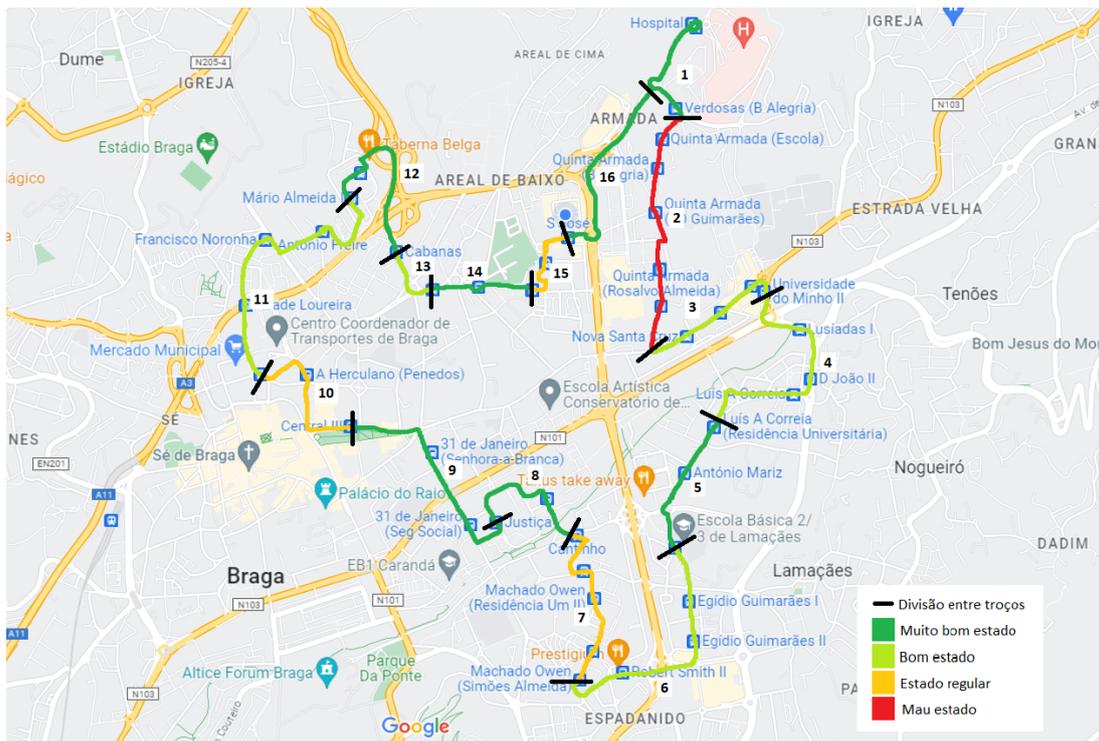


Figura 32: Resultado do teste experimental na rota 40

4.2.3.3 Rota 43 (Universidade do Minho - Estação)

Por fim, a última rota escolhida foi a rota 43, representada na Figura 33 que tem origem na Universidade do Minho e destino na estação de comboios de Braga. Esta rota, apesar de ser uma rota com relativamente poucas paragens, é possivelmente umas das mais utilizadas pelos alunos universitários.

Mais uma vez, na Figura 34 pode observar-se a rota que foi criada no *CupCarbon* e na Figura 35 os resultados obtidos a partir do teste experimental.

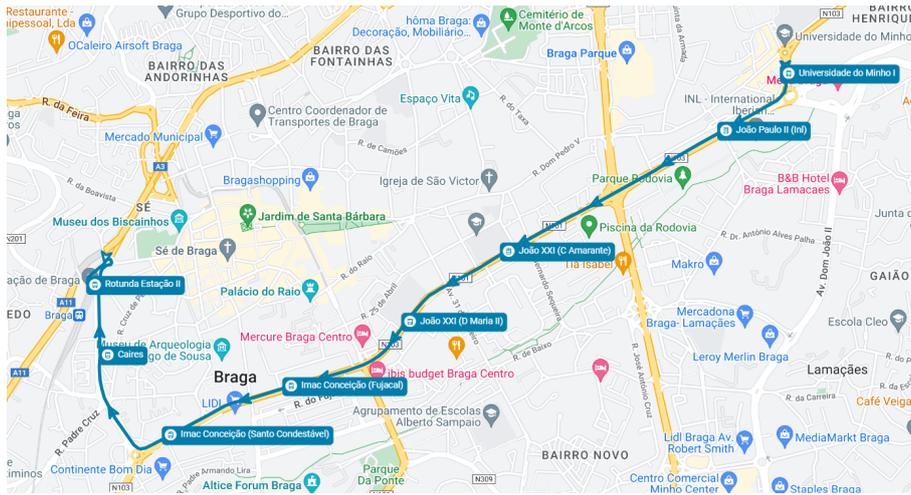


Figura 33: Percurso da rota 43 [44]

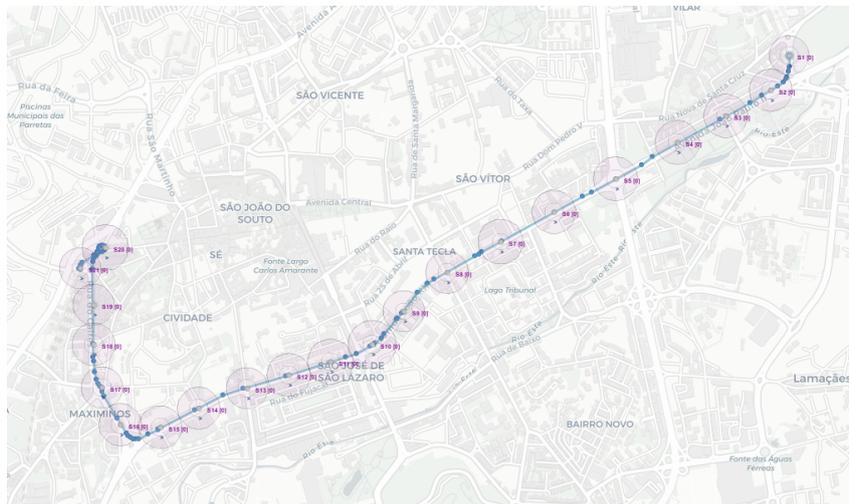


Figura 34: Percurso da rota 43 representada no CupCarbon

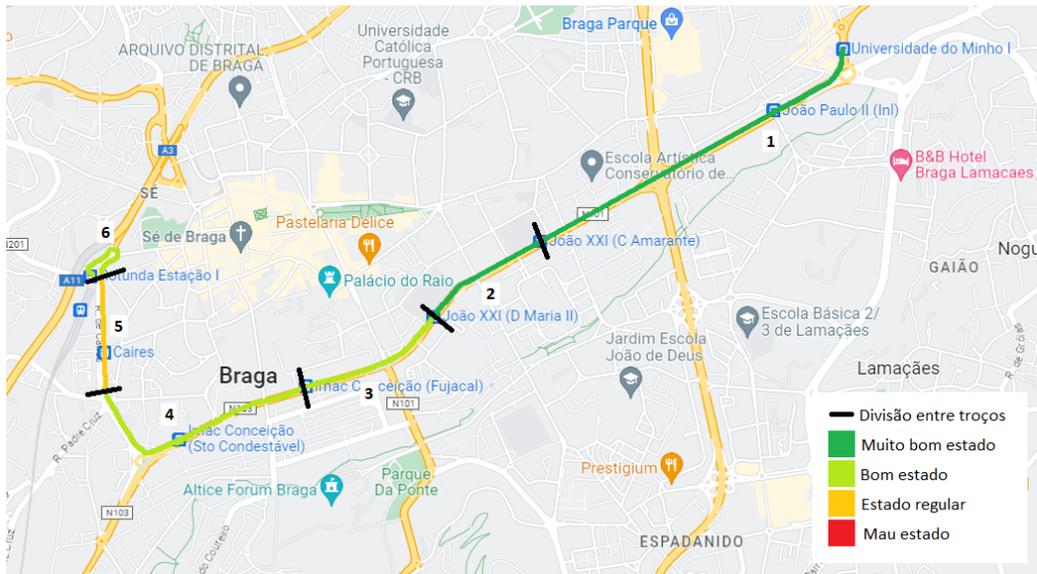


Figura 35: Resultado do teste experimental na rota 43

4.2.4 Scripts

Nesta secção, vai ser apresentada, juntamente com uma breve explicação, a implementação dos vários *scripts* que foram desenvolvidos para as simulações.

Apesar dos vários tipos de sensores que o CupCarbon disponibiliza, apenas um deles foi utilizado, sensor *node*, visto que, para além de ser possível associar um *script*, com o qual se pode programar o comportamento e funcionalidade do sensor. É também viável associá-los a um ficheiro GPS, passando a desenvolver a mesma função que um sensor móvel.

Para esta simulação foram desenvolvidos seis *scripts* que correspondem a 6 sensores com funções diferentes, que serão apresentados nas próximas secções.

4.2.4.1 Sensor rota

```

loop
randb measure 0 1
set last 0
getpos2 long lat
data msg measure last long lat
send msg
delay 1500

```

Como já foi explicado, o principal objetivo destes sensores é simular a coleta de vibrações que seria realizada pelos sensores de aceleração instalados no interior dos autocarros. Para tal, recorrendo ao comando *randb*, é gerado um número aleatório respeitando o intervalo definido, tendo em conta o estado do pavimento e os valores referidos na Secção 4.2.1, sendo este valor guardado na variável *measure*. É de notar que no bloco de código acima foi utilizado como exemplo o intervalo 0-1 puramente para demonstração, no entanto este vai estar dependente do estado de conservação em que a via se encontra, como se pode verificar em seguida. Adicionalmente, também são guardadas a longitude e latitude, respetivamente *long* e *lat*, em que a vibração foi gerada para que seja possível associá-la a determinada localização geográfica e, mais tarde, ser possível, por exemplo, saber quais os excertos das estradas que se encontram em pior estado de conservação. Por fim, também se resolveu adicionar a variável *last*, com valor 0, que se trata de uma *flag* para indicar que este não é o último sensor da rota.

Posteriormente, será enviada uma mensagem ao sensor móvel através do comando *send*, que como vai ser explicado na Secção 4.2.4.3, simula o comportamento do autocarro. Para tal, primeiro, é necessário criar uma mensagem, *msg*, que englobe as quatro variáveis, *measure*, *last*, *long* e *lat*, recorrendo ao comando *data* que agrega todas estas variáveis numa só, que mais tarde é possível voltar a separar.

Como já foi apresentado na Secção 4.2.1, o estado de conservação do pavimento de uma estrada pode ser classificado numa de quatro classes. Desta forma, foi também necessário desenvolver quatro sensores rota, um para cada classe, em que cada um gera diferentes valores aleatórios, respeitando os intervalos previamente definidos.

Rota em muito bom estado

```
loop
randb measure 0 2
set last 0
getpos2 long lat
data msg measure last long lat
send msg
delay 1500
```

Rota em bom estado

```
loop
randb measure 3 5
```

```
set last 0
getpos2 long lat
data msg measure last long lat
send msg
delay 1500
```

Rota em estado regular

```
loop
randb measure 6 7
set last 0
getpos2 long lat
data msg measure last long lat
send msg
delay 1500
```

Rota em mau estado

```
loop
randb measure 8 15
set last 0
getpos2 long lat
data msg measure last long lat
send msg
delay 1500
```

4.2.4.2 Sensor final de troço

Este sensor é essencialmente igual ao sensor rota, no sentido em que também envia uma mensagem ao sensor móvel. No entanto, esta mensagem difere no valor da variável *last*, que passa a ser um, para indicar o final de um troço, e, em vez da variável *measure*, passa a existir *troco*, utilizada para identificar o segmento de estrada em que as medições anteriores foram recolhidas. O índice de cada um destes troços podem ser consultados nas Figuras [29](#), [32](#) e [35](#).

```
loop
```

```
set troco 1
set last 1
getpos2 long lat
data msg troco last long lat
send msg
delay 1000
```

4.2.4.3 Sensor móvel

Por fim, mas não menos importante, o sensor que representa um autocarro que esteja em movimento e tenha um acelerómetro instalado, sendo este responsável por captar as vibrações sentidas no interior do veículo. Este sensor está associado a um ficheiro GPS, fazendo com que este percorra uma rota pré-definida e registe todos os valores gerados pelos outros sensores.

```
set avg 0
set total 0
set nr 0
loop
receive msg
rdata msg vib last long lat
cprint vib
printfile vib last long lat
if(last==0)
  inc nr
  set total total+vib
else
  set avg total/nr //calcular a media das vibrações medidas
  print avg total nr
  printfile avg total nr
  set avg 0
  set total 0
  set nr 0
  set last 0
end
```

Passando agora à análise do *script* desenvolvido para este sensor, no momento da sua inicialização são criadas três variáveis, *avg*, *total* e *nr*, responsáveis por armazenar a média, a soma e o número de vibrações sentidas até ao momento, respetivamente.

Imediatamente após, este sensor fica à espera de receber mensagens provenientes de outros sensores, *msg*. Assim que recebe a mensagem, utilizando o comando *rdata* vai separar as variáveis que compõe a mensagem, que como já foi explicado na Secção 4.2.4.1, é composta por *vib*, a vibração sentida naquele momento ou, no caso de ser o último sensor de um troço, identifica o troço com o seu respetivo número; *last*, *flag* para indicar se é o último sensor do troço em questão; *long* e *lat*, que regista as coordenadas onde a vibração foi sentida.

Em seguida, utilizando o comando *printfile*, os valores destas variáveis são registados num ficheiro. Se estivessemos perante um cenário real, estes valores em vez de serem armazenados num ficheiro para mais tarde serem analisados, seriam enviados em tempo real para a central de processamento que passaria a ser responsável por processar e disponibilizá-los na aplicação *Web* disponível para os utilizadores. Adicionalmente, sempre que uma mensagem é recebida e não se trata do último sensor do troço, as variáveis *total* e *nr* são atualizadas.

Por fim, quando é recebida uma mensagem na qual o valor da *flag last* está a 1, o que significa que a mensagem foi enviada pelo último sensor de um dos troços que constitui a rota, é calculado o valor médio das vibrações sentidas neste. Adicionalmente, também são imprimidos tanto para o ficheiro de resultados como no próprio *CupCarbon*, os valores finais das variáveis *avg*, *total* e *nr*. Por último, estas variáveis assim como a *last* são novamente igualadas a 0.

4.3 Resumo do capítulo

No decorrer deste capítulo foi retratada a ambientação ao *software* de simulação, *CupCarbon*, sendo apresentados os sensores disponíveis e as suas possíveis funcionalidades, assim como a demonstração de processo de criação de rotas no mapa.

Em seguida, procedeu-se à implementação das simulações, começando pela definição dos valores de referência, seguida pela apresentação do teste em contexto real, cujo objetivo foi recolher dados reais, que mais tarde foram aplicadas a cada uma das rotas expostas na secção seguinte. Por fim, o capítulo termina com a conceção dos *scripts* para os vários sensores necessários para realizar as simulações.

No capítulo seguinte, vai ser realizada a análise dos resultados obtidos para cada uma das simulações desenvolvidas.

Capítulo 5

Análise dos resultados

No Capítulo anterior, [Desenvolvimento](#), foram apresentados os resultados dos testes experimentais, as três rotas de estudo que foram implementadas na ferramenta de simulação CupCarbon, assim como os *scripts* desenvolvidos para os vários sensores aplicados nas simulações.

Neste penúltimo capítulo, são apresentados os resultados das simulações realizadas para cada uma das rotas, sendo estes comparados com os valores obtidos nos testes experimentais.

5.1 Apresentação dos resultados obtidos

Visto que os valores gerados nas simulações se tratam de valores aleatórios, para cada uma das rotas são realizadas cinco iterações, com o intuito de se obter vários resultados. Dessa forma, passa a ser possível calcular a média em vez de ter os resultados dependentes de uma única iteração, aumentando a significância significativa dos resultados.

Como já foi referido, cada uma das rotas foi dividida em troços, para que fosse mais simples a análise dos resultados. Desta forma, quando o sensor móvel termina de percorrer um dos troços, é imprimido para o ficheiro de resultados o número do troço a que corresponde e é calculada a média dos valores das vibrações geradas nesse mesmo troço.

```

6 0 -8.456039428710938 41.51449031567143
6 0 -8.456039428710938 41.51449031567143
7 0 -8.452091217041016 41.512433675009746
6 0 -8.452091217041016 41.512433675009746
7 0 -8.449687957763672 41.515390071057894
6 0 -8.449687957763672 41.515390071057894
7 0 -8.449687957763672 41.515390071057894
7 0 -8.45071792602539 41.51796074427831
6 0 -8.45071792602539 41.51796074427831
7 0 -8.45071792602539 41.51796074427831
7 0 -8.451061248779297 41.521045413207425
101 1 -8.449430465698242 41.523101789455716
6.545454545454546 72.0 11.0

```

Figura 36: Exemplo dos valores imprimidos para o ficheiro dos resultados

Na Figura 36 encontra-se um exemplo do que foi imprimido no ficheiro de resultados para o primeiro troço da rota 7. Nesta figura, na penúltima linha, o valor 101 corresponde ao valor que identifica o troço 1, optou-se começar a contagem a 100 para conseguir diferenciar dos valores correspondentes a vibrações geradas. Na última linha, pode-se observar em primeiro lugar a média das vibrações sentidas no troço 1, em segundo o somatório das vibrações e por último o número de vibrações que foram geradas.

5.1.1 Rota 7

Na Tabela 5 podem ser consultadas as médias das vibrações calculadas para cada um dos troços que compõe esta rota, obtidas em cinco iterações. A última coluna apresenta o estado do pavimento de cada um dos troços tendo em conta a média de vibrações obtida e a os valores de referência previamente definidos na Secção 4.2.1.

	It. 1	It. 2	It. 3	It. 4	It. 5	Média	Classificação do estado do pavimento
Troço 1	6.44	6.09	6.(54)	6.615	6.(45)	6.43	Regular
Troço 2	1.125	0.563	1	0.(77)	1.059	0.89	Muito bom
Troço 3	0.(77)	1.(18)	0.(88)	0.714	1	0.91	Muito bom
Troço 4	1	0.571	0.857	1	0.429	0.77	Muito bom
Troço 5	6.6	6.(33)	6.5	6.571	6.(33)	6.41	Regular
Troço 6	9.5	9.25	10.75	10	9.8	9.86	Mau
Troço 7	1.1(6)	0.8	1.8	0.875	1.538	1.2	Muito bom
Troço 8	4	4.091	5.2	4.2	3.(72)	4.24	Bom
Troço 9	6.375	6.375	6.75	6.(55)	6.375	6.48	Regular
Troço 10	4	3.(66)	4	3.(66)	3.(66)	3.8	Bom
Troço 11	3.625	4.125	4.375	3.(88)	3.75	3.95	Bom
Troço 12	6.545	6.545	6.(45)	6.(45)	6.(27)	6.45	Regular
Troço 13	9.(66)	9.(63)	10.083	9.5	9.92	9.76	Mau

Tabela 5: Resultados da implementação da rota 7

Comparando os resultados obtidos na simulação com os resultados obtidos do teste experimental, presentes na Figura 37, é possível verificar que o estado de pavimento obtido através dos resultados das simulações, corresponde ao estado do pavimento resultante do teste realizado em contexto real. Ou seja, por exemplo, os pavimentos que foram identificados como apresentando muito bom estado no teste experimental, tiveram a mesma classificação no resultado da simulação. O mesmo aconteceu para os restantes três estados possíveis.

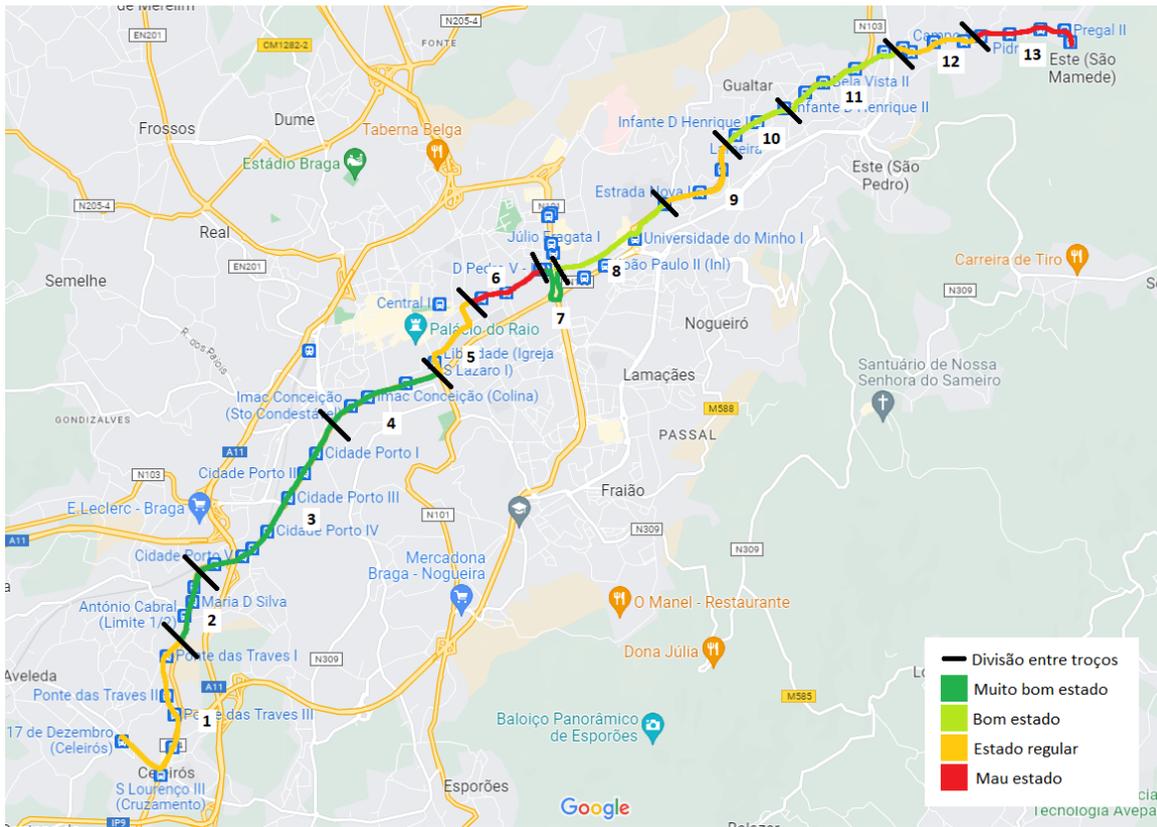


Figura 37: Resultado do teste experimental na rota 7

5.1.2 Rota 40

Assim como foi realizado para a rota 7, os resultados das cinco iterações realizadas para a rota 40 foram compiladas na Tabela 6 para que se torne mais fácil a sua análise.

	lt. 1	lt. 2	lt. 3	lt. 4	lt. 5	Média	Classificação do estado do pavimento
Troço 1	1.5	1.214	2	0.778	0.615	1.22	Muito bom
Troço 2	10.(72)	10.5	10.75	9.75	10.5	10.45	Mau
Troço 3	4	4	4	4.25	4.5	4.15	Bom
Troço 4	4.(2)	3.(3)	4	3.667	4.(3)	3.91	Bom
Troço 5	1.2	0.875	1.1	1.1	0.9	1.04	Muito bom
Troço 6	4.57	4	3.857	3.625	3.429	3.86	Bom
Troço 7	6.6	6.375	6.(2)	6.(5)	6.5	6.45	Regular
Troço 8	0.5	1	1.143	0.8	0.1(6)	0.72	Muito bom
Troço 9	1.6	0.8(3)	1.(3)	1	1.(3)	1.22	Muito bom
Troço 10	6.(33)	6.75	6.75	6.(4)	6.375	6.53	Regular
Troço 11	3.769	4.(27)	4.(09)	4	3.8(3)	3.99	Bom
Troço 12	0.714	0.571	0.875	1	1	0.83	Muito bom
Troço 13	4.5	3.(6)	4.375	3.9	3.(8)	4.07	Bom
Troço 14	1	1.286	0.8(3)	1.1(6)	0.(6)	0.99	Muito bom
Troço 15	6.846	6.786	6.5	6.429	6.643	6.64	Regular
Troço 16	0.75	1.158	0.864	1.05	1.263	1.02	Muito bom

Tabela 6: Resultados da implementação da rota 40

Novamente, como foi verificado para a rota 7, os resultados obtidos pelas simulações e os resultados provenientes do teste em contexto real (ver Figura 38) são os mesmos para cada um dos troços.

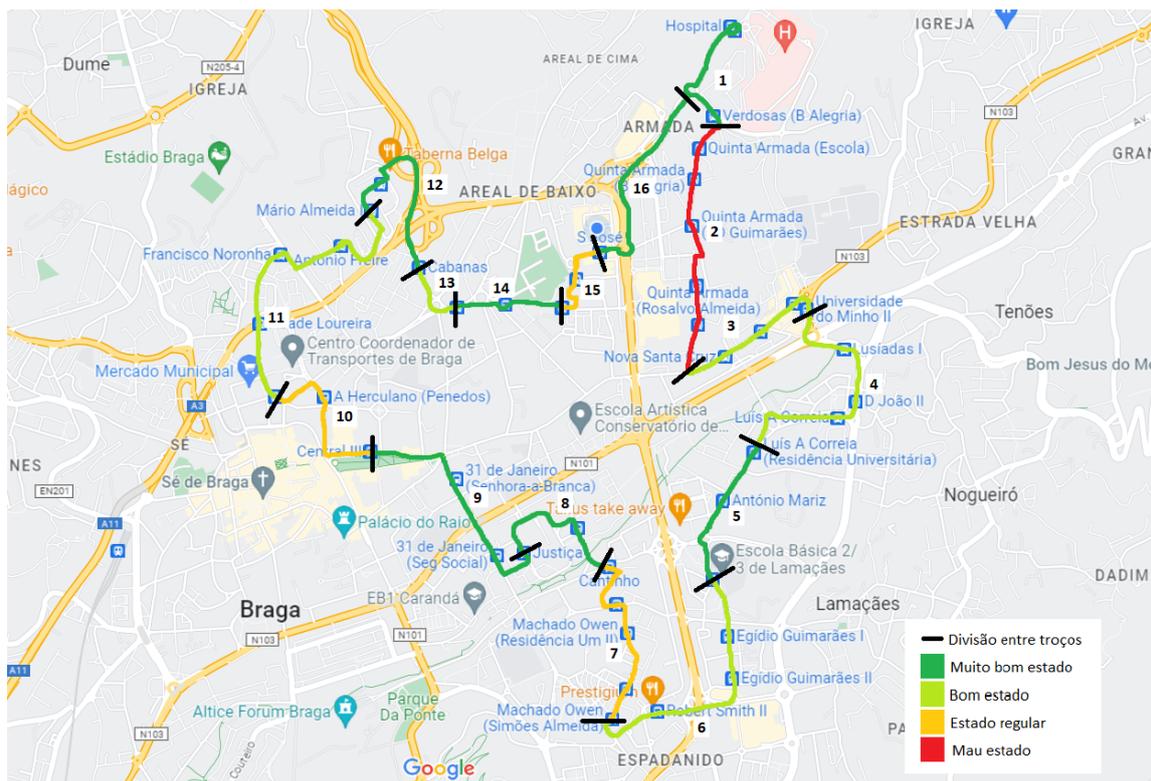


Figura 38: Resultado do teste experimental na rota 40

5.1.3 Rota 43

Para a rota 43 o mesmo procedimento que anteriormente foi aplicado às outras rotas foi novamente utilizado. Os resultados obtidos a partir das simulações foram agrupados na Tabela 7.

	lt. 1	lt. 2	lt. 3	lt. 4	lt. 5	Média	Classificação do estado do pavimento
Troço 1	1.1(6)	1.6	1	1.2	1.6	1.31	Muito bom
Troço 2	1.(33)	0.(66)	1.(66)	1.(33)	1.5	1.3	Muito bom
Troço 3	3.52	4.5	4	3.75	4.5	4	Bom
Troço 4	3.57	3.42	4.28	4.14	4.29	3.94	Bom
Troço 5	6.5	7	7	6	6	6.5	Regular
Troço 6	3.85	4	4.14	4.42	4.(44)	4.17	Bom

Tabela 7: Resultados da implementação da rota 43

Como de esperado, e mais uma vez, os dois resultados, Tabela 6 e Figura 39, mostram-se coerentes.

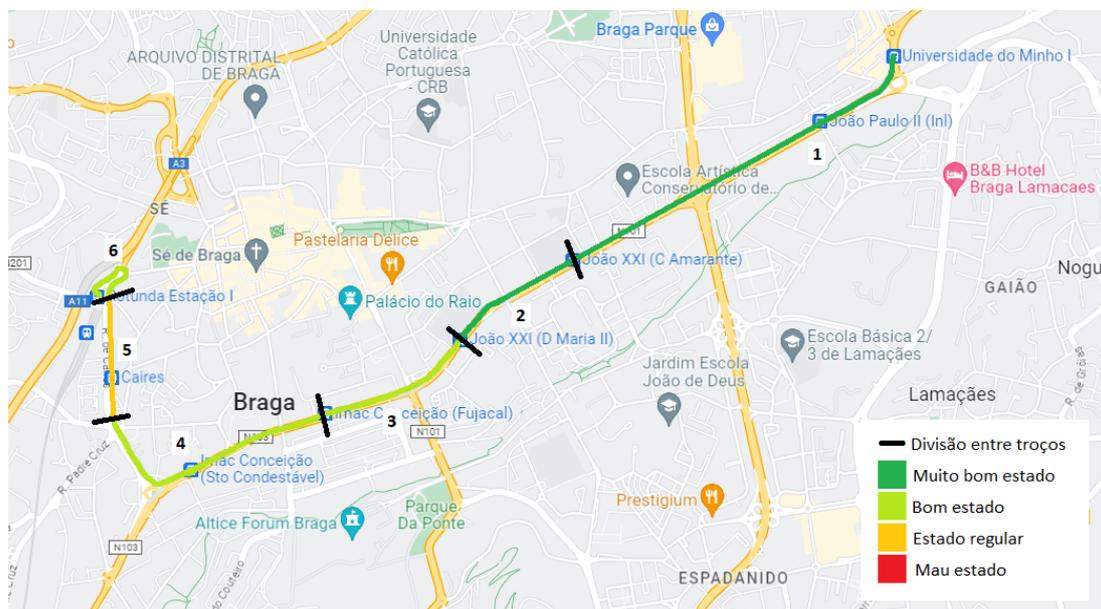


Figura 39: Resultado do teste experimental na rota 43

5.2 Análise e conclusão dos resultados obtidos

Como já referido, analisando os dados em cada uma das tabelas e comparando com os resultados obtidos no respetivo teste experimental, é possível concluir que existe coerência entre os dois. Isto é, por exemplo, um troço que no teste experimental em contexto real tenha sido classificado como apresentando pavimento em mau estado, na simulação obteve o mesmo resultado. Desta forma, confirmamos que os dados obtidos nas simulações assemelham-se aos dados que seriam recolhidos por sensores no contexto real.

Com os resultados obtidos, é possível verificar, para cada uma das rotas, quais os troços que apresentam pior estado de conservação e que conseqüentemente necessitariam de restauração mais urgente.

É também relevante notar que, para o mesmo troço, os valores gerados apresentam ligeiras variações em cada uma das iterações, algo que também será expectável em contexto real, visto que existem vários fatores que influenciam as vibrações sentidas no veículo, como o comportamento do motorista, que pode ou não se desviar de anomalias que existam no pavimento, ou a velocidade a que o autocarro se desloque.

É importante frisar que num contexto real, os dados, semelhantes àqueles apresentados nas tabelas acima, que seriam captados por sensores instalados no interior dos autocarros, seriam disponibilizados na

aplicação *web* à qual os utilizadores finais teriam acesso e podiam consultar em tempo real a qualquer momento do dia. É neste contexto que este projeto se torna uma mais valia para as entidades responsáveis pela conservação das vias públicas, visto que oferece informações para auxiliar as tomadas de decisão em relação a quais as vias apresentam maior urgência de acondicionamento.

Ainda relativamente à monitorização do tráfego recorrendo a estes sensores, apesar de não terem sido desenvolvidas simulações com o intuito de estudar a sua viabilidade, considera-se que comparando as horas a que os dados são recolhidos em cada uma das paragens que compõe as rotas com as horas previstas de chegada, é possível conhecer o tempo de atraso ou adianto do autocarro e dessa forma inferir o nível de trânsito existente ao longo da rota. Para este efeito, como as coordenadas já fazem parte dos dados que são recolhidos pelo sistema, bastaria adicionar um *timestamp* que indicasse o instante em que os restantes dados foram recolhidos.

5.3 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos para cada uma das rotas simuladas, recolhidos a partir de várias simulações realizadas. Por fim, foi realizada a análise e a discussão dos resultados obtidos.

No próximo capítulo, serão apresentadas as conclusões finais desta dissertação, assim como a perspectiva de trabalho futuro a desenvolver.

Capítulo 6

Conclusões e trabalho futuro

Neste último capítulo são apresentadas as principais conclusões do trabalho desenvolvido, assim como a perspectiva de trabalho futuro a realizar.

6.1 Principais conclusões

O tema deste projeto de mestrado surgiu da necessidade de monitorizar, de forma eficiente, o estado do pavimento, assim como o tráfego nas grandes cidades, tirando partido das novas tecnologias das *Smart Cities*. Para tal, recorrendo às redes de transportes públicos já existentes nas cidades, pretendeu-se desenvolver uma rede de sensores capaz de disponibilizar informações relativas ao tráfego e ao estado de conservação do pavimento das vias rodoviárias, em tempo real. Deste modo, definiu-se como principal objetivo deste projeto estudar, desenvolver e testar um sistema inteligente de monitorização do estado do pavimento e do tráfego rodoviário.

Esta dissertação está essencialmente dividida em duas partes. A primeira diz respeito ao estado da arte, enquanto a segunda trata a conceção, desenvolvimento e análise da solução. Na primeira parte do estado da arte foram estudados vários conceitos relacionados com *Smart Cities*, IoT e *Smart Transportation*. Em seguida, foram estudados os trabalhos realizados na área até ao momento, algo que permitiu identificar quais as tecnologias mais utilizadas, assim como alguns dos problemas frequentemente encontrados. Complementarmente, também foi realizado um estudo comparando quatro tecnologias de comunicação *wireless*, resultando na escolha do protocolo LoRaWan para estabelecer a comunicação entre os os sensores e a central de processamento. Dando continuação ao levantamento do estado da arte, foram apresentados os principais desafios que podem surgir no desenvolvimento do sistema proposto. Por último, foi apresentada a ferramenta de simulação a utilizar neste projeto, CupCarbon. Esta trata-se de uma ferramenta *open-source*, concebida para estudar cenários relacionados com *Smart Cities*, permitindo simular o comportamento de sensores no mundo real.

A segunda parte deste projeto foca na concepção do modelo de monitorização e no desenvolvimento e teste de cenários de estudo. Em primeiro lugar, foi estruturado e aperfeiçoado o primeiro esboço do sistema a desenvolver com base nos estudos realizados previamente. Para isso, foram estudados os utilizadores do sistema, levantados os requisitos de infra-estrutura, funcionais e não funcionais necessários ao correto funcionamento do sistema e desenvolvidos modelos para melhor entender o domínio do problema. Por fim, foram concebidos os protótipos da interface da aplicação *web*, que permitem obter uma melhor percepção daquilo que se pretende desenvolver, e um modelo representativo do sistema.

Em seguimento, iniciou-se a componente prática da dissertação, na qual se começou pela exploração e ambientação da ferramenta de simulação, CupCarbon, seguida pela implementação em concreto. Começou-se por definir os valores de referência, com base em estudos existentes, que seriam utilizados nos sensores das simulações. Com estes valores, são estabelecidos intervalos de vibrações para cada uma das classificações possíveis para estado do pavimento (mau, regular, bom e muito bom). Em seguida, foram ponderadas as rotas de estudo e para cada uma delas foi realizado um teste experimental em contexto real que permitiu conhecer os pavimentos dos troços que compõe cada uma das rotas e assim aproximar as simulações da realidade. Foram ainda desenvolvidos os *scripts* utilizados para programar o comportamento dos sensores utilizados nas simulações desenvolvidas.

Posteriormente, para cada uma das rotas de estudo anteriormente referidas, foi criado um cenário de simulação, pretendendo-se simular a recolha de valores de vibração ao longo de cada rota. Para cada uma destas simulações foram realizadas cinco iterações com o intuito de obter a prova de conceito do sistema proposto. Os resultados obtidos a partir destas simulações foram, em seguida, estudados e comparados com os testes que se tinham realizado em contexto real, o que permitiu verificar o funcionamento e viabilidade do sistema proposto.

Por fim, passando à comparação entre os sistemas estudados no estado da arte e o sistema desenvolvido na presente dissertação, é possível identificar um conjunto de funcionalidades que se tornam uma mais valia. As vantagens do modelo do modelo criado passam por este ser capaz de agregar a monitorização do tráfego e do estado de pavimento num único sistema, assim como o facto deste utilizar os transportes públicos permitir não ter custos de investimento muito elevados, passando apenas a ser necessários adquirir os sensores de aceleração e no caso de ainda não existir, investir numa central de processamento com capacidade de processar dados em tempo real. É ainda de salientar que a maioria dos sistemas preexistentes não tinham em consideração a importância de disponibilizar, aos utilizadores, os dados em tempo real.

Com base no que foi apresentado, a presente dissertação permitiu identificar os principais requisitos

e funcionalidades necessárias para garantir o bom funcionamento e viabilidade de um sistema de monitorização do tráfego e do pavimento das cidades, terminando com a criação de um modelo funcional em ambiente de simulação que permite inferir o comportamento do sistema num contexto real.

6.2 Perspetiva de trabalho futuro

O trabalho desenvolvido na presente dissertação apresenta algumas limitações, sendo que a maioria delas podem ser abordadas em trabalhos futuros. A primeira e mais urgente sugestão para trabalho futuro passa por aprimorar a prova de conceito para a monitorização de tráfego, visto que neste estudo houve maior foco na monitorização do estado do pavimento. Deste modo, existe o intuito de estudar e testar de forma mais aprofundada e em contexto real a viabilidade de, a partir deste sistema, monitorizar os níveis de tráfego rodoviário numa cidade.

Outra proposta para trabalho futuro foca na transição do sistema concebido em ambiente simulado para um contexto real. Para tal, seria desenvolvida uma primeira iteração do sistema, com o propósito deste ser testado perante cenários reais. Naturalmente, é pressuposto que possam surgir novas adversidades que até ao momento não foram consideradas, mas cuja expectativa é solucionar as mesmas. Em conjugação com a transição para contexto real, seria importante inquirir os utilizadores que têm acesso ao protótipo do sistema sobre possíveis melhorias e possivelmente novas funcionalidades que valorizassem ainda mais o sistema proposto.

Bibliografia

- [1] Migration Data Portal. Urbanization and migration, Junho 2022. Available at: [/https://www.migrationdataportal.org/themes/urbanization-and-migration](https://www.migrationdataportal.org/themes/urbanization-and-migration) [Accessed 03 Nov. 2022].
- [2] M Martinez Eukliadiadas. Which are the leading smart cities in europe?, Maio 2021. Available at: [/https://tomorrow.city/a/which-are-the-leading-smart-cities-in-europe](https://tomorrow.city/a/which-are-the-leading-smart-cities-in-europe) [Accessed 03 Nov. 2022].
- [3] Department of economic United Nations and social affairs. Around 2.5 billion more people will be living in cities by 2050, projects new un report, 2018. Available at: [/https://www.un.org/en/desa/around-25-billion-more-people-will-be-living-cities-2050-projects-new-un-report](https://www.un.org/en/desa/around-25-billion-more-people-will-be-living-cities-2050-projects-new-un-report) [Accessed 10 Nov. 2022].
- [4] Patel K. Patel, K. and PG Scholar Assistant Professor. Internet of things-iot: definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application future challenges. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 2016. Available at: [/http://www.opjstamnar.com/download/Worksheet/Day-110/IP-XI.pdf](http://www.opjstamnar.com/download/Worksheet/Day-110/IP-XI.pdf) [Accessed 30 Set. 2022].
- [5] Imagem retirada de pixabay.com, 2015. Available at: [/https://cdn.pixabay.com/photo/2015/05/25/05/27/network-782707_960_720.png](https://cdn.pixabay.com/photo/2015/05/25/05/27/network-782707_960_720.png) [Accessed 25 Nov. 2022].
- [6] Al Neyadi H. Mohamed N. et al Al Nuaimi, E. Applications of big data to smart cities. *Journal of Internet Services and Applications*, 6(25), 2015. Available at: [/https://doi.org/10.1186/s13174-015-0041-5](https://doi.org/10.1186/s13174-015-0041-5) [Accessed 6 Out. 2022].
- [7] *Icons* retirados de flaticon.com. Available at: [/https://www.flaticon.com/](https://www.flaticon.com/) [Accessed 21 Jan. 2023].
- [8] Hamid Fekri Azgomi and Mo Jamshidi. A brief survey on smart community and smart transportation. In *2018 IEEE 30th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, pages 932–

- 939, 2018. Available at: [/https://ieeexplore.ieee.org/document/8576142](https://ieeexplore.ieee.org/document/8576142) [Accessed 4 Jan. 2023].
- [9] Kashif Qureshi and Hanan Abdullah. A survey on intelligent transportation systems. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 15:629–642, 2013. Available at: [/https://www.researchgate.net/publication/257367335_A_Survey_on_Intelligent_Transportation_Systems](https://www.researchgate.net/publication/257367335_A_Survey_on_Intelligent_Transportation_Systems) [Accessed 4 Jan. 2023].
- [10] Sanja Šurdonja, Tullio Giuffrè, and Aleksandra Deluka-Tibljaš. Smart mobility solutions – necessary precondition for a well-functioning smart city. *Transportation Research Procedia*, 45:604–611, 2020. Transport Infrastructure and systems in a changing world. Towards a more sustainable, reliable and smarter mobility. TIS Roma 2019 Conference Proceedings.
- [11] Ricardo Faria, Lina Brito, Karolina Baras, and José Silva. Smart mobility: A survey. In *2017 International Conference on Internet of Things for the Global Community (IoTGC)*, pages 1–8, 2017. Available at: [/https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8008972](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8008972) [Accessed 4 Jan. 2023].
- [12] Logo busnet ufficiale con scritta, 2016. Available at: [/https://www.labnetwork.it/laboratori-e-partner/logo-busnet-ufficiale-con-scritta/](https://www.labnetwork.it/laboratori-e-partner/logo-busnet-ufficiale-con-scritta/) [Accessed 2 Dez. 2022].
- [13] Kasun De Zoysa, Chamath Keppitiyagama, Gihan P. Seneviratne, and W. W. A. T. Shihan. A public transport system based sensor network for road surface condition monitoring. In *Proceedings of the 2007 Workshop on Networked Systems for Developing Regions*. Association for Computing Machinery, 2007. Available at: [/https://doi.org/10.1145/1326571.1326585](https://doi.org/10.1145/1326571.1326585) [Accessed 2 Dez. 2022].
- [14] S-mile, 2015. Available at: [/http://www.s-mileproject.com/](http://www.s-mileproject.com/) [Accessed 2 Dez. 2022].
- [15] Marcin Staniek. Road pavement condition diagnostics using smartphone-based data crowdsourcing in smart cities. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(4):554–567, 2021. Available at: [/https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.09.004](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2020.09.004) [Accessed 2 Dez. 2022].
- [16] B. Y. Amirgaliyev, K. K. Kuvatov, and Z. Y. Baibatyr. Road condition analysis using 3-axis accelero-

- meter and gps sensors. 2016. Available at: [/https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7991662](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7991662) [Accessed 11 Dez. 2022].
- [17] Sooksan Panichpapiboon and Puttipong Leakkaw. Traffic sensing through accelerometers. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(5):3559–3567, 2016. Available at: [/https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7130669](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7130669) [Accessed 11 Dez. 2022].
- [18] Neeraj Kumar Jain, R. K. Saini, and Preeti Mittal. A review on traffic monitoring system techniques. In Kanad Ray, Tarun K. Sharma, Sanyog Rawat, R. K. Saini, and Anirban Bandyopadhyay, editors, *Soft Computing: Theories and Applications*, pages 569–577. Springer Singapore, 2019. Available at: [/https://doi.org/10.1007/978-981-13-0589-4_53](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0589-4_53) [Accessed 14 Dez. 2022].
- [19] Juan Guerrero-Ibañez, Sherali Zeadally, and Jua Contreras-Castillo. Sensor technologies for intelligent transportation systems. *Sensors*, 18(4), 2018. Available at: [/https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1212](https://www.mdpi.com/1424-8220/18/4/1212) [Accessed 22 Dez. 2022].
- [20] Shaurya Agarwal, Shakib Mustavee, Juan Contreras-Castillo, and Juan Guerrero-Ibañez. Chapter 20 - sensing and monitoring of smart transportation systems. In Amir H. Alavi, Maria Q. Feng, Pengcheng Jiao, and Zahra Sharif-Khodaei, editors, *The Rise of Smart Cities*, pages 495–522. Butterworth-Heinemann, 2022. Available at: [/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817784-6.00010-2](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817784-6.00010-2) [Accessed 28 Dez. 2022].
- [21] Baofeng Ji, Xueru Zhang, Shahid Mumtaz, Congzheng Han, Chunguo Li, Hong Wen, and Dan Wang. Survey on the internet of vehicles: Network architectures and applications. *IEEE Communications Standards Magazine*, 4:34–41, 03 2020. Available at: [/https://www.researchgate.net/publication/341199136_Survey_on_the_Internet_of_Vehicles_Network_Architectures_and_Applications](https://www.researchgate.net/publication/341199136_Survey_on_the_Internet_of_Vehicles_Network_Architectures_and_Applications) [Accessed 19 Jan. 2023].
- [22] Rob Lauer. Comparing iot connectivity with lora, cellular, and wi-fi, 2021.
- [23] Shailandra Kaushik. An overview of technical aspect for wifi networks technology. *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering (IJECSSE, ISSN: 2277-1956)*, 1(01):28–34, 2012. Available at: [/https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=1c012c9f2bc7a3cb2bf299e48cfab6c0be6cbf50](https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=1c012c9f2bc7a3cb2bf299e48cfab6c0be6cbf50) [Accessed 11 Jan. 2023].

- [24] Esau Bermudez Sanchez and Djamel Fawzi Hadj Sadok. Lora and lorawan protocol analysis using cupcarbon. In Miguel Felix Mata-Rivera, Roberto Zagal-Flores, and Cristian Barria-Huidobro, editors, *Telematics and Computing*, pages 352–376. Springer International Publishing, 2020. Available at: [/https://doi.org/10.1007/978-3-030-62554-2_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-62554-2_26) [Accessed 11 Jan. 2023].
- [25] Ovyi. Wireless technologies: Ble vs lora vs wifi vs cellular. Available at: [/https://ovy1.io/insights-and-news/wireless-technologies](https://ovy1.io/insights-and-news/wireless-technologies) [Accessed 10 Mar. 2023].
- [26] Dr Mirzoev et al. Low rate wireless personal area networks (lr-wpan 802.15. 4 standard). *arXiv preprint arXiv:1404.2345*, 2014.
- [27] George Klimiashvili, Cristiano Tapparello, and Wendi Heinzelman. Lora vs. wifi ad hoc: A performance analysis and comparison. In *2020 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, pages 654–660, 2020.
- [28] How to tell if your shocks or struts are bad. Available at: [/https://www.lesschwab.com/article/how-to-tell-if-your-shocks-or-struts-are-bad.html](https://www.lesschwab.com/article/how-to-tell-if-your-shocks-or-struts-are-bad.html) [Accessed 19 Jan. 2023].
- [29] Cupcarbon.com. Cupcarbon iot 5.2: lot simulator for digital twin. Available at: [/http://www.cupcarbon.com/](http://www.cupcarbon.com/) [Accessed 20 Jan. 2023].
- [30] Massinissa Lounis, Ahcène Bounceur, Reinhardt Euler, and B. Pottier. Estimation of energy consumption through parallel computing in wireless sensor networks. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10 2017. Available at: [/https://www.researchgate.net/publication/318939910_Estimation_of_Energy_Consumption_through_Parallel_Computing_in_Wireless_Sensor_Networks](https://www.researchgate.net/publication/318939910_Estimation_of_Energy_Consumption_through_Parallel_Computing_in_Wireless_Sensor_Networks) [Accessed 20 Jan. 2023].
- [31] Luís Moreira. Jornal de Notícias. Buracos causados pela chuva causaram mais de 100 pequenos acidentes em braga, Jan 2023. Available at: [/https://www.jn.pt/local/noticias/braga/braga/buracos-causados-pela-chuva-causaram-mais-de-100-pequenos-acidentes-em-braga-15606126.html](https://www.jn.pt/local/noticias/braga/braga/buracos-causados-pela-chuva-causaram-mais-de-100-pequenos-acidentes-em-braga-15606126.html) [Accessed 05 Abr. 2023].
- [32] Lusa. SIC Notícias. Não há memória de tanto buraco: Ps apela à rápida intervenção nas estradas de braga, Jan 2023. Available at: [/https://sicnoticias.pt/pais/2023-01-09-Nao-ha-](https://sicnoticias.pt/pais/2023-01-09-Nao-ha-)

[memoria-de-tanto-buraco-PS-apela-a-rapida-intervencao-nas-estradas-de-Braga-1b463504](#) [Accessed 05 Abr. 2023].

- [33] Redação. Braga continua a ser a 3.^a cidade do país com mais congestionamento de trânsito, Mar 2022. Available at: <https://ominho.pt/braga-continua-a-ser-a-3-a-cidade-do-pais-com-mais-congestionamento-de-transito/> [Accessed 05 Abr. 2023].
- [34] Redação. Bracarenses perdem 89 horas por ano nas filas de trânsito, Jan 2020. Available at: <https://www.antenaminho.pt/noticias/bracarenses-perdem-89-horas-por-ano-nas-filas-de-transito/4197> [Accessed 05 Abr. 2023].
- [35] futuretransport.com. Available at: <https://futuretransport.com.br/wp-content/uploads/2017/05/buracos-estrada-678x381.jpg> [Accessed 25 Mar. 2023].
- [36] cimentoitambe.com. Available at: https://www.cimentoitambe.com.br/wp-content/uploads/2020/09/EUPAVE_concrete-min.jpg [Accessed 25 Mar. 2023].
- [37] <https://alemdainercia.com>. Available at: <https://alemdainercia.com/wp-content/uploads/2018/04/congestionamento-em-sao-paulo.jpg> [Accessed 25 Mar. 2023].
- [38] Protótipos da interface. Available at: <https://www.figma.com/file/EBHLVlkdYRkrP7Q9qnqyKq/Dashboard?type=design&node-id=0%3A1&mode=design&t=2qdE7TOM02Q5CJkb-1>.
- [39] MDOT (Mississippi Department of Transportation). Asset management background, 2017. Available at: <https://www.michigan.gov/-/media/Project/Websites/MDOT/Programs/Planning/Asset-Management/International-Roughness-Index-IRI.pdf?rev=8a93e320abce4611bfcd89c9cb66f3a3> [Accessed 15 Jun. 2023].
- [40] Daniel Abudinen, Luis Fuentes, and Juan Carvajal-Muñoz. Development of thresholds for travel quality assessment in colombian urban roads. 10 2016. Available at: https://www.researchgate.net/publication/309284101_Development_of_Thresholds_for_Travel_Quality_Assessment_In_Colombian_Urban_Roads [Accessed 20 Jun. 2023].
- [41] Peter Můčka. International roughness index thresholds based on whole-body vibration in passenger cars. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*,

- 2675:1–16, 11 2020. Available at: [/https://www.researchgate.net/publication/345308396_International_Roughness_Index_Thresholds_Based_on_Whole-Body_Vibration_in_Passenger_Cars](https://www.researchgate.net/publication/345308396_International_Roughness_Index_Thresholds_Based_on_Whole-Body_Vibration_in_Passenger_Cars) [Accessed 20 Jun. 2023].
- [42] Tub 7 s. mamede d'este celeirós. Available at: [/https://tub.pt/percurso/7/](https://tub.pt/percurso/7/) [Accessed 10 Jul. 2023].
- [43] Tub 40 circuito urbano i. Available at: [/https://tub.pt/percurso/40/](https://tub.pt/percurso/40/) [Accessed 12 Jul. 2023].
- [44] Tub 43 estação universidade do minho. Available at: [/https://tub.pt/percurso/43/](https://tub.pt/percurso/43/) [Accessed 14 Jul. 2023].
- [45] European Comission. Smart cities, cities using technological solutions to improve the management and efficiency of the urban environment. Available at: [/https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en](https://ec.europa.eu/info/eu-regional-and-urban-development/topics/cities-and-urban-development/city-initiatives/smart-cities_en) [Accessed 25 Nov. 2022].
- [46] Pavement Interactive. Roughness. Available at: [/https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/roughness/](https://pavementinteractive.org/reference-desk/pavement-management/pavement-evaluation/roughness/) [Accessed 15 Jun. 2023].

Parte III

Apêndices

Apêndice A

Material de suporte

A.1 Manual de instruções

De seguida apresenta-se os passos necessários a seguir de forma a utilizar a ferramenta *CupCarbon* para simular as rotas criadas:

- *download* da ferramenta CupCarbon através do link [/http://cupcarbon.com/](http://cupcarbon.com/);
- *download* dos cenários construídos para cada uma das rotas de estudo disponíveis no link [/https://github.com/CarolinaOliveira/Proj_Dissert_cupCarbon.git](https://github.com/CarolinaOliveira/Proj_Dissert_cupCarbon.git);
- abrir a ferramenta, caso não seja possível, deverá ser atualizado ou instalado o *JAVA* no seu computador. De seguida, deverá abrir um projeto, selecionando o projeto com a rota que pretende simular, *CupCarbon* -> *Project* -> *Open Project* -> Pasta da rota que pretende simular -> rota7.cup (rota40.cup ou rota43.cup);
- caso a rota não esteja desenhada no mapa, selecionar na aba lateral esquerda a opção *Marker Parameters* e selecionar a opção *Draw all routes*;
- na aba lateral esquerda selecionar a opção *Simulation Parameters*, verificar se a *checkbox Mobility/Events* se encontra selecionada, caso contrário selecionar a mesma, de forma a permitir a mobilidade do sensor que percorre a rota;
- selecionar na aba superior a opção *Simulation* -> *Run Simulation* para dar início à simulação da rota pretendida;
- uma vez terminada a simulação, se pretender aceder aos dados gerados na simulação, deverá aceder à pasta da rota simulada, em seguida aceder a *results* e selecionar o ficheiro cujo nome começa com 'S' (exemplo: S67).

- caso pretenda repetir a simulação mais do que uma vez, para a mesma rota, o ficheiro mencionado no ponto anterior deverá ser eliminado ou retirado da pasta *results*.

