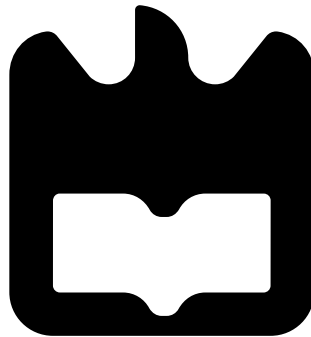




**Vanessa Alexandra  
Leal Martins**

**Utilização de Bluetooth em sistemas de semáforos**







**Vanessa Alexandra  
Leal Martins**

## **Utilização de Bluetooth em sistemas de semáforos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor José Alberto Gouveia Fonseca, Professor Associado do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e co-orientação do Professor Doutor Joaquim José de Castro Ferreira, Professor Adjunto na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Águeda da Universidade de Aveiro





**o júri / the jury**

presidente / president

**Professor Doutor António Rui de Oliveira e Silva Borges**

Professor Associado da Universidade de Aveiro

vogais / examiners committee

**Professor Doutor José Alberto Gouveia Fonseca**

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

**Professor Doutor Paulo José Lopes Machado Portugal**

Professor Associado da Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia



## Agradecimentos

A concretização deste trabalho necessitou de um esforço e dedicação, só possíveis com o apoio de quantos me rodearam. Agradeço pois, a todos os que fizeram parte do meu percurso académico, que termina uma etapa com a apresentação desta dissertação.

Agradeço ainda aos meus pais e ao meu irmão, pois foram eles que me deram a oportunidade de fazer as minhas escolhas sem nunca me prenderem ou restringirem. Durante este longo percurso sempre me apoiaram, motivaram e acreditaram em mim. Sem a ajuda incansável deles não seria possível ter terminado mais esta etapa. Agradeço também a toda a restante família o apoio que sempre me fizeram chegar, estando mais próximos ou longe de mim.

Um agradecimento especial ao Pedro Franco pela sua altruísta disponibilidade, bem como pelo valioso contributo e ajuda, extensivo ao pessoal do Laboratório de Sistemas Embutidos, que carinhosamente me acolheu, mostrou infinita disponibilidade e me ajudou em tudo o que lhes foi possível.

Ao meu orientador por, desde muito cedo, ter feito despertar o meu interesse pela área que lecionou, ajudando-me a escolher o caminho que queria para esta dissertação. Deu-me a oportunidade de explorar e conhecer melhor uma vasta e interessante área de estudo como são os Sistemas Inteligentes de Transporte.

A todos os meus amigos que viveram e partilharam comigo, bem de perto, os bons momentos sem nunca me deixarem cair nos menos bons. Tornaram o dia-a-dia nesta academia uma das melhores experiências de sempre! À Carolina, que ao longo destes cinco anos foi uma amiga sempre presente, colega de trabalho exigente, que me ajudou a crescer muito e uma inspiração incrível. Ao Rodrigo porque ao longo deste difícil último ano, independentemente da sobrecarga de trabalho a que se encontrava sujeito, sempre esteve presente e disponível, reservando um espacinho para me ajudar.

A todos, sinceramente, obrigada!



## Resumo

A coordenação do tráfego nas interseções é objeto de grande estudo dado o seu cariz complexo e desafiante. Estes locais exigem sempre um equilíbrio entre a segurança de todos os seus utilizadores e fluidez e eficiência na circulação do tráfego. Uma das vias utilizadas para conseguir este objetivo, atualmente, é a utilização de semáforos. No entanto a esta solução há vantagem e desvantagens associadas, por exemplo, grande parte das interseções não têm coordenação semafórica pois são infraestruturas que requerem um grande encargo financeiro. Assim, em todas onde não estão presentes, logo desprovidas de qualquer medida de segurança, podem ocorrer acidentes. Também nas que existem semáforos levantam-se questões como a falta da adaptabilidade da sinalização à situação real da interseção, não promovendo a fluidez desejada. Assim, ao abrigo das comunicações veiculares têm surgido diversas propostas para alterar a situação atual das interseções.

Neste trabalho apresenta-se o protótipo da integração nos sistemas de semáforos de uma tecnologia alternativa às dedicadas a comunicações veiculares, o BLE. Solução que controla todos os utilizadores da interseção, dando a possibilidade de desmaterializar algumas das infraestruturas presentes nas vias através da criação de um mecanismo de display pessoal no interior do veículo. Faz-se também um estudo inicial do emprego dos canais de anúncio do BLE nas comunicações V2I.

Na escolha da alternativa foi tido em consideração a utilização de uma tecnologia fácil de distribuir, neste caso em específico por ser já um protocolo adotado por diversas empresas de produção de smartphones e chips, de reduzido custo e consumo energético. Em soluções a implementar em ambientes urbanos estes dois últimos aspetos são cruciais pois, embora o impacto individual possa parecer pequeno, em larga escala pode significar um sistema com custos mais reduzidos na implementação e manutenção.

A análise dos testes realizados em diversos cenários e condições, estático, dinâmico, variando a distância entre dispositivos e a diferentes velocidades permitiram concluir que é possível o uso adequado e satisfatório dos canais de anúncio do BLE em ambiente rodoviário.



## Abstract

Traffic control management at intersections has been a challenging and complex field of study. Intersections require a balance between safety and efficient traffic control. Nowadays, one way to ensure this trade off is through traffic light signalization. However, the applied solution is not ideal and so is possible to point out some advantages as well as disadvantages, for instance, only a small percentage of the overall intersections are signalized due to the expensive cost of these infrastructures, leaving these locals deprived of safety measures. On the other hand, when in the presence of traffic lights, some questions related to the adaptability to real time scenario by these structures, maximizing the vehicles volume crossing by, are raised. Hence, a huge amount of developments and proposals have been arising based on vehicular communications, in order to improve intersections' present status.

In this work, a prototype including an alternative technology to standard vehicular communications, BLE, is presented. This solution aims to control all intersection users and through in-vehicle displaying semaphoric information, dematerialize some road infrastructure. Along this project, is also made a preliminary study of advertising channels usage in vehicular environment, more particularly to V2I communications.

The technological choice was made considering the adoption of this protocol by multiple hardware/chip and smartphone companies, and, this way, allowing an easy distribution, a low cost and a low power consumption. In urban areas, these last points are crucial for a large scale, low cost deployment and maintainance.

The analysis of the performed tests under various conditions, such as static and dynamic, by varying the distance in between both devices as well as vehicle speed, allowed to conclude that a suitable usage of the BLE advertising channels in vehicular context is possible to achieve.





# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>vii</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Estrutura . . . . .	3
<b>2 Estado da Arte</b>	<b>5</b>
2.1 Sistemas Inteligentes de Transporte . . . . .	5
2.2 Standards para Comunicações Veiculares . . . . .	7
2.2.1 IEEE WAVE e ETSI ITS-G5 . . . . .	8
2.2.2 Alternativas . . . . .	10
2.3 Bluetooth Smart . . . . .	11
2.3.1 Descrição da stack protocolar . . . . .	12
Camada Física . . . . .	13
Camada de Ligação . . . . .	14
Modo de Teste Direto . . . . .	17
Host Controller Interface . . . . .	17
Logical Link Control and Adaptation Protocol . . . . .	17
Attribute Protocol . . . . .	17
Gestor de Segurança . . . . .	18
Generic Attributes Profile . . . . .	18
Generic Access Profile . . . . .	18
2.3.2 Troca de informação entre dispositivos BLE . . . . .	19
2.4 Sistemas de Semáforos . . . . .	21
2.5 Trabalho Relacionado . . . . .	22
2.6 Considerações Finais . . . . .	24
<b>3 Arquitetura para Aplicação do BLE ao Sistema Semafórico</b>	<b>27</b>
3.1 Sistemas de Semáforos Físicos Atuais e o seu Controlo . . . . .	27
3.1.1 Constituição física . . . . .	28

3.1.2	Conceitos e técnicas de controlo temporal . . . . .	30
3.2	Sistema de Semáforos Proposto . . . . .	33
3.2.1	Distâncias de segurança . . . . .	35
3.2.2	Cenários de aplicação . . . . .	36
3.3	Arquitetura Proposta . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Implementação</b>	<b>45</b>
4.1	Enquadramento . . . . .	45
4.2	Elementos Utilizados no Desenvolvimento . . . . .	47
4.2.1	Raspberry Pi . . . . .	47
4.2.2	Módulo BLE Microchip RN4020 . . . . .	47
4.3	Controlador . . . . .	51
4.4	Dispositivo Junto da Passadeira . . . . .	53
4.4.1	Período de atualização . . . . .	54
4.4.2	Período de retransmissão . . . . .	58
4.4.3	Display para peões . . . . .	60
4.5	Dispositivo Dentro do Veículo . . . . .	60
4.5.1	Aplicação Android Studio . . . . .	61
4.5.2	Dispositivo anexável . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Validação e Resultados Obtidos</b>	<b>67</b>
5.1	Estáticos . . . . .	67
5.1.1	Taxa de receção de pacotes . . . . .	68
5.1.2	Tempo de atualização do estado . . . . .	69
5.1.3	Potência do sinal recebido . . . . .	71
5.2	Dinâmicos . . . . .	71
5.2.1	Aplicativo desenvolvido . . . . .	74
5.2.2	Dispositivo anexável - Conjunto Raspberry Pi e Módulo RN4020 . . . . .	80
5.2.3	Interseção . . . . .	86
5.3	Considerações Finais . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>91</b>
6.1	Conclusões . . . . .	91
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	92
	<b>Bibliografia</b>	<b>95</b>

# Lista de Figuras

2.1	Representação da banda na gama dos 5.9GHz, com a divisão em SCH e CCH. Em a) nos EUA em b) na Europa. . . . .	8
2.2	Representação das arquiteturas dos standards referidos, a) relativa ao standard ITS-G5, em b) o modelo OSI e em c) as camadas protocolares WAVE . . . .	9
2.3	Stack protocolar do BLE [1] . . . . .	13
2.4	Canais do BLE: tipo, frequência e sobreposição com os canais Wi-fi [2] . . . .	14
2.5	Estrutura dos pacotes da camada de ligação [3] . . . . .	15
2.6	Máquina de estados da camada de ligação [2] . . . . .	15
2.7	Eventos de anúncio com o efeito do período de atraso [3] . . . . .	16
2.8	Processo de scan dos eventos de anúncio . . . . .	17
2.9	Evento de anúncio com pedido de scan no canal de anúncio 38 [4] . . . . .	19
2.10	Evento de anúncio com pacotes do tipo não conectáveis e não direcionados [3]	20
2.11	Evento de anúncio seguido de evento de conexão [4] . . . . .	20
3.1	Processo do sistema semafórico [5] . . . . .	28
3.2	Numeração de fases e movimentos numa interseção de quatro vias [5] . . . .	31
3.3	Diagrama de barreira-e-anel [5] . . . . .	32
3.4	Cenário de utilização: Interseção de quatro vias . . . . .	37
3.5	Arquitetura do sistema proposto. Em 1 está representado o controlador, em 2 o dispositivo junto da passadeira e em 3 o dispositivo a integrar no interior do veículo. . . . .	38
3.6	Mapeamento da arquitetura do sistema proposto num cruzamento de estradas. Em 1 está representado o controlador, em 2 o dispositivo junto da passadeira e em 3 o dispositivo a integrar no interior do veículo. . . . .	39
3.7	Diagrama temporal do funcionamento do sistema proposto . . . . .	40
3.8	Fluxograma representativo do funcionamento do controlador . . . . .	41
3.9	Fluxograma do funcionamento dos dispositivos junto das passadeiras . . . . .	42
3.10	Fluxograma do funcionamento das interfaces com o condutor . . . . .	43
4.1	Diagrama de barreira-e-anel utilizado na implementação . . . . .	46
4.2	Tabela da descrição do sinal semafórico na interseção ao longo do tempo . . .	46
4.3	Diagrama de blocos do módulo RN4020 [6] . . . . .	48
4.4	Diagrama de radiação da antena do módulo RN4020 [6] . . . . .	49
4.5	Esquema dos portos de saída do RN4020 [6] . . . . .	49
4.6	Esquemático da ligação dos dois componentes escolhidos . . . . .	50
4.7	Carga paga dos PDU's dos pacotes enviados pelo controlador . . . . .	52

4.8	Sequência de eventos de anúncio no controlador . . . . .	53
4.9	Sequência de estados do dispositivo . . . . .	54
4.10	Ações do dispositivo, em que se discriminam os papéis BLE adotados pelo RN4020. A verde estão descritas ações relativas à configuração e ação do RN4020, a azul relativas à UART da Raspberry pi, a amarelo a descrição em maior detalhe de ações específicas do módulo. . . . .	55
4.11	Formato das mensagens de anúncio transmitidas [3] . . . . .	57
4.12	Carga paga dos PDU's dos pacotes reenviados pelo dispositivo da passageira . . . . .	59
4.13	Fluxograma das ações desempenhadas pela aplicação Android . . . . .	63
4.14	Símbolos do layout correspondendo ao sinal que deve ser disposto mediante o estado recebido. . . . .	64
5.1	Avenida da Europa, onde se efetuaram os ensaios descritos na avaliação estática: a) local de posicionamento dos dispositivos, b) meio envolvente. . . . .	68
5.2	Gráfico da taxa de receção de pacotes em função da distância entre dispositivos . . . . .	69
5.3	Gráfico do tempo de descoberta e validação da mensagem em função da distância entre dispositivos . . . . .	70
5.4	Gráfico da potência do sinal recebido em função da distância entre dispositivos . . . . .	71
5.5	Avenida do Aeródromo, onde se realizou a validação apresentada nas secções 5.2.1 e 5.2.2. . . . .	72
5.6	Esquemático da validação efetuadas na primeira fase dos testes dinâmicos. . . . .	72
5.7	Disposição no interior do veículo do tablet e do dispositivo anexável. . . . .	73
5.8	Diagrama representativo da obtenção dos resultados nos testes dinâmicos. . . . .	74
5.9	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	75
5.10	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 65m até ao semáforo. . . . .	75
5.11	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	76
5.12	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 65m até ao semáforo. . . . .	76
5.13	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	77
5.14	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 65m até ao semáforo. . . . .	77
5.15	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	78
5.16	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 65m até ao semáforo. . . . .	78
5.17	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	79

5.18	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 65m até ao semáforo.	79
5.19	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	80
5.20	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 65m até ao semáforo.	81
5.21	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	81
5.22	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 65m até ao semáforo.	82
5.23	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	82
5.24	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 65m até ao semáforo.	83
5.25	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	83
5.26	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 65m até ao semáforo.	84
5.27	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo. . . . .	84
5.28	Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 65m até ao semáforo.	85
5.29	Gráfico da comparação entre o número de receções corretas feitas, em todo o percurso, em função da velocidade. A verde do dispositivo anexável. A azul da aplicação. . . . .	87
5.30	Disposição dos dispositivos na interseção em teste. . . . .	87
5.31	Gráfico da evolução do tempo de atualização com a aproximação da interseção recorrendo ao tablet com o aplicativo. . . . .	89
5.32	Gráfico da evolução do tempo de atualização com a aproximação da interseção recorrendo ao conjunto com módulo RN4020 e Raspberry Pi. . . . .	90



# Lista de Tabelas

4.1	Tabela da relação entre comandos de ação e alteração do papel GAP [7] . . .	50
4.2	Tabela da correspondência de estados e valor de checksum . . . . .	52
5.1	Tabela do resumo das características estudadas nos testes dinâmicos com o uso da aplicação . . . . .	85
5.2	Tabela do resumo das características estudadas nos testes dinâmicos com o uso do conjunto anexável . . . . .	86
5.3	Tabela do resumo das características estudadas na aproximação à interseção com o uso da aplicação . . . . .	88
5.4	Tabela do resumo das características estudadas na aproximação à interseção com o uso do conjunto anexável . . . . .	88





# Acrónimos

<b>AFH</b>	Adaptative Frequency Hopping
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>ASCII</b>	American Standard Code for Information Interchange
<b>ATT</b>	Attribute Protocol
<b>BLE</b>	Bluetooth Low Energy
<b>BRAN</b>	Broadband Radio Access Networks
<b>BR/EDR</b>	Basic Rate/Enhanced Data Rate
<b>BSM</b>	Basic Safety Message
<b>BTP</b>	Basic Transport Protocol
<b>CCH</b>	Control CHannel
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>CAM</b>	Cooperative Awareness Message
<b>CSMA/CA</b>	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>DCC</b>	Decentralized Congestion Control
<b>DENM</b>	Decentralised Environmental Notification Message
<b>DFS</b>	Dynamic Frequency Selection
<b>DSRC</b>	Dedicated Short-Range Communications
<b>EUA</b>	Estados Unidos da América
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>GAP</b>	Generic Access Profile
<b>GATT</b>	Generic Attribute Profile
<b>GFSK</b>	Gaussian Frequency-Shift Keying
<b>GPIO</b>	General Purpose Input/Output

<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HCI</b>	Host Controller Interface
<b>HCM</b>	Highway Capacity Manual
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>IoT</b>	Internet of Things
<b>Ipv6</b>	Internet Protocol version 6
<b>ISM</b>	Industrial Scientific and Medical
<b>ITS</b>	Intelligent Transport Systems
<b>LE</b>	Low Energy
<b>LLC</b>	Logic Link Control
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>L2CAP</b>	Logical Link Control and Adaptation Protocol
<b>MAC</b>	Media Access Control
<b>MANET</b>	Mobile Ad Hoc Network
<b>MATLAB</b>	MATrix LABoratory
<b>MIC</b>	Message Integrity Check
<b>M2M</b>	Machine-to-Machine
<b>NFC</b>	Near Field Communication
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OSI</b>	Open Systems Interconnection
<b>PAN</b>	Personal Area Network
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit
<b>RLAN</b>	Radio Local Area Network
<b>SCH</b>	Service CHannel
<b>SIG</b>	Special Interest Group
<b>SIT</b>	Sistemas Inteligentes de Transporte
<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>TDM</b>	Time-division Multiplexing

<b>UART</b>	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
<b>UDP</b>	User Datagram Protocol
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>UTC</b>	Universal Time Coordinated
<b>UUID</b>	Universal Unique Identifier
<b>VANET</b>	Vehicular Ad hoc Network
<b>VTL</b>	Virtual Traffic Light
<b>V2I</b>	Vehicle-to-Infrastructure
<b>V2V</b>	Vehicle-to-Vehicle
<b>WAVE</b>	Wireless Access in Vehicular Enviroments
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity
<b>WLAN</b>	Wireless Local Area Network
<b>WSMP</b>	WAVE Short Message Protocol
<b>3G</b>	Third Generation
<b>4G</b>	Fourth Generation
<b>5G</b>	Fifth Generation



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O conceito de mobilidade não é recente. A necessidade de transportar bens e pessoas está, desde sempre, associada ao próprio desenvolvimento da humanidade, fazendo com que a criação de meios que o permitissem fosse uma preocupação constante.

Graças a esta permanente busca de satisfazer as necessidades da sociedade e melhorar as condições de mobilidade possuímos, hoje em dia, meios de transporte eficazes, seguros e confortáveis, tornando o veículo indispensável na nossa rotina diária. Isto pode ser constatado através dos dados sobre o número de veículos existentes a nível mundial. Este valor tem crescido constantemente, e em 2010 atingiu a marca dos mil milhões de unidades, mais precisamente, 1.015 mil milhões, o que corresponde a um rácio de 1:6.75 carros para pessoas [8]. Mas a sua produção e venda continua a crescer, de acordo com [9] o número de automóveis vendidos em 2014 e 2015 ultrapassou a marca dos 70 milhões de unidades e as estimativas apontam para um crescimento significativo em 2016 e 2017, aproximando-se dos 80 milhões de veículos vendidos.

O incremento de veículos nas estradas, associado ao grande crescimento populacional, faz com que a situação nos centros urbanos se torne crítica. O stress vivido pelo condutor, nomeadamente em situações de congestionamento, a falta de segurança que muitas vezes existe, tanto na relação veículo-veículo (V2V) como veículo-pedestre, e as exigências a nível ambiental, são problemáticas que têm despertado a atenção e preocupação da sociedade.

Estatísticas da União Europeia sobre sinistralidade revelam que em 2015, 26112 pessoas morreram nas estradas europeias e foram estimados 135000 feridos graves. Apesar de se ter detetado uma diminuição das fatalidades rodoviárias de 2010 a 2015, cerca de menos 17% de mortes, esse padrão de progresso não foi constante. Nos anos 2013, 2014 e 2015 não se verificaram grandes melhorias, tendo o panorama de segurança rodoviária estagnado [10].

Se compararmos a sinistralidade nas auto-estradas, estradas rurais e urbanas, verifica-se ainda, que 37% das fatalidades rodoviárias ocorreram em meios urbanos, sendo este o segundo ambiente mais trágico. Observou-se também que o maior número de acidentes envolve a utilização de carros, cerca de 46%, logo seguido pelos que envolvem pedestres. Cerca de 21% das pessoas mortas nas estradas foram pedestres. Estes são um dos grupos mais vulneráveis de utilizadores das estradas e é onde se tem verificado maior dificuldade em reduzir a taxa de mortalidade [10].

Considerando que estes valores estão aquém dos ideais, têm sido levadas a cabo diversas

investigações, em variados setores, com o propósito de obter soluções que melhorem a monitorização dos ambientes rodoviários, visando o aumento da segurança das vias e a consequente redução do número de mortes nas estradas.

Neste contexto, as Comunicações Veiculares têm sido um tópico importante de estudo e investigação no âmbito dos sistemas de transporte inteligentes. Elas permitem a comunicação sem fios entre veículos e infraestruturas [2].

O crescente interesse pelo seu estudo levou à publicação de dois standards para as comunicações veiculares. O standard Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE), definido pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) e o ITS-G5, desenvolvido pelo European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Ambos se baseiam no protocolo IEEE 802.11p [11].

Apesar de existirem estes dois standards definidos, dedicados exclusivamente às aplicações veiculares, é estudada paralelamente a viabilidade da aplicação de outras comunicações de curto e médio alcance, nas comunicações veiculares.

Tem sido ainda investigada a possibilidade de integrar objetos do nosso uso diário, como por exemplo, os smartphones, neste tipo de comunicações.

O smartphone é, hoje em dia, um dispositivo que acumula uma imensidão de funções e estas podem ser utilizadas em benefício das aplicações em ambientes veiculares, como o caso do Global Positioning System (GPS) e as diversas vias de comunicações sem fios já integradas nos mesmos. Além disso, o smartphone é uma boa interface com o condutor por ser, atualmente, um dispositivo acessível e que já faz parte da rotina diária da maioria das pessoas [12].

Estes são alguns aspetos que podem facilitar a introdução de novos métodos de condução ao promover, por exemplo, o uso de uma aplicação de apoio ao condutor em ambientes urbanos.

O objetivo é sempre obter a melhor solução tanto do ponto de vista tecnológico, como das necessidades do consumidor final. Assim, é desejável uma solução útil e inovadora que não obrigue a encargos financeiros muito elevados [13].

## 1.2 Objetivos

Partindo da ideia principal de intervir nos sistemas semaforicos, nomeadamente integrando uma nova tecnologia de comunicação que permita deixar de depender das ligações físicas, bem como dos displays atuais, delinearam-se alguns objetivos apresentados de seguida:

- Conhecer o funcionamento e estrutura dos sistemas semaforicos atuais.
- Perceber de que modo se pode intervir no sistema semaforico e tirar maior partido dos avanços tecnológicos, sem comprometer a sua eficácia.
- Conhecer os requisitos exigidos às comunicações utilizadas nas Vehicular Ad hoc Networks (VANET) avaliando se o Bluetooth Low Energy (BLE) preenche os requisitos mínimos para considerar o seu uso em ambientes veiculares.
- Desenhar um sistema, com base na comunicação Veículo-Infraestrutura que substitua os semaforos físicos exteriores para veículos, passando essa informação para o seu interior, considerando também a presença e coordenação do movimento de peões, numa interseção.

- Implementar o protótipo através da programação de um controlador, um retransmissor extensor de sinal e duas alternativas de interface com o condutor, sendo estas com recurso a um aplicativo desenvolvido em *Android Studio* apenas com o intuito de avaliar a interação do BLE do telemóvel no interior do carro com módulos externos e outra alternativa anexável ao veículo com módulos semelhantes aos restantes utilizados.
- Definir e executar testes iniciais do funcionamento do sistema proposto com o emprego exclusivo dos canais de anúncio do BLE.
- Testar o protótipo em diversos cenários no exterior, aproximando as condições de teste às condições dos cenários reais, propostos para aplicação deste sistema.

### 1.3 Estrutura

Esta dissertação divide-se em seis capítulos que permitem sistematizar o trabalho desenvolvido:

- Capítulo 1 – A introdução ao tema, a especificação das motivações que levaram à sua escolha e a definição dos objetivos que se pretende atingir, constituem este capítulo.
- Capítulo 2 – O estado da arte remete para a pesquisa realizada, resumando os conhecimentos que serviram de base para estruturar este projeto, fundamentalmente sobre as diferentes tecnologias utilizadas nas VANET e algumas das alternativas em debate, em particular, o BLE.
- Capítulo 3 – Expõe a concetualização teórica e a arquitectura proposta para aplicação do BLE em sistemas semaforicos.
- Capítulo 4 – Trata da explicação detalhada do sistema proposto, do ponto de vista técnico, especificando a sua aplicação prática.
- Capítulo 5 – São descritos os vários cenários de teste e explanados os resultados obtidos no sentido de validar o seu funcionamento.
- Capítulo 6 – Apresenta as conclusões gerais que permitem verificar os objetivos alcançados e remete para propostas de novos trabalhos que podem contribuir no desenvolver do conhecimento relativamente aos Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT).





## Capítulo 2

# Estado da Arte

Este capítulo introduz o conceito de sistemas inteligentes de transporte indicando em que consistem e salientando o seu impacto social, bem como a importância da criação de standards que suportem o desenvolvimento destas aplicações. Abordam-se ainda os sistemas de semáforos e por fim enumeram-se alguns trabalhos relacionados e considerados relevantes no contexto da presente dissertação.

Atendendo a que o foco principal deste trabalho se encontra na intervenção em comunicações sem fios, no âmbito veicular, particularmente na comunicação veículo-infraestrutura, impõe-se a realização de um estudo prévio de diagnóstico da situação atual relativamente à aplicação de tecnologias no contexto rodoviário, nomeadamente a análise de requisitos e desafios que a temática envolve assim como a de soluções semelhantes já propostas e/ou desenvolvidas.

Esta abordagem revela-se importante em locais de visibilidade reduzida ou mudanças de direção em que a necessidade de manter o condutor antecipadamente informado da situação rodoviária pode contribuir para uma melhoria do tráfego em ambientes urbanos.

Face ao interesse e importância dados a esta área do conhecimento, na atualidade, têm-se levado a cabo estudos e projetos para sistemas que visam melhorar a qualidade do ambiente veicular, conduzindo à necessidade de definir e dedicar uma largura de banda a este tipo de comunicações. Neste contexto, abordam-se alguns standards definidos especificamente para comunicações veiculares, bem como tecnologias comunicacionais alternativas já consideradas. Apresentam-se ainda os sistemas semaforicos atuais, como ponto de partida importante para perceber que aspetos se podem adaptar e melhorar com recurso a novas tecnologias e como fazê-lo.

### 2.1 Sistemas Inteligentes de Transporte

O conceito de Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) baseia-se na otimização dos sistemas de transporte existentes, através da implementação de novas tecnologias que possibilitem o desenvolvimento de funcionalidades úteis, neste contexto. Nos dias que correm, uma das fortes motivações ao investimento nesta área é o desenvolvimento de funções que permitam aumentar a segurança rodoviária, pois há uma preocupação constante com os valores de acidentes verificados, surgindo uma pressão tanto ao nível social como dos governantes para que se concentrem esforços para a redução da sinistralidade rodoviária. Apesar de este ser um dos principais focos de trabalho em torno dos SIT, não é o único, sendo também concebidas

aplicações mais direcionadas para o conforto, comodidade, simplicidade de condução e circulação em meios urbanos, acabando estes aspetos por se refletir em diversas vertentes, como por exemplo a ambiental.

Os anos 80 trouxeram grandes avanços na criação de soluções de SIT [14], quando diversos grupos do setor dos transportes se aperceberam do impacto que poderia ter a integração da informática e das telecomunicações no seu ramo, perspectivando uma nova era em que tudo estaria informatizado.

Já anteriormente a este período haviam sido elaborados projetos direcionados à implementação de SIT, mas dada a inexistência de tecnologia capaz de dar resposta ao desenvolvimento dos mesmos, as soluções não eram atrativas, tendo a sua evolução sido lenta [15].

Estes sistemas permitem não só a comunicação entre veículos como ainda com infraestruturas presentes ao longo das vias. Conseguem-se assim a troca de informações entre o interior dos veículos e o seu meio envolvente, possibilitando uma condução mais assistida, tornando o transporte de bens e pessoas mais simples, seguro e eficiente.

Embora o grande foco de aplicação de SIT sejam os transportes terrestres, também é possível encontrar sistemas inteligentes em transportes marítimos e aéreos. São exemplo disso os sistemas de rádio de localização, navegação, colisão e deteção de obstáculos [16]. Estes encontram-se, hoje em dia, completamente integrados em navios e aviões tendo um papel de elevada importância tanto na segurança da tripulação como na assistência ao piloto.

A sua influência não se limita apenas a sistemas de grande escala, atualmente é fácil apercebermo-nos da sua existência no dia-a-dia. Presentemente os veículos estão fortemente equipados com dispositivos eletrónicos que permitem melhorar o conforto e a segurança, como sejam sistemas de navegação e notificação [14]. Também nas vias rodoviárias pode ver-se o impacto dos SIT, através da instalação de sistemas de cobrança automáticos como a Via Verde [15], as Scuts e num ambiente mais urbano, os semáforos com controlo de velocidade.

De acordo com [15] e [14] a evolução deu-se em torno de três problemas chave, a segurança rodoviária, o impacto ambiental dos sistemas de transporte e a eficiência do transporte. A preocupação com a segurança das pessoas nas vias tem-se intensificado com o crescimento populacional e o conseqüente aumento do número de veículos nas estradas. A má gestão de peões e condutores leva a situações caóticas e confusas mais propícias, por isso, à ocorrência de acidentes. E se, nos locais onde isto se verifica, o cenário é mais preocupante e grave, não significa que em países mais organizados e desenvolvidos a situação seja a ideal.

Verificou-se que apesar dos países europeus terem as estradas mais seguras [10], onde as redes de transporte estão bem estruturadas e organizadas e há um grande incentivo à educação para a segurança rodoviária, o número de fatalidades, ocorridas até 2015, continua muito superior ao valor pretendido para 2020 [10]. Pelo que a implementação de soluções de SIT podem trazer grandes vantagens ao incremento da segurança. Estas podem proporcionar mais informação ao condutor, em tempo real, sobre as condições onde circula, como por exemplo, a existência de acidentes ou obstáculos na via, alertando para situações de perigo ainda antes deste ter visibilidade para elas. É possível obter-se, assim, a redução do número de acidentes bem como da sua gravidade.

Se o transporte é indiscutivelmente vital para a sociedade dando-nos mobilidade e a capacidade de aceder rapidamente aos locais desejados, a sua utilização excessiva e desregrada tornou-o numa das principais causas dos graves problemas ambientais do planeta que se vão sentindo e discutindo. Também na tentativa de reduzir esse impacto, os SIT têm dado um importante contributo ao desenvolver soluções que permitem reduzir o consumo de combustíveis e conseqüentemente a emissão de gases nocivos para a atmosfera. Como exemplo temos as

aplicações ou sistemas integrados nos veículos, que informam sobre o trajeto mais curto e notificam sobre congestão de trânsito permitindo evitar estas situações.

Quanto à eficiência do transporte esta pode ser aumentada com a aplicação de inovações tecnológicas de SIT que recolhem informação do ambiente envolvente do veículo, desde condições meteorológicas, posicionamento do veículo no espaço, congestionamento, desvios e acessos alternativos disponíveis, entre outras. Ao conjugar toda esta informação é possível realizar o serviço de transporte da forma mais eficaz, através de uma melhoria na relação tempo/custo da viagem, obtendo uma qualidade de serviço superior. Também se percebe facilmente que a eficiência dos sistemas de transporte influenciam diretamente a redução do impacto ambiental.

## 2.2 Standards para Comunicações Veiculares

Como tem sido mencionado, o elevado interesse pelo desenvolvimento de soluções de SIT serviu também para impulsionar o estudo e investigação em torno das comunicações veiculares e como consequência a sua standarização, pois estas são um ponto-chave para uma boa cooperação e interação entre todos os elementos presentes no ambiente rodoviário.

Quando se fala em comunicações veiculares, trata-se das comunicações sem fios que possibilitam a transmissão de informação de veículo para veículo, do inglês Vehicle-to-Vehicle (V2V) ou de veículo para infraestrutura, em inglês Vehicle-to-Infrastructure (V2I) numa VANET. A VANET é uma variante de uma Mobile Ad Hoc Network (MANET) pois, em ambas os nós da rede são móveis mas na VANET têm a particularidade de serem os próprios automóveis e é entre os mesmos que se faz a troca de informação. Dada a potencial elevada velocidade a que circulam tornam a topologia da rede altamente dinâmica e isso levanta inúmeros desafios que não se encontram numa MANET [17].

As Dedicated Short-Range Communications (DSRC) foram criadas especificamente para satisfazer as necessidades das VANET, tendo a capacidade de cobrir distâncias até aos 1000m [18] (distância recomendada para que seja mantida a qualidade do serviço exigido a estas comunicações). Antes da regulamentação das DSRC, nos Estados Unidos da América (EUA) já haviam sido desenvolvidos alguns projetos para serviços de SIT, alocados na altura, nas bandas dos 902MHz e 928MHz. Constatou-se porém que a largura de banda não só era reduzida para tais aplicações como também se encontrava bastante poluída. Naturalmente surgiu um pedido para a definição de uma banda específica para aplicações no âmbito veicular e foi então que as DSRC foram definidas [19].

A banda de espectro dedicada a estas comunicações difere dos Estados Unidos da América (EUA) para a Europa. Nos EUA foram alocados 75MHz, nos 5.9GHz, enquanto na Europa foram atribuídos 325MHz. Na figura 2.1 é possível visualizar a divisão espectral dessa largura de banda tanto para os EUA como para a Europa [18].

Nos EUA existem 7 canais com 10MHz de largura e uma banda guarda de 5 MHz, descrita na legenda da figura 2.1 a) como reservado. Na Europa a divisão em canais de 10MHz mantém-se, bem como a distinção em 7 canais. É de salientar ainda que destes canais, 3 (Service CHannel (SCH) 1, SCH2 e Control CHannel (CCH)) estão reservados à segurança rodoviária e os restantes dedicam-se a serviços genéricos. Para além dos canais definidos existe uma banda ITS-G5C, de 255MHz, conhecida também como banda RLAN/WLAN/BRAN, onde são requeridos controlo da potência transmitida e mecanismos de gestão do espectro (dynamic frequency selection (DFS) e uniform spreading) para deteção de sinais de sistemas de radar e outras possíveis interferências por forma a evitá-las, pois esta banda é partilhada [20].

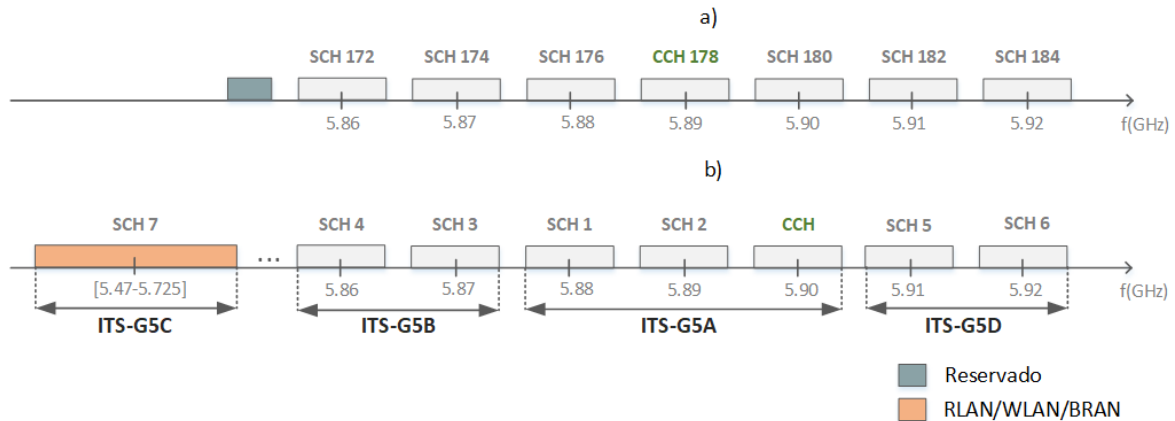


Figura 2.1: Representação da banda na gama dos 5.9GHz, com a divisão em SCH e CCH. Em a) nos EUA em b) na Europa.

Existem dois protocolos maioritariamente utilizados para comunicações veiculares e que se baseiam nas DSRC. Na secção 2.2.1 serão descritos em detalhe.

## 2.2.1 IEEE WAVE e ETSI ITS-G5

No seguimento da standarização de arquiteturas como resposta às necessidades dos cenários rodoviários, foi sugerida a adoção de um único standard para as camadas física e de controlo de acesso ao meio, do inglês Media Access Control (MAC) sendo que estas se basearam no IEEE 802.11. Posteriormente este protocolo foi alterado por um grupo de trabalho procurando adequar o seu uso a ambientes veiculares e passou a existir o IEEE 802.11p. Neste recai a camada física e MAC de ambas as stacks protocolares aqui apresentadas: IEEE WAVE e ETSI ITS-G5, conhecidas nos EUA e na Europa, respetivamente [18], [19].

A figura 2.2 representa as arquiteturas WAVE e ITS-G5.

A camada física usa Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) como técnica de modulação, podendo destacar-se que esta corresponde à camada 1 do modelo Open Systems Interconnection (OSI). A taxa de transmissão de dados pode variar de 3 a 27Mbit/s. Por sua vez a camada MAC, correspondente à camada 2 do modelo OSI, usa Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance CSMA/CA como o mecanismo de acesso ao canal [17], [21].

Como já foi referido, nas arquiteturas WAVE e ITS-G5 tanto a camada física como a MAC têm suporte no IEEE 802.11p, mas é importante salientar que não é toda a camada MAC, mas sim uma subcamada da camada, a subcamada inferior. As camadas adicionais e superiores a essas são definidas por diferentes standards. Relativamente à WAVE as camadas adicionais e superiores foram definidas por um outro grupo de trabalho estando especificadas nos standards IEEE 1609.1-4 [19], [21], [22]. Na figura 2.2 observam-se quais os standards IEEE 1609.x que suportam cada camada. A ITS-G5 suporta-se num grande conjunto de normas e relatórios técnicos disponibilizadas pela ETSI, onde se encontram diversas especificações para as camadas, havendo por vezes mais do que uma norma que deve ser considerada para uma camada. Sobressai ainda, relativamente às stacks da figura 2.2, que os blocos de serviços de segurança bem como de gestão de recursos não têm correspondência na arquitetura do

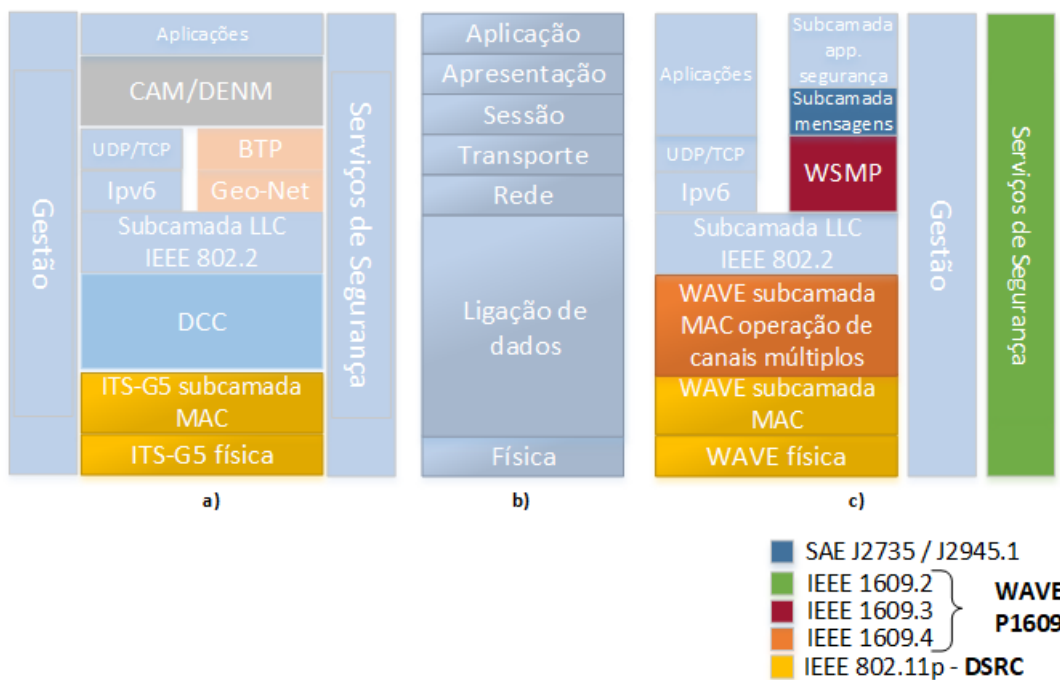


Figura 2.2: Representação das arquiteturas dos standards referidos, a) relativa ao standard ITS-G5, em b) o modelo OSI e em c) as camadas protocolares WAVE

modelo OSI.

A subcamada MAC superior na WAVE é especificada no IEEE 1609.4 e é dedicada ao controlo da operação dos canais de serviço e do canal de controlo. Quanto ao ITS-G5, esta utiliza o Decentralized Congestion Control (DCC) como protocolo para controlar o tráfego da rede ad-hoc, modificando as regras de acesso ao canal mediante a carga que se verifica na rede. Isto permite evitar sobrecargas no canal que podem por em causa as aplicações de segurança [23]. Acima dessa existe a última subcamada relativa ao nível 2 do modelo OSI, igual nos dois standards, que é a Logical Link Control (LLC) baseada no standard 802.2.

Observando as camadas superiores consegue facilmente distinguir-se uma subdivisão das stacks, passando a ter uma *dual stack*. Na IEEE WAVE, esta divisão existe para dar resposta a aplicações sensíveis temporalmente ou não. Isto é, existe um mecanismo de envio de mensagens específico para transmissão com reduzida latência, esse mecanismo recorre ao WAVE Short Message Protocol (WSMP), baseado no IEEE 1609.3. A transmissão de mensagens nos restantes casos utiliza o Transmission Control Protocol/User Datagram Protocol (TCP/UDP). Para viabilizar o acesso à internet, que não seria possível utilizando o WSMP, existe o Internet Protocol version 6 (Ipv6) [19], [24].

Olhando agora em maior detalhe para as camadas de rede e transporte da ETSI ITS-G5, pode observar-se, que uma parte da *dual stack* é igual à WAVE, tendo suporte Ipv6 e no TCP/UDP. A outra metade da camada de rede e transporte recorre ao protocolo de *Geo-Networking* e Basic Transport Protocol (BTP). O *Geo-Networking* permite o encaminhamento dos pacotes de dados com base na geolocalização dos nós presentes na rede. Acima deste encontra-se o BTP que disponibiliza um serviço de transporte de ponto-a-ponto e sem conexão. Tem ainda a função de fazer a multiplexagem e desmultiplexagem de mensagens

permitindo a troca de informação da camada de *Geo-Networking* com as superiores (dos recursos), e vice-versa. É um protocolo, que tal como o UDP, oferece serviços mínimos de transporte, não sendo garantida a entrega da informação ao outro dispositivo fiel ao que foi transmitido [23], [25].

Na camada superior encontra-se a definição de mensagens específicas que serão utilizadas para as diversas aplicações ao abrigo de cada stack. No caso da WAVE o formato destas mensagens será de acordo os standards SAE, que para o caso das aplicações serem de segurança, define uma Basic Safety Message (BSM). No que diz respeito à ITS-G5, existe a definição de dois tipos distintos de mensagens: as Cooperative Awareness Message (CAM) e Decentralised Environmental Notification Message (DENM). As CAM são mensagens que devem ser difundidas periodicamente, pois o seu objetivo é de enviar dados com informações relativas ao veículo que as transmite. As DENM são mensagens que visam alertar os condutores para eventos assíncronos e detetados nas estradas [18].

Apesar das DSRC serem as mais utilizadas nos projetos desenvolvidos para cenários rodoviários, dado que permitem aplicações com elevada segurança, fiabilidade e comunicações com baixa latência, segundo [24] e [26] o desenvolvimento e difusão de sistemas que recorram ao uso dos standards WAVE e ITS-G5 tem sido mais lento do que o esperado. As causas estão relacionadas com o seu elevado custo, a difícil implementação e a ausência de aplicações suficientemente atrativas para que o condutor as deseje adotar.

No sentido de fazer face a estes problemas têm-se estudado novos métodos e técnicas alternativas que possam contribuir para acelerar o processo de disseminação dos SIT.

Entre os meios de comunicação alternativos que têm sido estudados, nem sempre o objetivo é a substituição completa dos standards expostos anteriormente, mas sim complementá-los de forma a colmatar as suas falhas ou melhorar os aspetos menos atrativos.

## 2.2.2 Alternativas

Tal como já se expôs anteriormente, e segundo [26] os smartphones integram tecnologias com a capacidade de substituir o uso dos dispositivos que viabilizam as DSRC e por isso surgem em algumas das alternativas consideradas.

Refere-se ainda que a tecnologia celular é uma das alternativas que apresentam maior potencial para ser utilizada nas comunicações veiculares. A 4G Long Term Evolution (LTE) e ainda a emergente 5G permitem uma conectividade de confiança, com baixa latência e elevada taxa de transmissão de dados. Para além disso, as infraestruturas necessárias para obter uma rede celular já se encontram instaladas o que permite dispor de uma grande cobertura territorial.

No entanto, também se podem levantar alguns desafios na aplicação desta tecnologia. Desde logo a arquitetura centralizada que a caracteriza pode fazer que com o elevado fluxo de dados, causado pelo acréscimo das comunicações veiculares, leve a sobrecargas comprometendo a correta e veloz troca de informação. Faz também uso de uma banda de espectro que é licenciada obrigando a acréscimos no custo, ao contrário das tecnologias que usam espectro das bandas Industrial Scientific and Medical (ISM). A 3G de redes celulares não deve ser resposta para aplicações de segurança uma vez que se verificam elevados níveis de latência, comportamento indesejado para transmitir informação crítica atempadamente [24].

Outra possibilidade considerada é o Wi-Fi. Tal como nas redes celulares, neste caso, também já existe grande quantidade de infraestruturas espalhadas que permitem usufruir do acesso à mesma. Este aspeto, associado ao reduzido custo dos equipamentos necessários

para viabilizar a comunicação constituem uma vantagem pois o processo de distribuição, desenvolvimento e teste torna-se mais ágil, uma vez que é simples, rápido e com custo reduzido comparativamente às DSRC.

Podem encontrar-se também algumas limitações associadas a esta alternativa, pois determinados standards do Wi-Fi operam na banda não licenciada ISM nos 2.4GHz, o que embora não implique custo acrescido para uso da largura de banda pode levantar problemas de interferência com outros dispositivos que façam uso da mesma gama do espectro. A taxa de transmissão de dados também é variável entre os diversos standards da família Wi-Fi, mas em ambientes com elevada densidade de veículos, a capacidade de transmissão de dados pode ficar comprometida. O alcance das comunicações é também mais reduzido relativamente ao das DSRC [24], [22].

A comunicação Zigbee também tem sido uma alternativa fortemente estudada, embora não exista nos smartphones atuais tecnologia integrada que permita comunicar por esta via. Os módulos Zigbee usam a banda não licenciada e sem custos dos 2.4GHz, pelo que o seu custo não é elevado e o consumo energético também é baixo. A sua implementação em rede requer menos infraestruturas quando comparada com as outras alternativas expostas. Estes fatores pressupõem um encargo financeiro mais reduzido e à partida permitiriam o seu rápido desenvolvimento porém, esta tecnologia foi desenhada para uma Personal Area Network (PAN), daí que o elevado número de utilizadores pode afetar a performance dos SIT baseados em Zigbee [24].

Para além das três alternativas descritas, pode ainda em [22] ver-se a uma breve descrição e comparação de outras tecnologias aplicáveis às VANET, entre elas, o BLE.

O BLE foi desenvolvido maioritariamente para permitir a comunicação sem fios entre dispositivos móveis e sensores, garantindo um reduzido consumo energético. As suas aplicações comuns são em áreas de fitness, saúde e casas inteligentes. Não existe muita investigação e avaliação focada no uso do BLE em aplicações veiculares, mas apesar de não ter sido criado para aplicações deste tipo tem características que podem ser interessantes explorar nos ambientes rodoviários. Exemplo disso é o facto de estar já integrado nos rádios de muitos smartphones, proporcionando grande acessibilidade a dispositivos que distribuam o sistema. O facto de este standard ter uma particular atenção ao consumo energético, comparativamente ao Wi-Fi ou mesmo aos standards DSRC, oferece uma grande vantagem na integração do mesmo no veículo e infraestruturas, pois as exigências energéticas não são tão elevadas e permite que estas aplicações consigam correr nos dispositivos móveis com bateria, em simultâneo com outras sem as limitar. Destacam-se também a transmissão de dados com baixa latência e a hipótese de fazer a troca dos dados sem que haja uma conexão estabelecida. O alcance conseguido através do uso do BLE é mais reduzido quando comparado com as DSRC, ainda assim é superior ao Bluetooth clássico disponibilizando a possibilidade de atingir a cobertura de determinadas áreas do ambiente rodoviário, como acontece numa interseção [27].

## 2.3 Bluetooth Smart

Bluetooth Smart, também conhecida como (BLE), é uma tecnologia para comunicações sem fios de curta distância, desenvolvida pelo Bluetooth Special Interest Group (SIG) e introduzida pela primeira vez em 2010 [4]. Desde a sua especificação inicial, na versão Bluetooth 4.0 [3], já sofreu algumas alterações e melhoramentos. Esta versão foi desenvolvida com base nos requisitos exigidos pelas aplicações Máquina-para-Máquina, do inglês, Machine-to-

Machine (M2M), e Internet das Coisas, Internet of Things (IoT), em inglês. Neste tipo de aplicações a transferência de dados faz-se em reduzida quantidade e ocorre em períodos irregulares de tempo, pelo que os dispositivos podem estar ativos apenas quando têm alguma ação a efetuar. Salienta-se ainda, que o consumo energético é um fator muito importante, pois quanto mais reduzido for mais autónomos os equipamentos se tornam. Em alguns casos as baterias podem durar anos, dado os reduzidos períodos de atividade exigidos.

Apesar do BLE se ter desenvolvido a partir do Bluetooth clássico ou Basic Rate/Enhanced Data Rate (BR/EDR), as mudanças introduzidas permitiram reduzir o consumo energético, através das baixas taxas de transferência de dados e dos baixos duty cycles e ainda diminuir o custo dos produtos, bem como obter maior simplicidade na sua implementação [3]. Deste modo, o SIG conseguiu apresentar uma solução para comunicações sem fios de curta distância, aplicando a tecnologia Bluetooth, e viabilizando a sua utilização em aplicações IoT e M2M.

Esta versão, Bluetooth Smart, foi adoptada por muitas empresas de produção de módulos hardware tais como a Texas Instruments ou a Nordic Semiconducters mas também integrada por grandes marcas de produção de smartphones como a Samsung e a Apple, entre outras [28]. Este aspeto, torna a utilização do BLE muito atrativa, face a outras comunicações sem fios de curta distância, uma vez que já se encontra integrado em muitos sistemas, e podem ser utilizados como interface com o consumidor final.

No projeto desenvolvido, este foi um fator decisivo na escolha da comunicação a utilizar, pois permite o uso do smartphone para comunicar ao condutor o estado do semáforo através do Bluetooth. O condutor pode utilizar o seu próprio smartphone, que já está habilitado com BLE. Trata-se duma solução que não exige a introdução de novos dispositivos no veículo, por isso é pessoal e emprega uma ferramenta já presente no dia-a-dia de grande parte da população. Nas situações em que não exista o desejo ou a possibilidade de utilizar o smartphone é ainda possível a implementação do sistema no veículo recorrendo a módulos de hardware para viabilizar a comunicação.

### 2.3.1 Descrição da stack protocolar

Esta tecnologia funciona através da interação de diferentes protocolos numa organização específica. A figura 2.3 representa a stack protocolar do BLE. A sua disposição em controlador e anfitrião não foi uma mudança introduzida na versão 4.0, já no standard BR/EDR havia esta clara distinção.

Conhecer as camadas constituintes, tanto do controlador como do anfitrião, permite compreender o seu funcionamento.

As três camadas inferiores: camada física (Physical Layer), camada de ligação (Link Layer) e modo de teste direto (Direct Test Mode), estão agrupadas, constituindo o controlador Bluetooth. A interação do controlador com o anfitrião é feita através da camada de interface anfitrião controlador, Host Controller Interface, (HCI), as camadas superiores constituem o anfitrião cujo protocolo de adaptação e controlo da ligação lógica, Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP) garante a qualidade da informação nas camadas superiores. Existem ainda o protocolo dos atributos, Attribute Protocol (ATT), o gestor de segurança (Security Manager), o perfil dos atributos genéricos, Generic Attribute Profile (GATT) e o Generic Access Profile (GAP). Ao longo da descrição serão utilizados os acrónimos dos nomes das camadas em inglês para as referir.



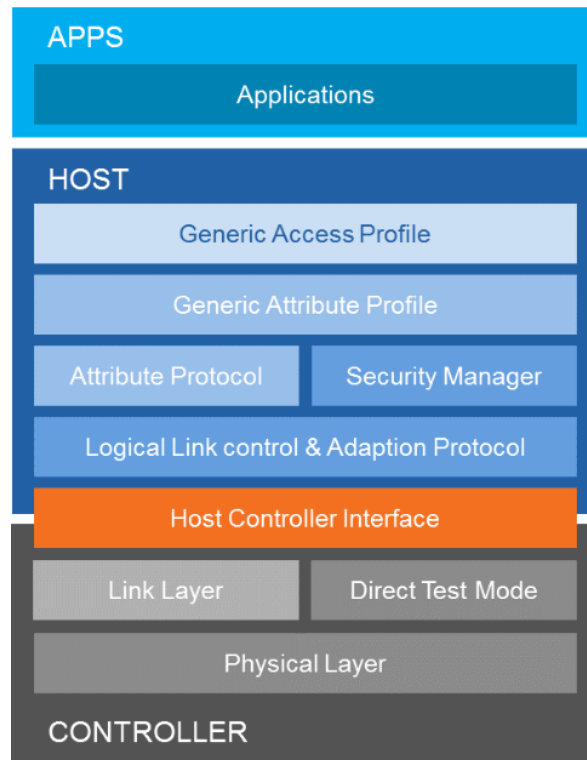


Figura 2.3: Stack protocolar do BLE [1]

### Camada Física

O BLE, tal como o BR/EDR, opera numa banda rádio ISM, não licenciada, nos 2.4GHz. Faz uso da técnica de Adaptive Frequency Hopping (AFH), em todos os seus canais para a transmissão de dados, que ajuda a tornar o sinal transmitido mais robusto e fiável, adaptando-se a interferências que possam surgir, nomeadamente pelos canais de Wi-Fi. O esquema de modulação utilizado é Gaussian Frequency-Shift Keying (GFSK). A taxa de transmissão de dados suportada pelo BLE é de 1Mb/s, enquanto que no BR/EDR variava de 1 a 3Mb/s. O BLE apresenta também uma redução dos canais físicos que passaram de 79, cada um com uma largura de banda de 1 MHz, para 40, agora com largura de banda de 2Mhz. O espectro do BLE encontra-se representado na figura 2.4.

Os canais distinguem-se em dois tipos diferentes: canais de anúncio que são três e canais de dados, os restantes 37 [2].

Os canais de anúncio são dedicados à descoberta e ao estabelecimento da comunicação inicial entre dois dispositivos, e ainda fazer a transmissão de dados, sem que haja uma conexão estabelecida. Dada a importância dos canais de anúncio para o início da comunicação de dispositivos BLE, as frequências dos mesmos foram especificamente escolhidas tendo em consideração os canais que sofreriam menor interferência por parte do sinal Wi-Fi [13]. Como só existem três canais dedicados à deteção e início de uma conexão, este processo torna-se mais rápido que no Bluetooth clássico.

Os canais de dados são usados para a transferência de dados depois de estar estabelecida uma conexão entre dispositivos.

Dois dispositivos BLE só podem comunicar se partilharem o mesmo canal físico da piconet,

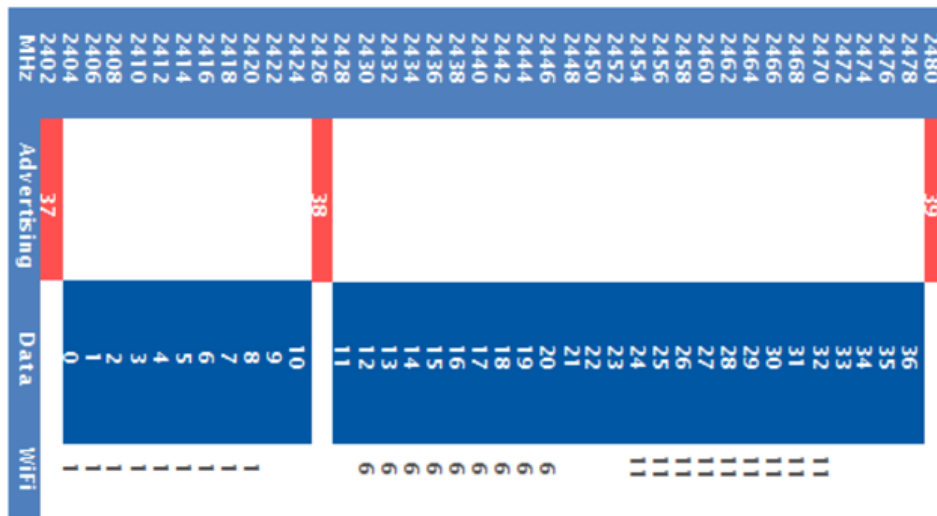


Figura 2.4: Canais do BLE: tipo, frequência e sobreposição com os canais Wi-fi [2]

quando conectados. Isso é possível quando estão sintonizados para a mesma frequência, ao mesmo tempo. Para permitir execução de múltiplas operações em simultâneo e visto que um dispositivo pode usar apenas um canal num determinado período temporal, recorre-se a um mecanismo de Time Division Multiplexing (TDM) entre canais [3].

Ao contrário do que acontecia no Bluetooth clássico, onde na piconet podia haver um mestre e no máximo sete escravos, na versão BLE não existe um limite definido de dispositivos que possam partilhar o canal da piconet. Deve existir apenas um único mestre e todos os restantes são escravos, não sendo permitida a comunicação direta entre escravos, mesmo que em canais iguais [3].

### Camada de Ligação

Esta camada tem por objetivo fazer o controlo da parte de rádio. Está encarregue de definir a estrutura dos pacotes, bem como dos procedimentos de descoberta e conexão a outros dispositivos e envio e receção de dados.

O formato dos pacotes definidos pela camada de ligação está representado na figura 2.5. É um formato único, usado tanto para os pacotes dos canais de dados como para os pacotes de canais de anúncio. O pacote mais curto possível tem 80 bits de comprimento e o mais longo tem 376 bits [3].

Apesar de existir um formato único para os pacotes definidos nesta camada, existem diferenças nos diversos campos que permitem identificar se se trata de um pacote de dados ou anúncio. O preamble e o access address têm valores fixos e diferentes para os dois casos.

O campo Protocol Data Unit (PDU) é o único que tem um tamanho variável. Este varia a sua estrutura mediante o canal físico por onde passará. Como tal, a sua estrutura deverá respeitar descrição do PDU exigida, e que será diferente consoante seja transmitido num canal de anúncio ou num canal de dados.

O PDU de um pacote do canal de anúncio, representado na figura 2.5 tem um cabeçalho de 16 bits e uma carga paga variável. A carga paga é especificada num campo do cabeçalho e pode variar de 6 a 37 bytes, em que 6 bytes são sempre dedicados ao endereço do anunciador

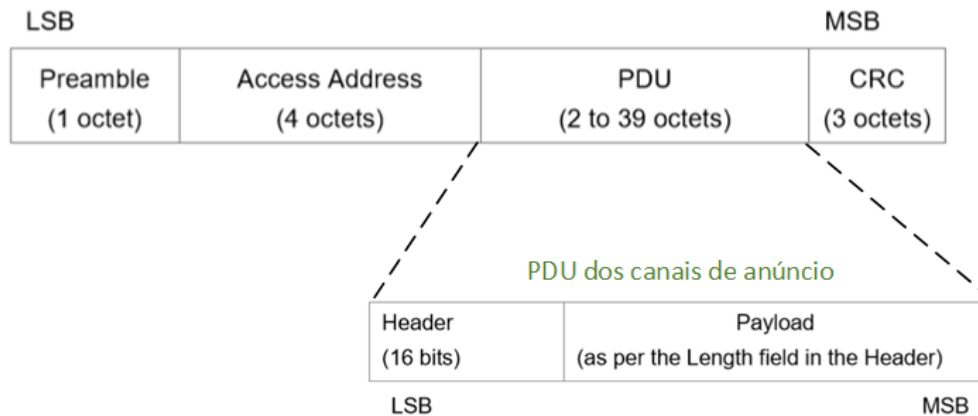


Figura 2.5: Estrutura dos pacotes da camada de ligação [3]

e dos 0 aos 31 bytes para informação que se deseje enviar. O PDU de um pacote do canal de dados é usado para uma comunicação bi-direcional, trocando dados entre o mestre e o escravo. Tem um cabeçalho de 16 bits e uma carga paga também variável, cujo comprimento deverá ser menor ou igual a 27 bytes. Pode ainda incluir um campo Message Integrity Check (MIC) [3].

O último campo, Cyclic Redundancy Check (CRC) é usado como um mecanismo para deteção de erros. O seu valor é calculado no campo PDU de todos os pacotes.

O funcionamento desta camada pode ser descrito pela máquina de estados representada na figura 2.6.

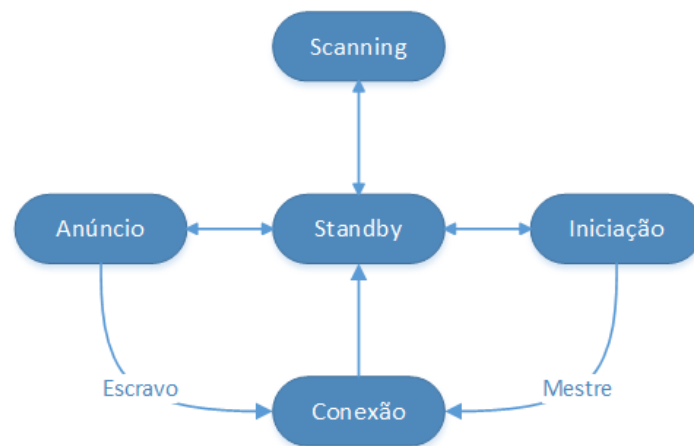


Figura 2.6: Máquina de estados da camada de ligação [2]

De acordo com [2], será detalhada de seguida a ação da camada de ligação em cada estado que assume.

- ESTADO STANDBY: Neste estado a camada de ligação não transmite nem recebe quaisquer pacotes.
- ESTADO DE ANÚNCIO: Transmite pacotes através dos canais de anúncio, nos eventos

de anúncio. Se for requerida uma resposta pelo pacote aquando da receção, também responde ou fica à escuta de respostas. Num evento de anúncio deve ser enviado um pacote através de cada canal físico de anúncio usado, aumentando a possibilidade de receção. Este evento pode ser terminado no fim da transmissão do pacote em cada canal de anúncio ativo ou prematuramente, por parte do dispositivo no estado de anúncio, para que este possa realizar outras funções. O envio do primeiro pacote deve ser feito no canal de anúncio ativo com índice mais baixo e de seguida nos restantes, ou seja, se os três canais estiverem ativos, o canal com índice mais baixo é o 37, sendo nesse que se deve iniciar a transmissão, passando de seguida para o canal de índice 38 e finalmente o 39. Cada evento de anúncio tem uma determinada duração obtida através da soma de um intervalo de anúncio e um atraso de anúncio, como apresentado na figura 2.7.

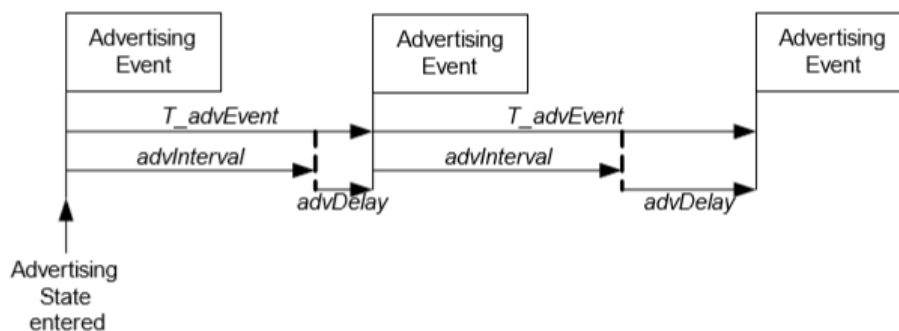


Figura 2.7: Eventos de anúncio com o efeito do período de atraso [3]

O intervalo de anúncio deve ser múltiplo de 0.625ms e variar entre 20ms e 10s. O período pseudo aleatório gerado pela camada de ligação, chamado de atraso de anúncio, varia entre 0 e 10ms e permite que dispositivos que iniciem a sua transmissão ao mesmo tempo, coexistam. Estes eventos podem ser de quatro tipos: conectável não direcionado ou direcionado, não conectável não direcionado ou ainda scannable não direcionado. A diferenciação do tipo de evento será feita a partir do conteúdo do PDU [3].

- **ESTADO DE SCANNING:** Neste estado a camada de ligação escuta os canais de anúncio durante um período definido chamado de *janela de scan*, à espera de pacotes que sejam enviados por dispositivos que estejam no estado de anúncio. Destaca-se também o período chamado de *intervalo de scan* que define o tempo entre o início de duas janelas de scan consecutivas. Estes dois períodos devem ser inferiores ou iguais a 10.24s, sendo sempre a janela de scan inferior ou igual ao intervalo de scan. Em cada janela de scan a camada de ligação deve fazer o scan num canal de anúncio de índice diferente, como representa a figura 2.8. Existem dois tipos de scan: o scan passivo e o scan ativo. O scan passivo é usado para encontrar dispositivos no estado de anúncio, nas proximidades fazendo apenas a receção sem a possibilidade do dispositivo, neste estado de scanning, enviar quaisquer pacotes. No scan ativo, quando o dispositivo se encontra no estado de scanning pode também enviar pacotes, ou seja, mediante o tipo de pacotes de anúncio, podem ser enviados pacotes a requerer informação extra ao anunciador.
- **ESTADO DE INICIAÇÃO:** A camada de ligação permanece à escuta de pacotes no canal de anúncio mas de um ou mais dispositivos específicos.

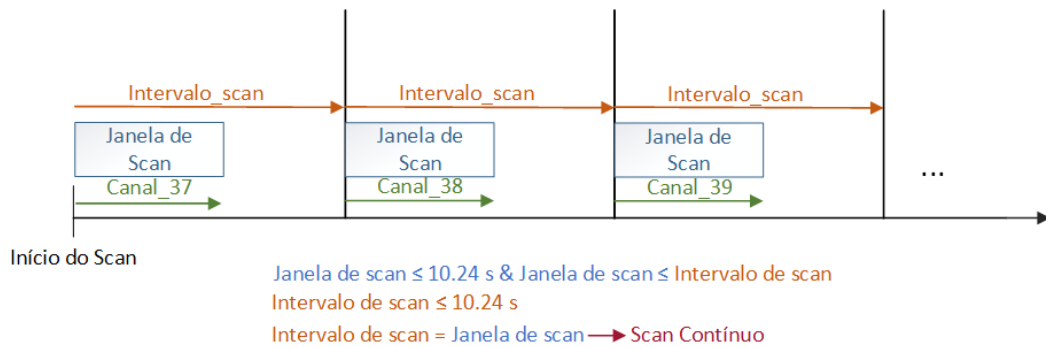


Figura 2.8: Processo de scan dos eventos de anúncio

- **ESTADO DE CONEXÃO:** Se a camada de ligação se encontra neste estado, o dispositivo está numa conexão. Neste estado definem-se dois papéis, o de mestre quando o dispositivo entra neste estado vindo do estado de iniciação e o de escravo quando precedido pelo estado de anúncio. O mestre é que pode iniciar a comunicação com o escravo e define os parâmetros de conexão e transmissão. Na versão 4.0 um escravo pode ter apenas um mestre, num dado período de tempo. Quando se estabelece uma conexão, a camada de ligação envia pacotes através dos canais de dados em eventos de conexão. Entre o mestre e o escravo deve ser acordado o índice do canal de dados a utilizar para a comunicação, em cada evento de conexão, onde o mestre envia pelo menos um pacote e é este quem inicia sempre o evento. Enquanto se verificar troca de pacotes entre mestre e escravo, o evento é considerado aberto [3].

### Modo de Teste Direto

Este modo deve ser implementado no dispositivo LE sob teste através de um dos seguintes métodos, via HCI, ou interface Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART), e permite testar o canal físico do mesmo [3].

### Host Controller Interface

Situa-se entre o controlador e o anfitrião e permite a comunicação entre eles. A implementação desta camada faz-se por software, através de uma Application Programming Interface (API) ou por hardware através de UART, Serial Peripheral Interface (SPI) ou Universal Serial Bus (USB) [28].

### Logical Link Control and Adaptation Protocol

Protocolo que permite a transmissão e receção de pacotes de dados das camadas superiores. Suporta protocolos de multiplexagem, segmentação e reassemblagem, garantindo a qualidade da informação nas camadas superiores [1].

### Attribute Protocol

Define o protocolo entre cliente e servidor para troca de dados com outro dispositivo assim que é estabelecida uma conexão. Os atributos são valores discretos aos quais estão associados:

- um tipo de atributo, definido pelo seu Universal Unique Identifier (UUID) que especifica o que o atributo representa;
- um handle do atributo que ajuda o cliente a identificar um determinado atributo no servidor. O handle é um valor atribuído pelo próprio servidor a todos os seus atributos, assim através deste valor identificativo o cliente pode referir o atributo em pedidos de escrita, leitura, notificações e indicações;
- um conjunto de permissões para as camadas que utilizem o atributo.

Encontram-se agrupados em serviços usando o GATT [1], [3].

### **Gestor de Segurança**

É responsável pela definição do protocolo para fazer o emparelhamento, autenticação e encriptação entre dispositivos. Disponibiliza também funções para as outras camadas da stack poderem fazer conexão e troca de dados segura com outros aparelhos.

### **Generic Attributes Profile**

O GATT encontra-se imediatamente acima do ATT porque é este perfil que define o uso do ATT, determina as operações a executar e a estrutura dos dados transportados e armazenados pelo ATT. O uso do GATT não era necessário no Bluetooth BR/EDR, no entanto, em implementações BLE é obrigatória a sua existência e consequentemente do ATT, uma vez que desempenham um papel importante na descoberta de serviços, permitindo a transferência de dados entre dois dispositivos BLE [11].

O perfil GATT define a estrutura na qual os seus dados devem ser trocados. No perfil devem estar definidos um ou mais serviços, e cada serviço será constituído por características que possuirão propriedades e permissões e um valor, ou seja, são elas que armazenam os dados que serão trocados numa conexão.

Neste perfil são distinguidos dois papéis: o de cliente e servidor. Estes papéis não estão associados a um dispositivo nem à sua configuração, mas sim aos seus procedimentos, pelo que o mesmo dispositivo pode ser servidor e cliente simultaneamente, embora de serviços diferentes.

Quando se fala de um servidor GATT, trata-se do que tem o papel de armazenar os dados que serão transportados pelo ATT, aceitar comandos, pedidos e confirmações que lhe cheguem do cliente GATT, bem como enviar respostas, notificações e indicações sobre o estado do servidor, se pretendido, ao cliente.

Quando desempenha o papel de cliente, o dispositivo deve iniciar os comandos e pedidos ao servidor e recebe respostas, notificações e indicações que lhe sejam enviadas.

### **Generic Access Profile**

O propósito deste perfil é a descrição das regras que devem ser cumpridas por outros perfis e também da metodologia de descoberta de outros dispositivos e serviços, conexão e segurança. Este é obrigatório e implementado em todos os dispositivos Bluetooth.

No BLE o GAP pode assumir múltiplos papéis, em diferentes períodos de tempo, o que depende da capacidade do controlador Bluetooth. Cabe ao anfitrião ler as funcionalidades suportadas pelo controlador antes de qualquer modo ou procedimento ser acionado. Podem

existir quatro papéis GAP, divididos em dois grupos, os que suportam o estabelecimento de uma conexão, como o papel de central ou de periférico, e os que não suportam conexão, como o de transmissor, em inglês, broadcaster ou o de observador.

Quando um dispositivo está no papel de transmissor apenas envia eventos de anúncio, de qualquer tipo, para fazer a transmissão de informação.

Um Observador é um dispositivo que se encontra com um papel GAP de observador. São os complementares dos transmissores e como tal fazem apenas a recepção dos eventos de anúncio.

Quando em papel GAP de periférico, o dispositivo necessita de um controlador que suporte o papel de escravo no estado de conexão da camada de ligação. Pode ter apenas uma conexão estabelecida e é menos complexo que o dispositivo central.

Se o dispositivo se encontra com papel GAP de central, suporta múltiplas conexões sendo sempre ele a iniciá-las, ao contrário do periférico. Tem como requisitos o suporte de mestre por parte da camada de ligação quando se encontra no estado de conexão. As funções por ele desempenhadas são as mais complexas relativamente a todos os outros papéis GAP.

### 2.3.2 Troca de informação entre dispositivos BLE

Os anunciadores, dispositivos cuja camada de ligação se encontra no estado de anúncio, enviam indicações de pacotes de anúncio através dos três canais de anúncio, quando estão todos ativos, em série e no mesmo evento de anúncio. O primeiro pacote que é transmitido no evento deve indicar qual o tipo de evento. O tipo de evento influenciará o resto da comunicação entre os dispositivos. Se, por exemplo, os pacotes do evento forem do tipo scannable, um scanner, dispositivo no estado de scanning, pode enviar um pedido ao anunciador e receber resposta do mesmo, como representa a figura 2.9.

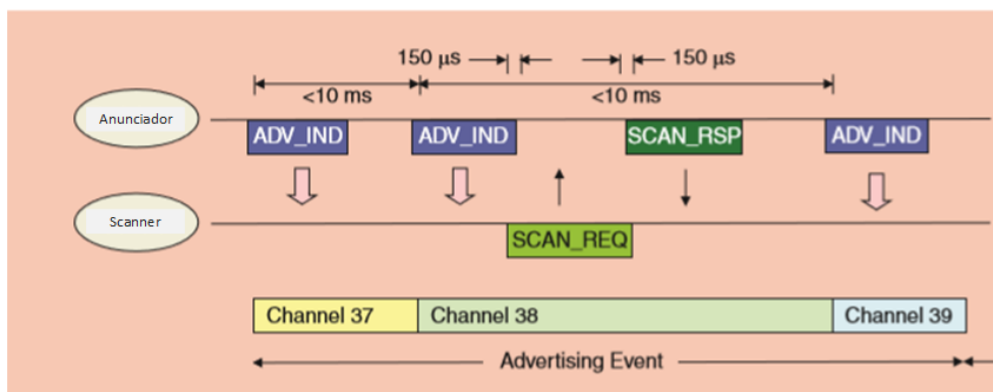


Figura 2.9: Evento de anúncio com pedido de scan no canal de anúncio 38 [4]

Quando se deseja que os dispositivos façam apenas a transmissão dos dados cegamente para os canais de anúncio sem que hajam pedidos de scanning ou posterior conexão, os eventos de anúncio consistem apenas no envio de pacotes não direcionais e não conectáveis nos canais de anúncio ativos. Neste caso entre cada indicação de pacotes de anúncio não conectáveis, no mesmo evento de anúncio, o tempo decorrido deve ser no máximo 10ms. Na figura 2.10 está representado este processo.

Se se desejar estabelecer uma conexão entre dois dispositivos, os pacotes enviados nos canais de anúncio devem ser do tipo conectáveis e serão recebidos por iniciadores, dispositivo

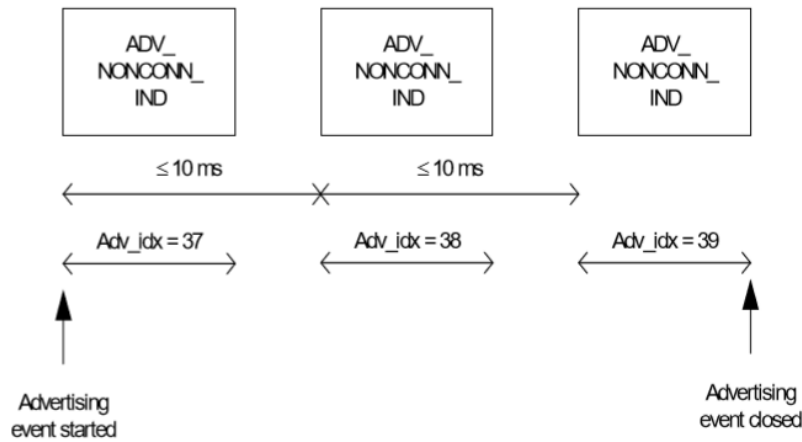


Figura 2.10: Evento de anúncio com pacotes do tipo não conectáveis e não direcionados [3]

no estado de iniciação à escuta nos canais de anúncio por pacotes conectáveis. Estes iniciadores enviam um pedido de conexão, e se o anunciador aceitar, termina o evento de anúncio, iniciando o evento de conexão. No início de cada evento de conexão ocorre a troca de canal de dados através do qual os dispositivos comunicarão. O diagrama da figura 2.11 representa esquematicamente a situação do evento de anúncio seguido de conexão.

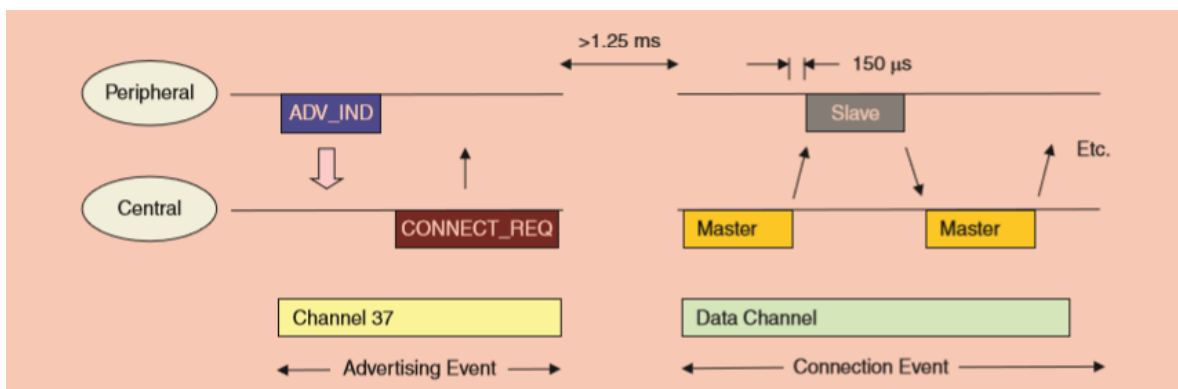


Figura 2.11: Evento de anúncio seguido de evento de conexão [4]

Após a análise mais detalhada, tanto da constituição da stack protocolar como dos mecanismos e procedimentos de troca da informação entre dispositivos, desta nova versão do Bluetooth, adaptada aos requisitos das comunicações sem fios para o emergente conceito de IoT, é perceptível que existem inúmeras aplicações possíveis em que o BLE é uma potencial solução a ser considerada. O seu reduzido custo e consumo energético, simplicidade de implementação e distribuição, bem como suporte de diversos modos de operação tornam-no atrativo para uma diversidade de utilizações e apesar de não ser dedicado especificamente a comunicações veiculares, algumas das suas características tornam interessante o estudo da sua viabilidade em tais ambientes.



## 2.4 Sistemas de Semáforos

Se é importante conhecer as tecnologias mais aplicadas aos SIT, bem como aquelas ainda emergentes e que, embora não sejam empregues neste âmbito, necessitam ser optimizadas no sentido de se adaptarem às necessidades específicas dos transportes, não o é menos aprofundar conhecimentos acerca das infraestruturas sobre as quais se pretende intervir. Entende-se fundamental estudar em que consistem os sistemas semafóricos atuais, a sua estrutura e funcionamento, assim como os requisitos necessários para se conseguir um bom desempenho.

Como referenciado em [15] o semáforo pode ser considerado como o primeiro SIT implementado, em 1928, nos EUA. Mas a crescente densidade populacional e complexidade dos centros urbanos levanta novos desafios no controlo do tráfego, exigindo a evolução dos sistemas semafóricos, de modo a preservar a segurança nas vias e promover também a fluidez do tráfego, compromisso nem sempre fácil de garantir.

Os sistemas de semáforos mais modernos apresentam também maior complexidade pois resultam da interação entre diversos elementos. Do ponto de vista estrutural verifica-se a dependência de um controlador, de displays físicos colocados nas vias e dedicados aos diferentes grupos de usuários e ainda os próprios utilizadores.

Atendendo às necessidades mais específicas de determinados locais existe também o recurso a detetores que imprimem ao seu funcionamento uma interatividade e dinamismo mais aproximados às condições reais em cada momento [5].

É o controlador quem envia toda a informação destinada aos displays. Esta é o resultado do processamento de dados tanto internos como recebidos e regras que lhe são fornecidas para que o sinal de saída decorrente seja o mais adequado ao local sob o seu controlo [5].

Como se depreende os controladores são um elemento crucial de todo o sistema, assim é de elevada importância a forma como se programa a sua ação, a qual deve ser bem estudada e cuidada. Este controlo envolve importantes conceitos relativos à coordenação temporal, como o de fase. As fases compreendem os movimentos ou ações que os utilizadores podem ou não realizar num determinado período de tempo, na via [5]. Por isso, a organização correta das fases permite otimizar a passagem de todos os utentes, reduzindo os conflitos entre os mesmos.

O projeto em curso propõe como principal intervenção transformar o modo como é disponibilizado aos condutores o sinal semafórico, ou seja, recai nos displays de sinalização para os veículos. Prevê-se que a informação vinda do controlador passe do exterior para o interior do veículo, obrigando a utilizar tecnologia de comunicação sem fios entre todos intervenientes no sistema. Assim a única alteração que o controlador sofre é a adaptação para suportar o uso da comunicação sem fios escolhida. A nível de algoritmo de controlo manter-se-á como base o conhecimento existente.

Sendo os semáforos o suporte em que assenta o presente trabalho implicando simultaneamente recorrer a diversos conceitos de coordenação temporal a implementar, este tema será aprofundado no capítulo três, onde se descreverá detalhadamente características relevantes dos sistemas semafóricos implementados na atualidade e que poderão revestir-se de interesse na arquitetura proposta.

## 2.5 Trabalho Relacionado

A investigação na área dos SIT, como já tem sido referido, intensificou-se nos últimos anos e abrange uma vasta gama de trabalhos onde se podem encontrar soluções de optimização de tráfego rodoviário com base nas comunicações sem fios.

No âmbito da presente dissertação realizou-se uma pesquisa que permitisse entender melhor o trabalho desenvolvido na esfera de aplicação das tecnologias de comunicação emergentes e que permitiram inovações nos próprios semáforos graças às comunicações sem fios, assim como na interação V2I e ainda o emprego do BLE nas comunicações veiculares.

Em primeira instância analisar-se-ão projetos que têm suporte nas comunicações V2V. Dentro desta gama de trabalhos existem os que são desenvolvidos usando os standards especificados e dedicados às comunicações veiculares. Mas existem também outros que recorrem a soluções tecnológicas alternativas testando e verificando a sua viabilidade para comunicações V2V.

[29] e [30] são exemplos de soluções que recorrem às DSRC. Em ambos os casos é trabalhado o conceito de semáforos virtuais. Nos semáforos virtuais, não se transferem apenas informações do estado do semáforo do exterior para o interior do veículo, mas permite-se ainda solucionar as prioridades de passagem sem o recurso a qualquer infraestrutura.

- ***Self-organized traffic control*** [29] foi aqui proposto, pela primeira vez, um algoritmo distribuído para o controlo dos semáforos virtuais e respetiva simulação recorrendo ao DIVERT. O objetivo do trabalho era por um lado, passar a ter a informação semafórica disponibilizada dentro do veículo deixando de exigir a presença de infraestruturas nas ruas mas também promover a fluidez do trânsito. A implementação não foi executada mas foi descrita, prevendo o equipamento dos veículos com dispositivos que viabilizariam o uso das DSRC. Apesar de esta ter sido a primeira descrição de um algoritmo distribuído Virtual Traffic Light (VTL), existem já em estudo diversas outras propostas de algoritmos para controlo dos VTL. Neste trabalho verificaram-se melhorias na fluidez do trânsito, independentemente da densidade do tráfego. Nos cenários com menor densidade havia uma redução de vermelhos desnecessários enquanto nos cenários com grande densidade de tráfego as muitas interseções que não tinham qualquer tipo de controlo passavam a ter o que permitia maior fluidez. Em [31] fez-se um estudo do possível impacto negativo resultante da disponibilização das informações no interior do próprio veículo testando, por meio de simuladores e vários participantes, o impacto do VTL na condução e comparando com os semáforos físicos utilizados atualmente. A maioria dos participantes avaliou a informação do VTL como clara e intuitiva não a tendo considerado distrativa ou pouco segura. A performance da condução nos cenários comparados não revelou diferenças significativas.
- ***A distributed algorithm for virtual traffic lights with IEEE 802.11p*** [30] por sua vez propôs a verificação de um algoritmo para um VTL implementado com recurso a dispositivos, de baixo custo comparativamente ao valor habitual, que utilizam as comunicações 802.11p. É referido que esta foi a primeira implementação e teste de um VTL fazendo uso das DSRC. Neste algoritmo são difundidas mensagens, relativas à posição entre os veículos na proximidade e posteriormente são atribuídas as prioridades através de mensagens unicast.

Considerando o BLE como tecnologia alternativa nas comunicações veiculares destacam-

se os trabalhos [27] e [32]. Nestes estudos é analisada a potencialidade do BLE para uso em VANETs, assim como é verificada a sua aplicação nas comunicações inter-veiculares.

- ***Bluetooth Low Energy: An alternative technology for VANET applications*** [27] realizou um estudo primário das características de alcance e latência do BLE para cenários rodoviários, tendo um smartphone como central e outro como periférico. O primeiro ambiente de teste foi estático e mediu o tempo de descoberta e troca de dados entre o periférico e o central, bem como a força do sinal, em função da distância a que se encontravam os veículos. Posteriormente, o mesmo estudo foi implementado num ambiente real, circulando na Cidade de Luxemburgo. Os autores concluíram que os smartphones com BLE poderiam ser utilizados para transmitir informação com baixa latência de veículo para veículo, mesmo quando em movimento.
- ***Bluetooth low energy for inter-vehicular communications*** [32] surge na sequência de [27] dado existir necessidade de maior estudo, nomeadamente da influência dos fatores inerentes ao ambiente de utilização, bem como da velocidade e do impacto do tempo de mudança dos papéis do BLE em aplicações V2V sensíveis aos atrasos. Neste projeto o propósito foi demonstrar que a troca de informação entre vários nós em movimento é possível, até uma determinada distância entre os nós. Também foram analisadas as performances das conexões em diferentes cenários, tanto em laboratório como no exterior, a diversas velocidades e distâncias entre os veículos. As métricas avaliadas foram o rácio de entrega, o tempo de descoberta e troca de dados e o decorrido de extremo-a-extremo dos pontos de comunicação. Como trabalho futuro é mencionado o desejo de continuar o estudo dos canais de anúncio do BLE para eliminar o tempo de emparelhamento requerido na conexão que torna o tempo de extremo a extremo demasiado longo, logo inaplicável para aplicações sensíveis a atrasos.

Observando agora projetos que têm por base as comunicações V2I destacam-se:

- ***On-board traffic light assistant*** [33] trata-se de um sistema de assistência à condução que avisa o ocupante do veículo relativamente ao estado seguinte do semáforo quando o veículo se aproxima do mesmo. Conhecendo a velocidade de deslocação e a distância até ao semáforo, o algoritmo proposto calcula o tempo que o veículo demora a atingir o semáforo e, portanto, sabe o estado que encontrará. Permite intensificar a perceção visual do condutor, proporcionando-lhe o conhecimento das circunstâncias com que se irá deparar, adaptando o seu comportamento às mesmas. Neste caso foi usado o Wi-Fi 802.11a, mostrando-se uma comunicação aceitável em termos de cobertura e robustez da ligação.
- ***Energy-efficient solution for vehicle prioritisation employing ZigBee V2I communications*** [34] avaliou a possibilidade de aplicação de zigbee como meio de comunicação de V2I com o propósito de identificar veículos em marcha de emergência, em centros urbanos. À sua passagem o veículo, equipado com esta tecnologia, envia informação para um dispositivo colocado na beira da estrada que por sua vez comunicará com o controlador do semáforo e produz a decisão da sinalização apropriada para minimizar a demora na passagem pela interseção.
- ***GPS and ZigBee based traffic signal preemption*** [35] também propôs um meio de deteção de veículos em marcha de emergência concretizado através das comunicações

sem fios de V2I, via zigbee. Quando o controlador recebe um sinal, identifica o veículo e através dos dados GPS verifica se realmente se dirige na direção da interseção. Se sim, é ativada no controlador uma fase especial para que o sinal seja alterado dando passagem ao veículo prioritário. Depois da sua passagem o comportamento do semáforo volta ao processo normal.

- ***A Self-Adaptive Traffic Light Control System Based on Speed of Vehicles*** [36] propõe a criação de um semáforo dinâmico em que o seu estado altera mediante a velocidade de circulação dos veículos, de um modo não ortogonal, mas considerando apenas a direção de circulação em frente. São recolhidos dados do automóvel tais como, a velocidade e posição que posteriormente são enviados, via zigbee, para o módulo recetor no semáforo. Essa informação é analisada e integrada no algoritmo do controlador e quando necessário altera o sinal luminoso. O algoritmo foi testado através de simulação em MATLAB observando-se uma melhoria nas situações de congestão de trânsito.
- ***Audi connect PRIME feature*** [37] trata-se de um sistema lançado em dezembro de 2016, integrado em alguns modelos da Audi a partir de 2017 em Las Vegas, esta tecnologia permite disponibilizar ao condutor, no interior do veículo, o tempo restante para que o sinal luminoso do semáforo, de que se está a aproximar altere a sua cor para verde. Foi o primeiro passo para oferecer um sistema que mantenha o veículo em comunicação com as infraestruturas em seu redor constituindo por isso uma tecnologia com base nas comunicações V2I. Neste caso o veículo recebe a informação do sinal dos controladores de cada semáforo via 4G LTE.
- ***EnLighten*** [38], [39], [40], [41], [42], [43] consiste numa aplicação capaz de fornecer ao condutor informação em tempo real sobre a cor do sinal luminoso, o tempo de duração e prever as suas alterações e é disponibilizada no interior do veículo. São recolhidos dados do mapa dos semáforos, GPS e velocidades limites permitidas, posteriormente efetua-se a análise e aplicação de algoritmos que permitem conhecer o comportamento do semáforo. A Connected Signals desenvolveu também um dispositivo de custo e tamanho reduzidos, que permite aceder aos dados municipais e fazer a sua distribuição em tempo real, facultando-o aos municípios que desejem implementar este sistema. A informação é distribuída através de redes celulares. Esta aplicação está disponível para android e IOS mas em 2015 a BMW anunciou a integração desta solução nos seus veículos, permitindo aos condutores instalar e visualizar na consola central do veículo o estado dos semáforos, a partir da conexão através de um aparelho IOS.

## 2.6 Considerações Finais

Foram analisadas diversas tecnologias no âmbito dos SIT focando especificamente as VANETs, em que se abordaram os protocolos mais usados para comunicações veiculares, cujas aplicações que os adotaram não se distribuíram ao ritmo esperado, direcionando o estudo para a área das alternativas que se debatem atualmente procurando responder aos requisitos específicos dos ambientes veiculares.

Assim, enveredando pelo caminho das alternativas, neste projeto escolhe aplicar-se uma tecnologia recente, barata e que apesar de não ser desenhada para fins veiculares, pode revelar-se uma solução interessante. A opção selecionada foi o BLE pois as suas características e

particularmente a sua grande divulgação e integração em sistemas móveis de comunicação tornam-na extremamente acessível.

Ao determinar que a intervenção a fazer na VANET recairá na comunicação V2I que nesta dissertação corresponde aos sistemas semaforicos, torna-se bastante importante conhecer estas estruturas procedendo-se a uma pequena abordagem, que será mais detalhada no terceiro capítulo promovendo a ligação entre o estado da arte e a sua implementação. Para além de compreender a organização e funcionamento dos semáforos atuais é fundamental analisar outros projetos, com objetivos semelhantes. Verificou-se a existência de várias perspetivas e abordagens para interseções e desmaterialização de semáforos, tendo o foco em ambas as comunicações V2V e V2I, algumas dessas propostas já disponíveis no mercado, mas ainda de forma muito restrita. Salienta-se também o reduzido estudo para o emprego do BLE no âmbito veicular.

O estudo desenvolvido ao longo deste capítulo tornou possível apresentar uma proposta de arquitetura para atingir os objetivos traçados e passar da análise teórica à implementação prática.



## Capítulo 3

# Arquitetura para Aplicação do BLE ao Sistema Semafórico

Ao desenvolver este trabalho pretende-se a criação de um sistema capaz de proporcionar sinalização luminosa no interior do veículo deixando de existir a necessidade de recorrer aos conhecidos semáforos físicos no exterior.

Como ponto de partida procurou-se imergir no conhecimento disponibilizado atualmente. Deu-se assim início a um levantamento exaustivo de estudos e investigações existentes sobre técnicas de controlo de tráfego cuja aplicação visa melhorar a resposta às necessidades de cada local, tanto no controlo dos automóveis como dos peões. E que permitisse alicerçar a introdução de uma nova componente tecnológica que facilitasse aos municípios a implementação e manutenção de semáforos e que ao mesmo tempo possibilitasse ao condutor ter uma melhor interação com o semáforo.

Com a emergência de inúmeras soluções robustas de comunicações sem fios e da eletrónica integrada nos veículos e mesmo com evoluções nas soluções de semáforos atuais, começa a ganhar forma a possibilidade de tornar realidade uma mudança de paradigma dos sistemas semaforicos na direção da sua desmaterialização.

Deste modo a proposta aqui descrita herda todo conhecimento que contribui para a organização e controlo temporal e aplica-o a novos componentes físicos, levando ao dito conceito de desmaterialização dos semáforos. Existem já ferramentas que permitem tornar isto possível e proporcionar um sistema semaforico com base nas comunicações sem fios. Estas comunicações viabilizam a interação entre todos os componentes do sistema sem que haja necessidade de recorrer a uma ligação física e conseqüentemente menor invasão das vias, possibilitando ainda a interação entre o veículo e o semáforo deixando de estar dependente de displays no exterior.

Neste capítulo expõe-se inicialmente a caracterização dos semáforos atuais, tanto a nível físico e estrutural como da sua organização temporal e alguns conceitos pertinentes nesse âmbito. Em seguida descreve-se o sistema proposto abordando aspetos relevantes da sua concetualização. Por fim apresenta-se a arquitetura idealizada, com a qual se pretende atingir o objetivo do trabalho, explanando-se detalhadamente os seus constituintes.

### 3.1 Sistemas de Semáforos Físicos Atuais e o seu Controlo

A utilização dos semáforos e a forma como funcionam na viabilização do tráfego rodoviário já foi previamente introduzida na secção 2.4. Porém, ao longo desta secção especificar-se-ão

em pormenor, conceitos e técnicas relevantes na abordagem a este tema.

Alcançar uma proposta exequível implicou antecipadamente um estudo sobre o conhecimento existente e aplicado no funcionamento da sinalização semafórica; desde a constituição física que suporta o sistema, até às definições de controlo necessárias para obter sinalização coerente.

Deste modo, optou-se por apresentar esta secção em duas partes. Inicialmente explicam-se os elementos físicos indispensáveis ao funcionamento do próprio sistema, analisando a respetiva utilidade e importância, salientando também a forma como podem interagir entre si. Na segunda parte são introduzidos conceitos fundamentais na gestão e controlo temporal dos semáforos, explanando técnicas utilizadas e que permitem garantir o eficaz planeamento do sinal.

### 3.1.1 Constituição física

A par de todo o desenvolvimento tecnológico, também os sistemas de controlo de tráfego têm evoluído, tornando-se mais eficientes e adaptados às condições complexas das interseções de trânsito.

De acordo com [5] a composição destes sistemas, hoje em dia, inclui um controlador do sinal, um dispositivo que funciona como interface com o utilizador e o próprio utilizador. Pode ainda existir a presença de detetores. Todos estes componentes fazem parte de um processo contínuo e, por vezes, dinâmico tendo influências uns nos outros. O diagrama da figura 3.1 retrata os sistemas descritos:

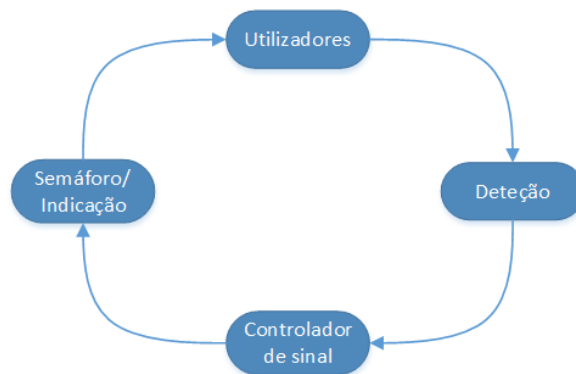


Figura 3.1: Processo do sistema semafórico [5]

Embora os componentes interajam entre si, cada um apresenta funções específicas integradas no sistema.

O controlador é o constituinte que disponibiliza a informação que, por sua vez, será impressa nos displays de veículos e peões. Este controlador é uma estrutura considerada, atualmente, equivalente ao computador, e a sua programação deverá permitir que, ao longo do tempo, seja atribuído o direito de passagem aos vários utilizadores na via. A forma como o controlador confere o direito de passagem varia mediante as suas definições. Em alguns casos os tempos de alteração do estado do controlador estão pré-definidos e devidamente caracterizados, ou então podem estar dependentes de informação a ser recebida pelo controlador, de dispositivos externos ao mesmo, como é o caso dos dados enviados pelos detetores.



Por sua vez, os detetores são dispositivos colocados estrategicamente nas vias e que permitem recolher dados, em tempo real, dos utilizadores que aí se encontram. Deste modo é possível perceber o estado atual do local da interseção. Esses dados podem ser enviados ao controlador onde serão empregues para gerir de maneira mais eficaz e adequada o estado dos semáforos na interseção.

Podem distinguir-se três tipos de controlo de sistemas de tráfego, consoante a influência dos dados externos na operação do controlador.

- Controlo totalmente acionado: recorre à aplicação de detetores que colhem informação do trânsito local em todas as direções de aproximação à interseção. Essas informações são, de seguida, enviadas ao controlador e utilizadas para definir a sua operação. Esta modalidade permite oferecer maior adaptabilidade e flexibilidade na gestão do estado dos semáforos.
- Controlo semi-acionado: a recolha de dados é feita apenas em parte das aproximações à interseção, estando o sinal adaptado apenas a parte do estado do trânsito local.
- Controlo pré-determinado: neste caso não é requerido qualquer tipo de deteção do estado das vias, pois o sinal é predefinido com valores de tempo específicos em que se deve manter o estado.

A decisão relativa à escolha do tipo de controlo a aplicar deve resultar de um estudo das necessidades dos locais.

[5] realça que o controlo pré-determinado poderá ser a escolha mais adequada a locais com interseções muito próximas umas das outras, onde é importante que haja coordenação entre as mesmas. Esta solução implica um menor encargo financeiro, pois não obriga à implementação de toda a parte da deteção. Dada a necessidade de manter um padrão de funcionamento coordenado entre as diferentes interseções, a influência da deteção poderia tornar-se indesejável. Assim, os sistemas de deteção devem ser apenas considerados quando se reconhece que são o meio para melhorar a eficiência dos semáforos.

Depois de realizado o planeamento do sinal de controlo, ou seja, o processamento da informação que chega ao controlador e a integração da mesma nas definições programadas, gerando uma decisão sobre o estado que deve ser disponibilizado para os utilizadores da via, esta é enviada para o dispositivo que atua como interface com o utilizador. Nos sistemas atuais trata-se do conhecido semáforo físico que está, adequadamente, posicionado nas vias rodoviárias. Numa mesma interseção encontramos diferentes tipos de semáforos que são direcionados a grupos específicos de utilizadores, alertando-os sobre o direito de passagem na interseção.

Os semáforos, enquanto meio de comunicação direta com o utilizador, revestem-se de elevada importância, obrigando ao cumprimento de determinadas regras quanto às suas características. Autores como [5] e [44] distinguem o design, a visibilidade, a manutenção, a uniformidade e o código de cor empregue como algumas das principais características dos semáforos.

Um semáforo com um bom design deve contemplar uma forma, cor, composição, iluminação e mensagem clara de modo a captar a atenção do utilizador para o mesmo e permitir a sua correta interpretação, sendo de evitar que existam semáforos confusos ou contraditórios. Os aspetos do design dos dispositivos devem ser uniformes e a sua alteração deve ocorrer apenas em casos de comprovada necessidade.

Para se obter uma boa visibilidade, os semáforos devem ser dispostos de modo a permitir ao utilizador uma linha de campo de visão desimpedida, à medida que se aproxima da interseção, e ter em conta o tempo necessário para produzir uma resposta adequada à informação que lhe é apresentada.

A manutenção é requerida, tanto a nível funcional como físico. Esta deve verificar se o funcionamento dos dispositivos precisa de ser atualizado de forma a estar em maior conformidade com o trânsito local. Deve, ainda, certificar se o estado físico dos semáforos compromete a legibilidade e visibilidade dos mesmos, o que pode ocorrer com o desgaste sofrido ao longo do tempo.

A uniformidade na apresentação e disposição dos dispositivos simplifica a compreensão e reconhecimento da sinalização, possibilitando ao utilizador um menor tempo de reação.

As cores consideradas próprias para disponibilizar informação em ambiente rodoviário e sobre o tráfego têm significados diferentes e específicos. Quanto aos semáforos, são utilizados, o verde para movimentos permitidos, o vermelho para proibições/paragens, o amarelo para avisos/perigo e cor de laranja para sinalização temporária.

### 3.1.2 Conceitos e técnicas de controlo temporal

Na secção anterior apresentaram-se, resumidamente, os componentes físicos necessários para obter um semáforo e ainda de que forma os seus constituintes podem sofrer influências e interagir entre si.

Nesta secção serão discutidos conceitos relativos ao planeamento e coordenação temporal do sinal.

Conseguir um plano coerente com a localização dos semáforos implica conhecer a geometria do local e considerar todos os movimentos possíveis. Neste contexto, movimento é definido como sendo a ação do utilizador no local. Podemos considerar dois tipos de movimento: permitido, quando o utilizador passa, mas condicionado pela cedência de passagem a outros utilizadores com maior prioridade, ou protegido, sempre que o utilizador tem o direito de passagem sem qualquer limitação [5].

Para melhor compreensão deste conceito analisar-se-á um cenário típico, também descrito em [5], e que representa uma interseção de quatro vias, como se observa na figura 3.2.

Nesta situação, aos veículos, são possíveis doze movimentos todos num mesmo sentido, quanto aos peões, são possíveis quatro movimentos, nos dois sentidos. Para facilitar a sua gestão é atribuída, a cada movimento, uma referência. Na figura 3.2 essa referência está assinalada nas caixas cinzentas. As regras de referência são descritas no Highway Capacity Manual (HCM).

É de salientar que os movimentos de mudança de direção à esquerda e de seguir em frente têm referências independentes. Já a dos movimentos que descrevem as mudanças de direção à direita, é obtida através do resultado da adição de dez à referência do movimento de seguir em frente [5].

O número de movimentos possíveis, numa via, é independente do número de faixas de rodagem que a mesma apresente.

Relativamente ao conceito de fase do semáforo, esta é definida como uma medida temporal associada ao controlo de um ou mais movimentos. Deve proceder-se à atribuição de números a cada uma das fases, no sentido de simplificar a perceção dos movimentos, confirmando se são compatíveis ou não ao longo do tempo e, simultaneamente, fazer a gestão dos mesmos.

Na figura 3.2, as fases encontram-se assinaladas nas caixas azuis e usam a designação  $\phi_x$ .

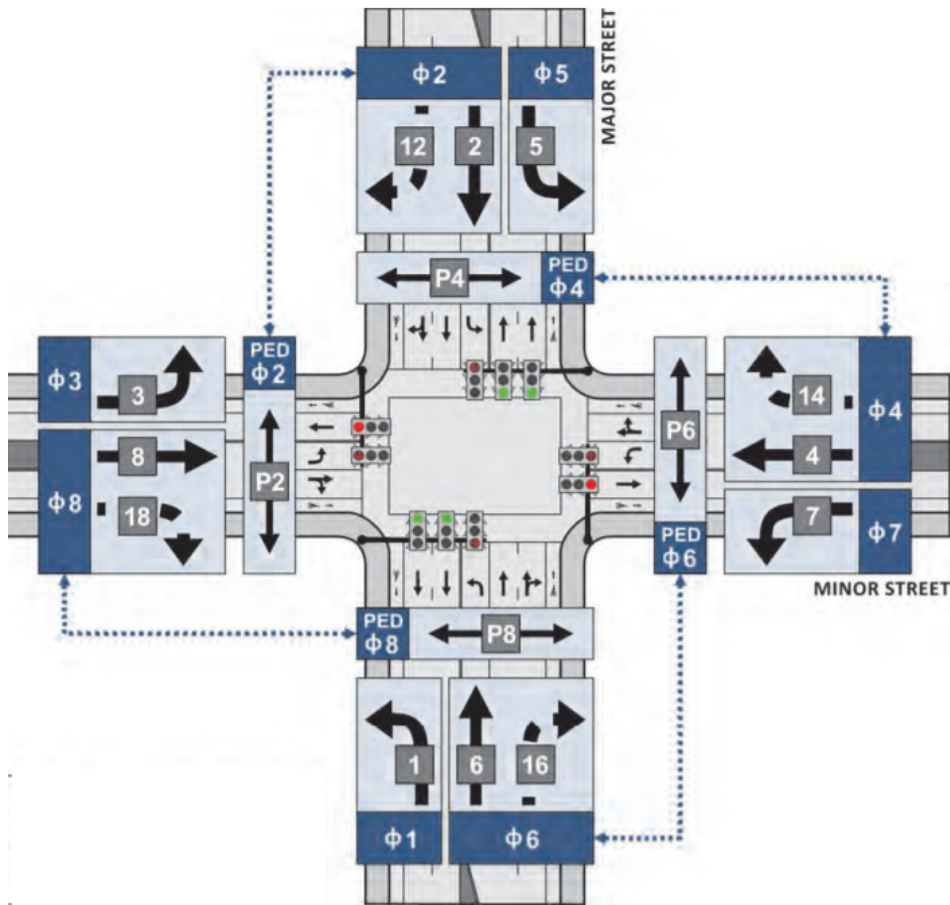


Figura 3.2: Numeração de fases e movimentos numa interseção de quatro vias [5]

A atribuição de números de fase aos movimentos não é feita de forma completamente aleatória, obedece a algumas regras gerais que tornam o processo uniforme e que devem ser cumpridas sempre que possível. As fases pares representam movimentos de seguir em frente ou mudança de direção à direita. As ímpares representam os movimentos de virar à esquerda. No caso dos semáforos dos pedestres as fases são definidas para serem concordantes com as fases pares, adjacentes e paralelas, dos veículos.

Tão importante como a atribuição das fases é a sua organização de modo a que se possa obter um diagrama que descreva quais as fases compatíveis e que podem ocorrer simultaneamente. Este chama-se diagrama de barreira-e-anel [5].

Como o próprio nome indica estes diagramas são constituídos por anéis que correspondem a uma sequência de fases não compatíveis. Consoante o número de fases da interseção pode ter-se mais que um anel e operar, ainda, mais que uma fase compatível ao mesmo tempo. No caso de termos mais que um anel surge outro conceito importante, a barreira. Esta serve para delimitar o momento em que fases dos dois anéis devem terminar, simultaneamente.

O diagrama de barreira-e-anel apresentado na figura 3.3 corresponde ao exemplo da interseção mostrada na figura 3.2. Analisando este diagrama pode observar-se que a organização inclui oito fases em dois anéis. Recorre ainda ao uso de duas barreiras. Usa-se um esquema em que as fases correspondentes aos movimentos protegidos de virar à esquerda lideram, sendo

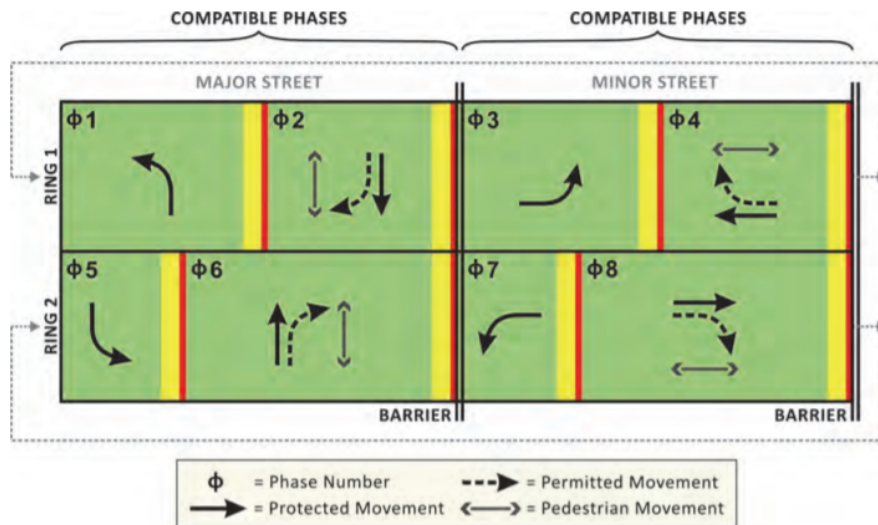


Figura 3.3: Diagrama de barreira-e-anel [5]

executados antes das fases dos movimentos de seguir em frente. Este esquema pode ser alterado conforme as necessidades do local da interseção. Podem existir situações em que as fases de seguir em frente sejam líderes e podem ainda iniciar-se e terminar a momentos diferentes das fases de seguir em frente, não sendo especificada a liderança a nenhum dos movimentos.

A gestão dos diagramas dependerá sempre muito dos requisitos exigidos, podendo assim avançar-se fases se não houver necessidade de executá-las ou ceder tempo inutilizado de uma fase à fase seguinte do mesmo anel. Em determinadas situações pode ainda ser vantajoso recorrer ao uso de sobreposições, isto é, movimentos que são compatíveis, mas diferentes, pelo que estariam em fases distintas, mas com este método executam-se na mesma fase.

Em determinados momentos, como podemos conferir através do diagrama, a operação de veículos e pedestres torna-se conflituosa. Para tentar reduzir as interferências são usadas técnicas como colocar um intervalo de tempo para a passagem dos peões líder, ou seja, antes da fase par, paralela e adjacente do veículo iniciar, há um período em que apenas os peões têm o direito de passagem. Esta técnica permite que os peões estejam já presentes nas passadeiras quando os veículos iniciam a sua marcha, tendo maior percepção dos peões. Uma outra técnica utilizada é semelhante à descrita anteriormente, mas neste caso a passagem dos peões é permitida por um curto período de tempo após iniciar-se a fase par, paralela e adjacente. Esta opção é vantajosa para dar fluidez ao trânsito, quando há grande volume de veículos em espera para mudar de sentido. Pode ainda reservar-se uma fase especial onde apenas ocorre a movimentação de peões, em todas as direções, estando os veículos em espera.

A presença de um sistema com detetores permitirá que estes aproveitem os dados recolhidos do exterior para decidir se a duração de determinada fase é apropriada, podendo terminá-la prematuramente ou estender o seu período.

Se, por outro lado, se deseja a coordenação entre interseções pouco espaçadas entre si, recorre-se à coordenação das respetivas fases. Assim, estando os relógios dos controladores sincronizados pode, na primeira interseção iniciar-se a fase correspondente ao movimento de seguir em frente e, possuindo a interseção seguinte idêntica sequência de fases, esta começa a mesma fase um curto período depois, concedendo assim o tempo necessário para que um

veículo se desloque de uma interseção para a seguinte e possa avançar pois ambas se encontram na mesma fase.

### 3.2 Sistema de Semáforos Proposto

A partir do conhecimento dos sistemas de controlo de tráfego por semáforos, brevemente descritos na secção anterior, entendemos ser possível, através da análise dos seus componentes e com a introdução de inovadoras tecnologias de comunicação sem fios atualmente disponíveis no mercado, promover um controlo do tráfego mais eficiente melhorando a segurança rodoviária urbana.

A proposta desenvolvida pretende tirar partido dos elementos disponíveis para otimizar o sistema de semáforos, assim é desejável por um lado utilizar recursos já existentes como o algoritmo de controlo dos semáforos e por outro juntar-lhe uma nova tecnologia.

Os veículos encontram-se, cada vez mais, equipados com dispositivos que disponibilizam ao condutor informação que, anteriormente, só era fornecida no seu exterior. Estes permitem aceder a diversas aplicações de apoio à condução que facultam, ao condutor, mais informação dentro do veículo sobre o meio onde circula, ajudando-o a tomar decisões coerentes com a situação no exterior. O desenvolvimento deste tipo de aplicações tornou-se possível graças à emergência de diferentes protocolos de comunicações sem fios.

O estudo de viabilidade da passagem da informação do exterior para o interior do veículo passa, entre outros, pelas informações relativas à sinalização semaforica.

Como referido na secção 2.5, já têm sido feitas algumas abordagens a este tópico e são diversas as soluções propostas dependendo dos meios utilizados e dos objetivos a atingir.

Alguns trabalhos direcionam-se para a realização de semáforos virtuais, onde o objetivo é o de, tirando partido das VANET e das comunicações V2V, os veículos solucionam entre eles as prioridades nas interseções e é disponibilizada, dentro do veículo, a informação sobre quem tem a prioridade de passagem. Esta solução não requer a presença de qualquer infraestrutura na interseção, como por exemplo o controlador físico dos semáforos. Torna-se deste modo uma proposta bastante atrativa para agilizar, em segurança, o tráfego nas interseções sem recurso a qualquer tipo de sinalização nas vias. **No entanto, estas abordagens ignoram completamente a presença de peões na interseção, não tendo a integração do controlo da passagem dos mesmos.**

Outras soluções recaem na exploração das comunicações V2I. Estas têm por objetivo, através de diferentes protocolos de comunicações sem fios, viabilizar a troca de dados entre veículos e unidades ou dispositivos físicos posicionados estrategicamente nas vias rodoviárias. Também, recorrendo apenas às comunicações V2I, é possível obter soluções semelhantes aos semáforos virtuais. Apesar de termos o acesso a uma infraestrutura que faz o controlo das prioridades, pode ter-se a apresentação da informação do semáforo no interior do veículo. É ainda possível, quando se justifique, a transmissão de informação do veículo ao semáforo, relativa à sua presença ou às suas características particulares, como por exemplo se se trata de um veículo prioritário.

Com o enfoque principal na abordagem e estudo das comunicações entre os veículos e unidades colocadas nas estradas surge este projeto.

O propósito é criar um sistema de semáforos assente nas comunicações sem fios, em que todos os constituintes interajam sem a necessidade de ligação física, e ainda permitir a redução do número de semáforos físicos, colocados nas vias rodoviárias. A sinalização do estado do

semáforo, para os veículos, encontrar-se-á disponível no interior dos mesmos. Por sua vez, o controlo da passagem dos peões manter-se-á com a sinalização luminosa física, junto das passadeiras.

Propõe-se a existência de um controlador externo ao veículo que controlará todas as fases da passagem na interseção, ou seja, tanto dos peões como dos veículos. A informação será posteriormente transmitida aos diferentes dispositivos. Relativamente aos peões a receção é feita pelos dispositivos de sinalização luminosa, no que respeita aos veículos o seu interior passará a estar equipado com um dispositivo, smartphone ou equivalente, onde será disponibilizada visualmente a cada condutor.

Fornecer, ao condutor, a informação no interior do próprio veículo pode reduzir os problemas de visualização ou perceção da cor dos semáforos físicos, inerentes a fatores externos como condições meteorológicas adversas, ou mau posicionamento da sinalização.

Porém, se a apresentação gráfica da informação não for cuidada respeitando determinados requisitos a difícil visualização manter-se-á e poderá conduzir a resultados negativos na aplicação do conceito.

Sendo assim, a escolha do dispositivo que funcionará como interface com o utilizador bem como o seu design, deve ser bastante ponderada de modo a não colocar em causa a segurança nem do condutor, nem dos outros utilizadores da via.

Segundo [45] uma interface visual no interior do veículo deve possuir informação legível, correta e surgir no período apropriado. O seu uso deve ser simples e compatível com o ato de conduzir. A localização do dispositivo deve estar na linha de visão do condutor, para reduzir o tempo total em que o condutor não está a olhar para a estrada, comparativamente a posicionamentos mais afastados. E deve, simultaneamente, permitir-lhe manter a perceção da via onde circula, não obstruindo a visão para a mesma.

Quanto à legibilidade da informação consideram-se as propriedades de brilho, contraste, resolução e tamanho. Estas devem ser definidas de modo a não criar desconforto visual ou distração ao condutor, disponibilizando informação perceptível tanto em ambientes diurnos como noturnos. É também mencionado que a informação visual deve ser acompanhada de informação sonora, sempre que possível.

Percebendo a importância dos citados requisitos, analisaram-se três alternativas para funcionar como interface com o utilizador, dentro do veículo.

Como primeira alternativa apresenta-se o recurso ao smartphone pessoal ou a um dispositivo móvel semelhante, como o tablet. Foram já criadas aplicações que se utilizam no apoio à condução e estão disponíveis para descarregar nestes equipamentos. Atualmente popularizou-se a condução apoiada nas ferramentas disponibilizadas pelos smartphones. Assim, este hábito poderá facilitar a introdução e adaptação ao novo conceito.

É de salientar que a opção pelo smartphone está intimamente ligada às características atuais destes dispositivos, que conseguem ter dimensões reduzidas e uma grande potencialidade, englobando num único produto inúmeras funcionalidades. Têm bons processadores, ecrãs, sistema de áudio e câmaras com elevada resolução, sistemas de localização e variadas hipóteses de conexão, como Wi-Fi, Bluetooth, NFC, USB. Sendo assim são capazes de dar resposta cabal aos requisitos necessários para as aplicações no contexto rodoviário, havendo possibilidade de se adaptarem no interior do veículo e têm ferramentas que permitem configurar aplicações que nele correm, da melhor maneira de forma a apoiar a condução.

A segunda alternativa prevê a impossibilidade de recorrer a um smartphone. Para isso propõe-se a disponibilização de um dispositivo construído de raiz que possa ser anexado ao veículo. Esta solução permite fazer uso do sistema proposto sem fazer alterações no veículo.

Qualquer veículo pode passar a estar habilitado para receber a sinalização semafórica no seu interior.

A terceira alternativa é semelhante à anterior, mas o dispositivo disponibilizado neste caso em vez de estar anexado, seria embutido no próprio veículo.

A informação veiculada possibilita, ao condutor, conhecer o estado de todos os semáforos da intersecção ao aproximar-se da mesma. Assim, saberá previamente como se encontram os semáforos nas mudanças de direção, e determinar antecipadamente a segurança com que pode avançar, tendo maior atenção a possíveis conflitos com os peões ou outros veículos. Deste modo o condutor está devidamente informado, quanto à situação que encontrará, e poderá assim agir em conformidade.

Apesar da importância de que se reveste a obtenção da informação, não o é menos o tempo em que chega ao condutor permitindo-lhe processá-la e utilizá-la da melhor forma a manter a fluidez do trânsito. Para obter este pressuposto devem ser consideradas algumas distâncias relevantes na sua operacionalização.

Da análise dos diversos fatores inerentes ao sistema proposto deverão ser também definidos alguns cenários onde a sua aplicação poderá constituir uma mais valia.

### 3.2.1 Distâncias de segurança

As interseções são, pela sua natureza, ambientes propícios a conflitos veiculares, sabe-se no entanto que a existência de sinalização contribui para a diminuição significativa de tais ocorrências. Mas, para que esta seja eficaz, é necessário respeitar alguns critérios, como ter em consideração o tipo de informação disponibilizada, ou seja, exibir sinalização que represente fielmente o que se pretende alertar, e atender à sua visibilidade colocando-a a uma distância adequada.

A distância adequada refere-se àquela que permite ao condutor ter um campo de visão livre da estrada suficientemente longo de modo a que, viajando a uma velocidade próxima do limite permitido na via, consiga imobilizar-se em segurança antes de atingir um determinado obstáculo que se encontra no caminho [46]. Portanto, é relevante perceber que fatores influenciam a paragem de um veículo e qual a distância considerada segura para que o condutor possa receber e avaliar a informação do estado do semáforo agindo em conformidade e garantir que, sendo necessária a paragem do automóvel, ele o consegue imobilizar em segurança.

A distância percorrida desde o instante em que o condutor se apercebe da existência dum determinado acontecimento que exige uma ação, até ao momento em que o veículo fica imóvel é conhecida como distância de paragem. Pela definição apresentada, entende-se que esta será influenciada por características humanas e derivadas do comportamento do condutor, assim como pela velocidade de circulação, características do veículo e do meio onde circula. Esta resulta da soma de duas outras distâncias: a de reação e a de travagem [46], [47].

A perceção de um estímulo e o início da ação por parte do condutor não é instantânea. O tempo que decorre entre o instante em que o mesmo percebe uma situação que obrigará à sua paragem até ao instante em que age, pressionando o travão do veículo é conhecido como o tempo de reação [46], [48]. O valor do tempo de reação é bastante variável para cada condutor, mas existem diversos estudos que revelam o tempo adequado a considerar. No decorrer deste tempo o veículo não se encontra imobilizado, percorrendo assim uma determinada distância, conhecida como distância de reação [48].

A distância de travagem refere-se àquela que o veículo percorre desde o momento em que se dá início à aplicação do travão até ao instante em que o veículo fica imóvel [49]. Esta é

diretamente afetada por fenómenos físicos que influenciam na sua imobilização. Exemplos de condições que podem alterar esta distância são as características do pavimento, também afetadas por condições meteorológicas e o sistema de travagem do próprio automóvel.

A partir dos conceitos analisados pode ser estabelecido o valor da distância de paragem a utilizar no sistema que se pretende implementar.

Sabendo que se deseja aplicar o sistema proposto em ambiente urbano, onde a velocidade limite de circulação é regularmente de 50 Km/h esta pode conjugar-se com os outros fatores intervenientes, definidos na bibliografia consultada, como o valor do tempo de reação, que permite determinar a distância de reação e a distância de travagem, de modo a obter o valor da distância necessária para imobilizar o veículo, distância de paragem.

De acordo com [46] são necessários 65 m para a imobilização segura do veículo que circule a 50 Km/h, valor definido como alcance mínimo da comunicação com o veículo neste protótipo. Embora o tempo de reação e o tempo de travagem possam sofrer influências de fatores circunstanciais relacionados com o condutor e/ou com o ambiente e que vão, conseqüentemente, alterar a distância de paragem. Efetuando, por exemplo, o cálculo através da calculadora de distâncias disponibilizada por [51] é perceptível uma variação resultante da alteração do tempo de reação e da distância de travagem do veículo com base em testes feitos por diversas empresas. Em [50] consideram-se ainda valores diferentes para o cálculo da distância de paragem, no entanto ao longo deste trabalho optou-se por utilizar os dados referidos em [46].

A ocorrência de situações complexas, em determinados cenários pode impor uma distância de paragem superior. Pois, embora o sinal do semáforo deva ser recebido no interior do veículo a uma distância mínima de 65 m, para o cenário de aplicação proposto e de acordo com [46] para permitir a sua imobilização em segurança, poderá ser desejável dispor de uma distância de receção superior, de modo a abranger algumas variações, nomeadamente da velocidade a que se aproxima o veículo, se a velocidade de circulação for de 60 Km/h a distância de paragem passa a ser de 85 m.

### 3.2.2 Cenários de aplicação

Atendendo às características descritas depreende-se que este sistema foi pensado para aplicação em meios urbanos ou eventualmente rurais. O meio onde é desejável a sua utilização é bastante relevante pois os requisitos exigidos nos diversos ambientes variam.

Por exemplo, nas autoestradas a velocidade a que circulam os veículos é muito superior à permitida nos meios urbanos e isso implica que os critérios a seguir na exposição da informação ao condutor sejam diferentes. Nestas vias o automóvel passa muito rapidamente pelos pontos de comunicação exigindo que o reconhecimento, a troca de informação entre dispositivos e a sua posterior apresentação ao condutor deva ser um processo muito mais rápido que nos cenários urbanos ou rurais. Este cenário influenciará diretamente as escolhas tecnológicas a empregar, pois devem possuir algumas características, nomeadamente taxas de transmissão de dados e alcance que consigam dar resposta aos objetivos.

O tipo de informação a disponibilizar também é variável em diferentes meios. O recurso a semáforos para coordenar situações complexas de gestão de trânsito é útil e usual apenas em contexto urbano, deixando de fazer sentido nas autoestradas.

Através dos exemplos, facilmente se depreende que o sistema proposto neste trabalho pode deixar de ser eficiente se for aplicado em meios para os quais não foi projetado.

Na secção 3.1 explanaram-se a configuração e condições requeridas no controlo do trânsito através de semáforos. O novo sistema poderá aplicar-se em locais como os referidos anterior-



mente, ou seja, interseções de vias, onde a visibilidade é geralmente reduzida, e a sinalização semafórica pode trazer maior segurança e fluidez ao trânsito rodoviário. Na figura 3.4 observa-se um cenário de utilização possível.

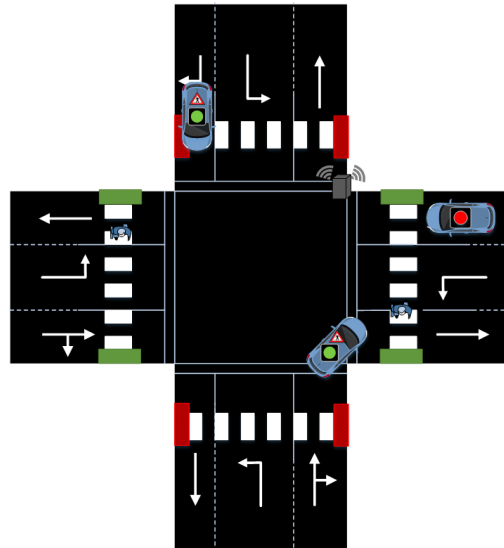


Figura 3.4: Cenário de utilização: Interseção de quatro vias

Relativamente aos componentes do sistema mantém-se a presença de um dispositivo controlador, que coordena todos os movimentos na interseção eliminando a existência de conflitos de passagem. Consegue-se assim, comparativamente aos sistemas de semáforos atualmente aplicados, uma redução do número de infraestruturas e, conseqüentemente, do custo de implementação, bem como da invasão das estradas por mobiliário urbano, facilitando possíveis necessidades de alteração das vias.

Junto às passadeiras mantém-se a sinalização luminosa exterior para peões.

Ao aproximar-se da interseção, em qualquer uma das direções, o veículo recebe informação, atempadamente, quanto à possibilidade de seguir. Na circunstância de poder avançar durante uma fase conflituosa com a passagem de peões, tendo que lhes ceder a passagem na mudança de direção, será intensificado o alerta.

O mecanismo de coordenação proposto segue os princípios expostos em 3.1, a inovação relativamente ao que foi apresentado na secção mencionada trata-se da comunicação entre todos os intervenientes que é feita sem recurso a ligação física, e em que o semáforo é disponibilizado ao condutor dentro do próprio veículo.

O cenário representado na figura 3.4 é apenas um exemplo de uma das situações possíveis de utilização, podendo o sistema ser aplicado a qualquer tipo de interseção, por exemplo, de 3 vias, desde que considerada vantajosa a utilização de sinalização semafórica.

### 3.3 Arquitetura Proposta

Como já foi mencionado anteriormente, o objetivo é desenvolver um método que possibilite a implementação de um semáforo no interior do veículo. O que implicou seguir alguns critérios relativamente à opção da tecnologia a utilizar. Considerou-se então desejável que esta fosse simples, não obrigasse a grandes mudanças no veículo e estivesse acessível a todos os condutores.

Assim, o smartphone foi o meio selecionado para ser a interface com o utilizador, dada a sua grande aplicabilidade, encontrando-se integrado no quotidiano das pessoas e dispendo de vasta tecnologia integrada que lhe confere grande capacidade funcional.

De entre as diversas opções de comunicações existentes para estabelecer a ligação entre todos os constituintes do sistema, a escolha recaiu no BLE, em grande parte, por ser uma das formas de comunicação com a qual o smartphone já está habilitado e porque como foi já referido anteriormente, tem características interessantes de explorar no contexto rodoviário.

A figura 3.5 esquematiza a arquitetura desenvolvida, na qual se distinguem três constituintes principais. Na figura 3.6 encontra-se o mapeamento da arquitetura proposta num cruzamento de estrada.



Figura 3.5: Arquitetura do sistema proposto. Em 1 está representado o controlador, em 2 o dispositivo junto da passadeira e em 3 o dispositivo a integrar no interior do veículo.

Um diagrama temporal do funcionamento da interação desejada para o sistema encontra-se descrito na figura 3.7.

O controlador principal apenas transmite os estados. Todos os dispositivos junto das passadeiras passam por um período de atualização e depois de retransmissão do estado recebido. Para situações de interseções de maior área esta disposição torna-se mais interessante pois consegue estender-se o sinal do controlador para as vias de acesso. No período de transmissão é definido, em todos os dispositivos, o intervalo de anúncio desejado, para que se possa então fazer o envio da informação estando disponível aos veículos que se aproximem da interseção. Tal como foi visto na figura 2.7, esses eventos de anúncio são constituídos não só pelo intervalo desejado, mas também por um período que é definido pela camada de ligação pseudo aleatoriamente, sendo assim durante os períodos de retransmissão de todos os dispositivos os eventos de anúncio diferem de milissegundos para que possam coexistir sem colidir.

**Controlador principal:** Representado por 1 na figura 3.6, este dispositivo é constituído por um módulo que possibilita a comunicação via BLE, e um componente que permite o controlo do seu comportamento. O controlador principal é o que coordena e indica todos os estados das sinalizações dos dispositivos à sua volta. Na figura 3.8 está a representação do funcionamento desejado. Consiste em fazer o anúncio aos dispositivos sobre o seu controlo do estado atual da interseção, de modo sequencial. Sempre que se esgota o tempo definido para aquele estado, o controlador procede ao envio do estado seguinte, até que se atinja o estado

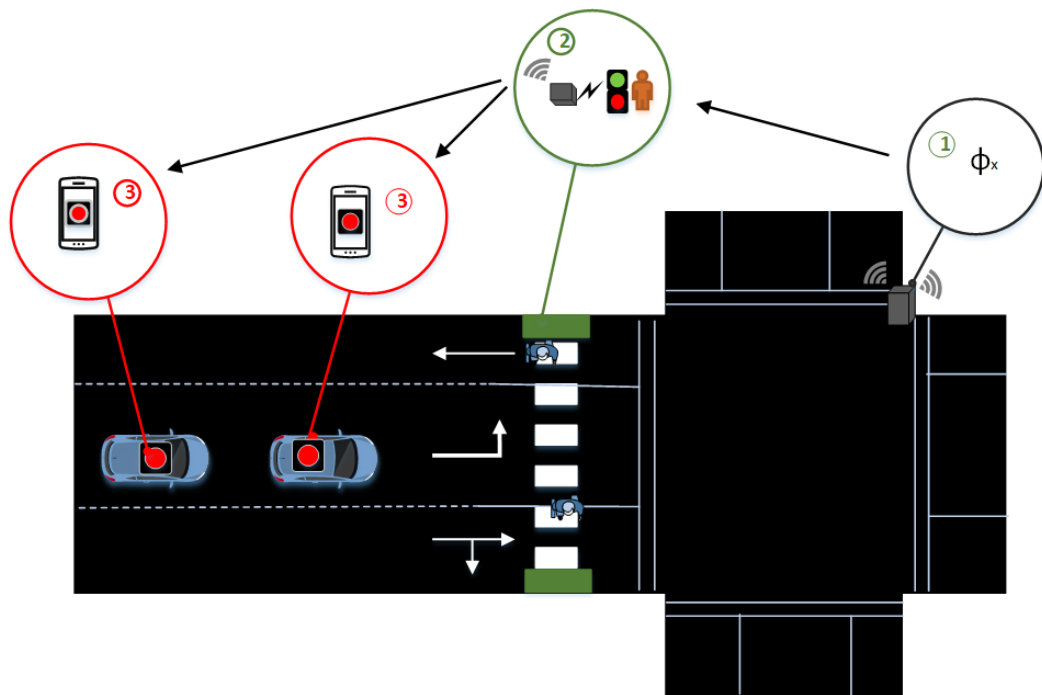


Figura 3.6: Mapeamento da arquitetura do sistema proposto num cruzamento de estradas. Em 1 está representado o controlador, em 2 o dispositivo junto da passadeira e em 3 o dispositivo a integrar no interior do veículo.

final, voltando depois a transmitir o estado inicial. Tem que estar posicionado de modo que as mensagens enviadas por este possam ser escutadas por todos os dispositivos que estão sob o seu controlo.

Para tirar maior partido das novas funcionalidades do BLE, o módulo do controlador faz a transmissão de dados sem nunca estabelecer uma conexão, ou seja, tem apenas eventos de anúncio, onde envia pacotes não conectáveis e sem direção específica, ficando a informação contida no pacote disponível a todos os dispositivos que estiverem no seu alcance. Apesar de, no BLE, podermos ter uma piconet com um número mais elevado de escravos, se não se estabelecer conexão, havendo apenas eventos de anúncio, não há qualquer limitação no número de dispositivos que podem estar a receber a informação. Para além disso o emparelhamento de dispositivos para troca de dados deixa de ser necessário pelo que o tempo dispendido nesse processo deixa de existir, o que é relevante para situações sensíveis temporalmente. Assim a informação transmitida pelo controlador fica disponível, ao mesmo tempo, a todos os dispositivos a escutar os canais de anúncio.

**Dispositivo que permanecerá junto das passadeiras:** Representado em 2 na figura 3.6. O estado enviado pelo controlador é recebido, interpretado e retransmitido por este dispositivo que, por sua vez, está fisicamente ligado aos semáforos dedicados ao controlo dos peões, pelo que, entre outras funções, tem o dever de atualizar a cor dos mesmos. A sua constituição física é igual à do controlador mas é a sua funcionalidade que altera. A sua função encontra-se descrita na figura 3.9 e pode ser dividida em três etapas, distinguindo-se tarefas específicas.

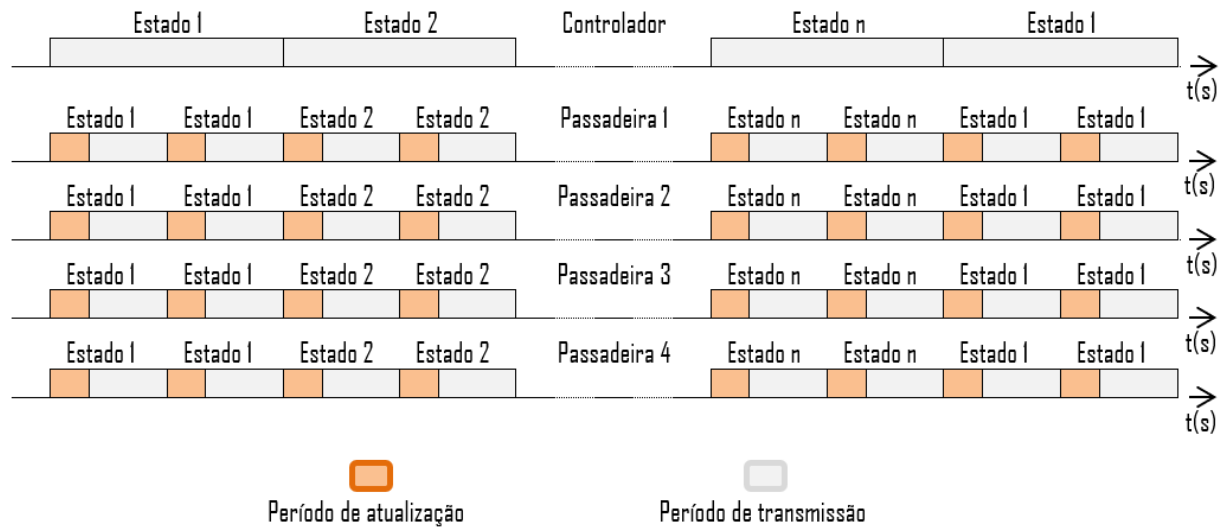


Figura 3.7: Diagrama temporal do funcionamento do sistema proposto

- Na etapa um encontra-se à escuta dos canais de anúncio e está disponível para receber os pacotes de anúncio enviados pelo controlador. Para tornar este processo mais seguro, os dispositivos, junto à passadeira, estão definidos para apenas interpretar os pacotes vindos de um endereço específico, ou seja, o do dispositivo controlador.
- Na etapa dois faz o tratamento da informação recebida, do endereço desejado. A mensagem deverá conter o estado da interseção, ou seja, a fase, ou fases, em que se encontra. Perante essa informação será feita a devida atualização da sinalização luminosa direcionada aos peões.
- Na terceira etapa o dispositivo deve apenas fazer o envio da informação. Esta mensagem é também enviada em pacotes de anúncio, não direcionais, nem conectáveis, através dos canais de anúncio. Esta etapa disponibiliza, aos condutores que se aproximam da interseção, o conhecimento sobre o estado da mesma. Visto que, neste modo, não são exigidas conexões para troca de informação, esta fica disponível, ao mesmo tempo, a todos os condutores que estiverem na sua proximidade. Neste momento é fundamental o recurso dos dispositivos a este modo de troca de informação possibilitada no BLE, uma vez que podem surgir inúmeros utilizadores que necessitam de aceder rapidamente à informação atualizada.

No que respeita a este constituinte, é de salientar ainda, que dada a importância de manter o sinal disponível aos utilizadores, para maximizar a oportunidade dos veículos receberem o sinal, o período de atualização do dispositivo, ou seja, etapas um e dois, deve ser consideravelmente mais reduzido que o período da etapa três.

Outra nota importante é que de cada lado da passadeira estará um dispositivo como o representado em dois. Apesar de serem dois distintos, o seu funcionamento será sincronizado, ou seja, devem mudar o seu estado ao mesmo tempo, para que a mudança da sinalização luminosa dos dois lados atualize ao mesmo tempo.

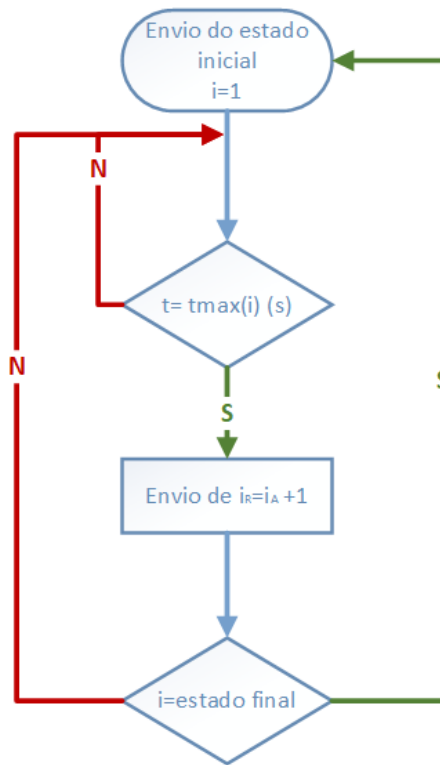


Figura 3.8: Fluxograma representativo do funcionamento do controlador

**Dispositivo de comunicação com o condutor:** Representado em 3 na figura 3.6, este é o dispositivo que permite a comunicação com o condutor, via smartphone. O funcionamento desejado encontra-se representado na figura 3.10. A aplicação deve detetar os dispositivos BLE em redor e filtrar o dispositivo que lhe interessa, ou seja, o que está situado junto à passadeira, no seu sentido de circulação. Depois deve fazer a interpretação das mensagens por ele enviadas e de acordo com as mesmas disponibilizar, ao utilizador, a sinalização luminosa da interseção.

Note-se que a arquitetura apresentada na figura 3.6 inclui os elementos mínimos necessários para o sistema funcionar como desejado, num caso simples. Numa interseção de quatro vias o componente 2 seria colocado em todas as vias de aproximação à interseção.

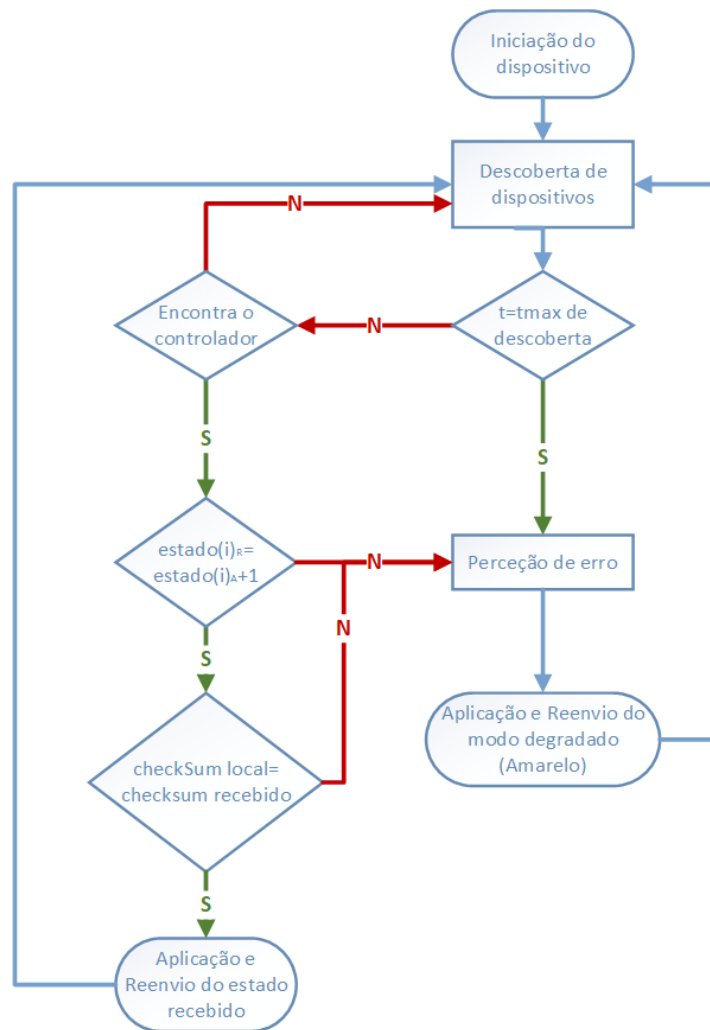


Figura 3.9: Fluxograma do funcionamento dos dispositivos junto das passadeiras

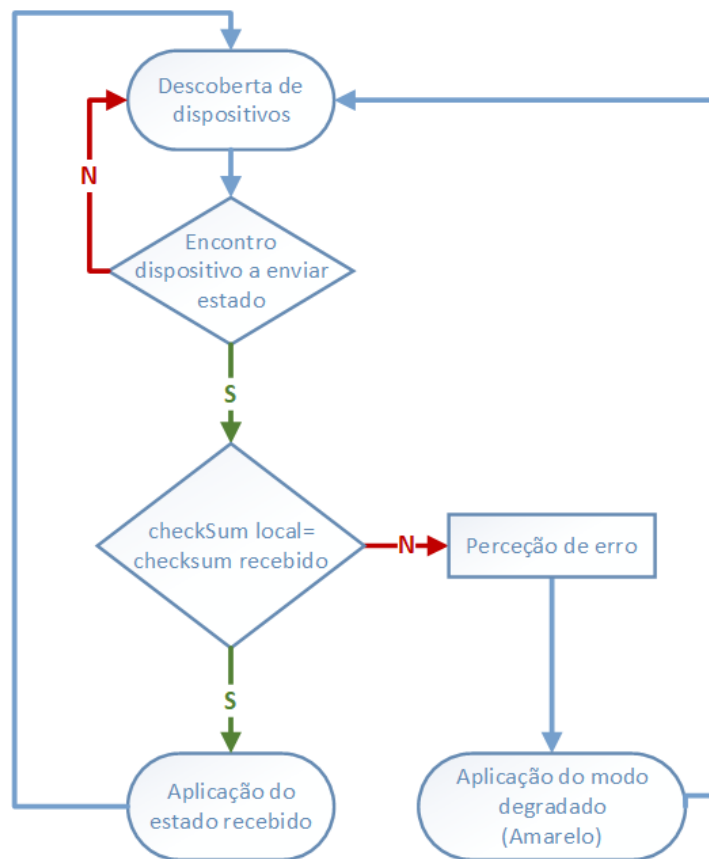


Figura 3.10: Fluxograma do funcionamento das interfaces com o condutor





## Capítulo 4

# Implementação

O terceiro capítulo expôs, em detalhe, os aspetos físico e estrutural dos semáforos tradicionais. E é a este nível que se pretende mudar o panorama do transporte urbano, com a introdução de um novo elemento no sistema de controlo de tráfego, eliminando os semáforos físicos no exterior que por sua vez surgirão no interior do automóvel, em contacto direto e permanente com o condutor. Porém, no que respeita à coordenação temporal dos mesmos é desejável sustentar-se no conhecimento existente, através de algoritmos testados e já implementados. Assim, este capítulo irá explanar a implementação e conciliação prática da inovação na estrutura física com os conceitos expostos anteriormente, em termos de controlo temporal.

A alteração estrutural recai essencialmente na possibilidade de todos os componentes comunicarem sem recurso a ligação física, via BLE. No controlo do sistema têm grande destaque tanto os conceitos de fases e movimentos como o diagrama de barreira-e-anel. Apresentam-se também a execução prática e caracterização funcional da arquitetura proposta em 3.3.

Inicialmente é feito o enquadramento da informação explicando o modo como os dados recolhidos do diagrama de barreira e anel serão aplicados no controlo do sinal semafórico e descreve-se ainda o material utilizado. Nas secções seguintes encontra-se a explanação detalhada dos aspetos de implementação mais significativos relativamente a cada elemento integrante do sistema.

### 4.1 Enquadramento

Perante a variabilidade e complexidade que podem surgir nas interseções optou-se por uma análise esquemática geral de uma interseção de quatro vias e posteriormente o desenho da arquitetura a implementar foi efetuado apenas para uma via, no sentido de simplificar as estruturas permitindo uma análise desde o planeamento até à sua concretização.

Neste contexto surge o diagrama de barreira-e-anel que se apresenta em 4.1 e embora semelhante ao exposto em 3.3, este possui uma fase líder para a passagem de veículos, descrita no início das fases 4 e 8. A fase 1 do diagrama da figura 4.1 está representada na tabela da figura 4.2 pelo número 1 dos movimentos dos veículos, assim como todas as restantes fases são representadas na tabela da figura 4.2 pelos respetivos números aos quais se acresce 10 para representar os movimentos permitidos nessa fase mas que não são protegidos, por exemplo, na fase 2 é permitida a passagem aos movimentos 2 e 12. Quanto à passagem dos peões o sentido de passagem representado no diagrama 4.1 é aplicado na tabela da figura 4.2 nos

movimentos para peões, identificados com o número da fase em que ocorrem. Concretizando a informação do diagrama, foi possível elaborar a tabela presente na figura 4.2 e onde se pode visualizar todos sinais pretendidos tanto para peões como para veículos, ao longo do tempo. Nesta tabela em cada estado encontram-se agrupados os movimentos das fases compatíveis e simultâneas. A sua execução baseou-se na análise descrita no capítulo 3, afirmando que cada fase especifica determinados movimentos permitidos e protegidos evitando os conflitos entre veículos à passagem na interseção.

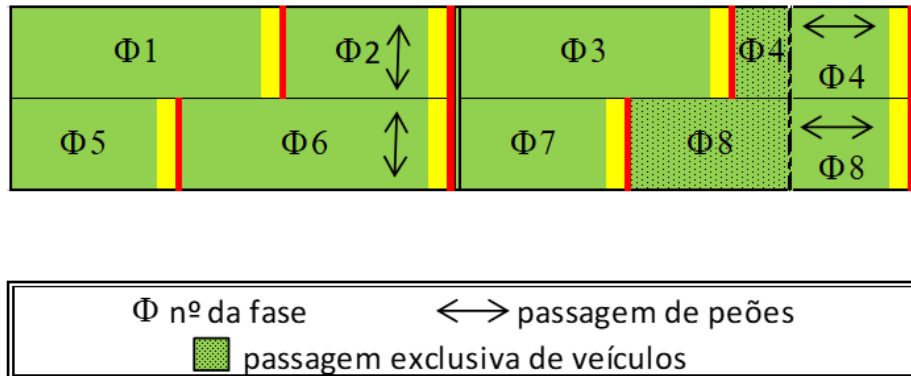


Figura 4.1: Diagrama de barreira-e-anel utilizado na implementação

Estados	Peões				Veículos											
	$P_2$	$P_4$	$P_6$	$P_8$	$V_{N \rightarrow S}$			$V_{S \rightarrow N}$			$V_{E \rightarrow O}$			$V_{O \rightarrow E}$		
					5	2	12	1	6	16	7	4	14	3	8	18
1	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
5	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
6	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
7	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
8	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
9	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
10	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
11	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
12	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
13	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Figura 4.2: Tabela da descrição do sinal semafórico na interseção ao longo do tempo

O projeto apresentado contempla apenas uma interseção e valida somente um troço de

aproximação tal como representado na figura 3.6, uma vez que como já se referiu, se pretende implementar e testar num local concreto e em situação real.

Sendo assim a implementação feita consistiu na passagem dos dados da tabela apresentada na figura 4.2 aos dispositivos.

## 4.2 Elementos Utilizados no Desenvolvimento

Nesta secção serão descritas algumas características consideradas relevantes dos elementos selecionados para compor o dispositivo a utilizar como controlador, junto da passadeira e a variante alternativa ao uso da aplicação no interior do veículo.

Ainda na presente secção serão apresentadas as ligações relevantes entre os dois constituintes.

### 4.2.1 Raspberry Pi

Como elemento básico para programação do sistema usaram-se Raspberry Pi modelo B, com 26 portos de entradas/saídas. Neste trabalho foram relevantes:

- o porto físico 1 para alimentação do sistema que fornece 3.3V;
- o porto físico 6 constitui a massa do sistema;
- três portos físicos com propósitos gerais, General Purpose Input/Output (GPIO) usados para ligar leds em dois dos dispositivos;
- dois portos físicos dedicados à porta série UART do Raspberry Pi, o porto físico 8 (GPIO 14) é o transmissor e o porto físico 10 (GPIO 15) é o recetor.

O acesso e configuração dos portos foi efetuado com recurso à biblioteca `wiringPi()` [52].

Na configuração dos GPIO recorreu-se às funções disponibilizadas pela biblioteca [53]. Estas permitiram que se definissem os portos como saídas e ainda escrever-lhes '1' ou '0' de modo a proceder à ativação/desativação de leds.

Para além da administração dos portos gerais, a `wiringPi()` ainda disponibiliza uma biblioteca dedicada à operação das portas série do Raspberry Pi [54], assim para utilizar a UART recorreu-se ainda ao uso desta biblioteca. Todos os dispositivos Raspberry Pi comunicarão através do módulo RN4020 e será usada a UART, para tal deve, inicialmente, abrir-se a porta série e definir o *baudrate* desejado. A `wiringPi()` disponibiliza uma função específica para tal. Depois disso é retornado um *file descriptor* utilizado para fazer receção e transmissão de caracteres, com o apoio das funções de escrita e leitura disponibilizadas também na biblioteca das portas série da `wiringPi()`.

### 4.2.2 Módulo BLE Microchip RN4020

Para habilitar os Raspberry Pi a comunicar, neste caso via BLE, foi escolhido o módulo Microchip RN4020 [6] [7], cuja estrutura interna se encontra representada na figura 4.3.

O RN4020 é um módulo de reduzidas dimensões e baixo custo. Tem integrada a stack protocolar BLE 4.1, que age em conformidade com o especificado em Bluetooth Core Specification v4.1 [7]. Pode ser configurado e controlado através do envio e receção de comandos

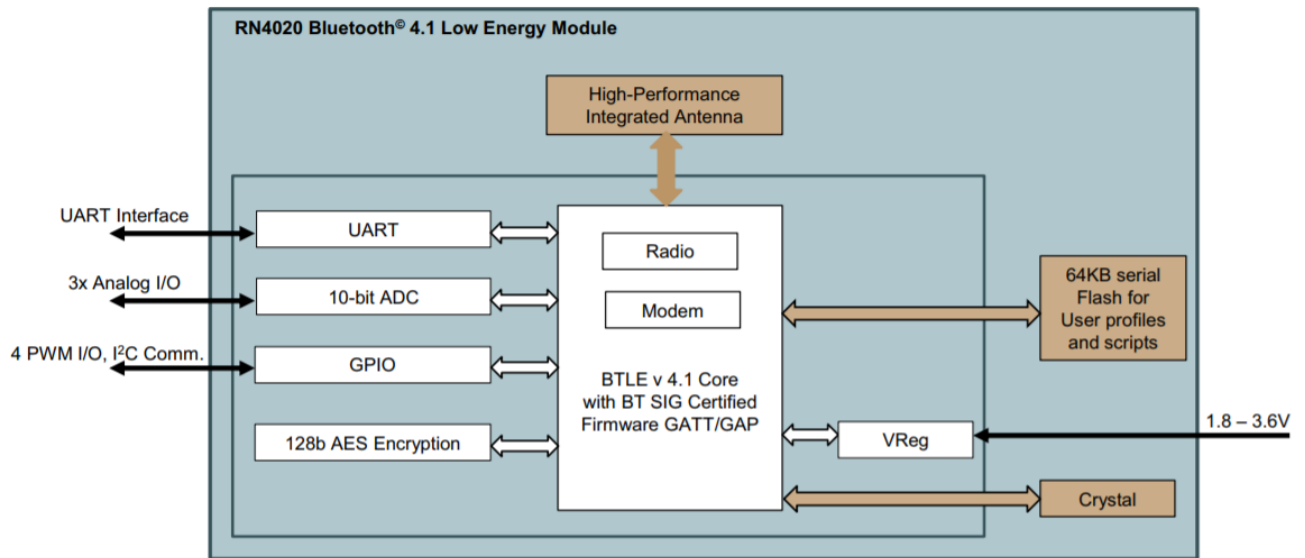


Figura 4.3: Diagrama de blocos do módulo RN4020 [6]

ASCII, via interface UART de alta velocidade e também através dos seus portos físicos. Existem diversos tipos de comandos, destacando-se o grupo de comandos de ação do módulo, que de acordo com [7] permitem iniciar uma funcionalidade bem como exibir informação crítica. A taxa de transmissão da UART pode ser ajustada de 2400 a 932K bps. A sua tensão de operação pode variar entre os 1.8 e os 3.6 V, utilizando-se habitualmente a tensão de 3.3 V, também escolhida para este estudo por corresponder à tensão de saída dos portos físicos do Raspberry Pi. A banda de operação é ISM de 2.402 até 2.480 GHz [6].

Outra característica a salientar é a capacidade de permitir um alcance superior a 100m [6], valor que poderá ser satisfatório para as necessidades da prova de conceito do sistema aqui proposto e permitirá extrair conclusões. Para conseguir maior alcance é aconselhado o uso da potência máxima do transmissor permitida pelo módulo, 7.5dBm. O diagrama de radiação da antena do módulo encontra-se apresentado na figura 4.4.

Estes aspetos tornam a utilização deste módulo atrativa mostrando-se como uma boa solução a considerar no emprego da tecnologia BLE, pois consegue conciliar simplicidade e eficácia. O facto da stack protocolar estar já integrada no próprio módulo permite que, através do uso de alguns comandos, se consiga rapidamente definir a ação do mesmo, suportando uma variedade de perfis que lhe dão grande flexibilidade à configuração e utilização.

Na figura 4.5 observa-se a representação esquemática dos portos de saída do módulo.

Os portos 7 e 15, WAKE\_SW e WAKE\_HW respetivamente, colocam o módulo em diferentes estados de operação. Quando WAKE\_SW está a ‘0’ o módulo encontra-se em modo adormecido e a UART não responderá, a menos que a taxa de transmissão definida seja de 2400 bps. Quando o WAKE\_SW está a ‘1’ este passa ao modo ativo, que depois de acordado, fica apto a receber comandos via UART.

O WAKE\_HW define o estado de operação do módulo na medida em que quando está a ‘1’ permite tirar o módulo do modo dormente.

Destacam-se ainda os portos 5 e 6 que são respetivamente, o transmissor e o recetor da

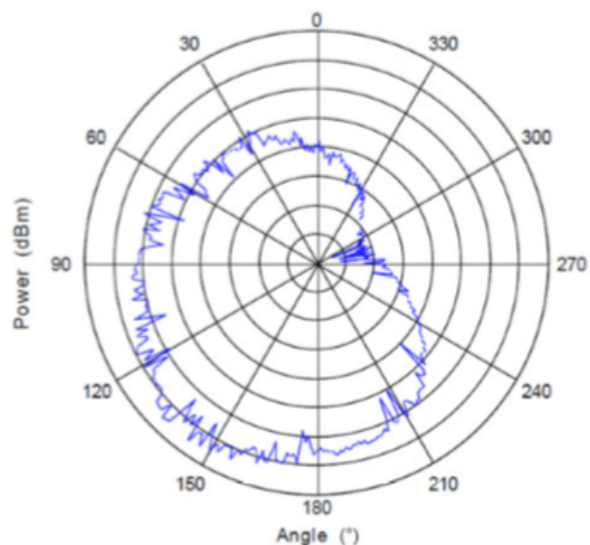


Figura 4.4: Diagrama de radiação da antena do módulo RN4020 [6]

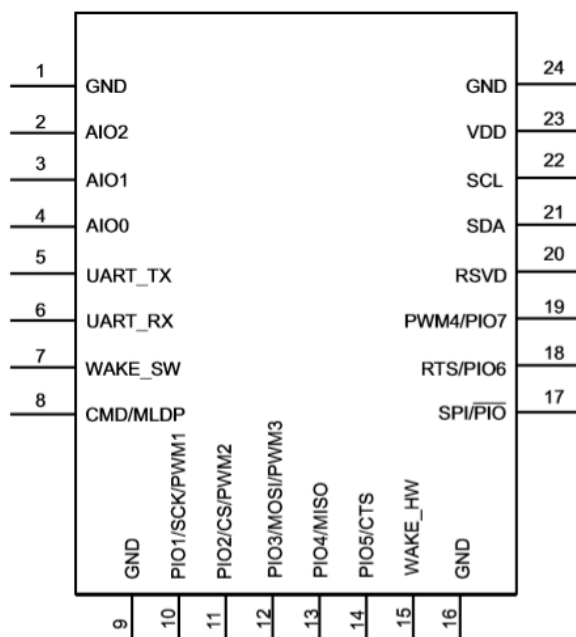


Figura 4.5: Esquema dos portos de saída do RN4020 [6]

UART, interface utilizada para estabelecer a comunicação entre o Raspberry Pi e o módulo.

Os papéis GAP suportados pelo RN4020 são de periférico, central, observador e transmissor. Anteriormente à versão firmware 1.20, para definir o papel GAP desejado para o módulo

era necessário, em primeiro lugar, enviar um comando próprio para essa configuração, mas a partir da versão 1.20, ao remeter determinados comandos de ação que permitem especificá-la de acordo com o desejado, o próprio módulo muda de imediato para o papel GAP adequado, sem requerer quaisquer configurações extra. Os módulos utilizados dispõem da versão firmware 1.23.5, pelo que a mudança do papel GAP é regulada tal como discriminado na tabela 4.1:

Comando de ação	Papel GAP
Ao iniciar	Nenhum
A - Início de anúncio	Periférico
F - Início de scanning	Central
E - Comando de conexão	Central
J,1 - Entrar no modo observador	Observador
J,0 - Sair do modo observador	Periférico
N - Entrar no modo transmissor	Transmissor

Tabela 4.1: Tabela da relação entre comandos de ação e alteração do papel GAP [7]

A figura 4.6 exibe a representação esquemática resultante da integração destes dois componentes.

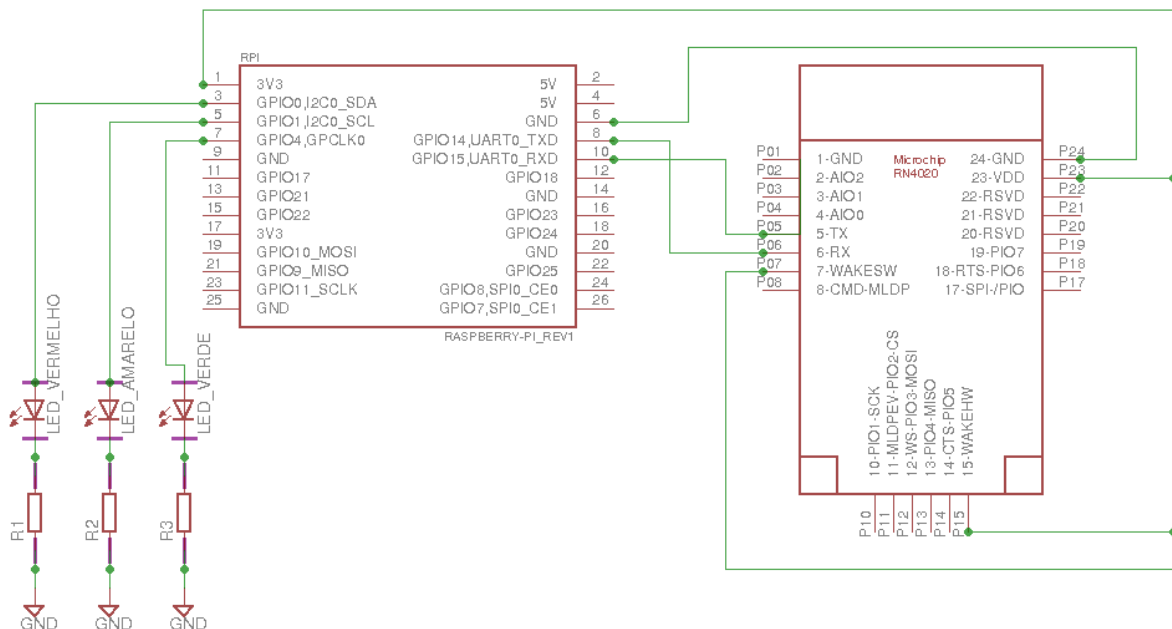


Figura 4.6: Esquemático da ligação dos dois componentes escolhidos

A constituição física que se apresenta em 4.6 é a utilizada nos diferentes dispositivos em estudo: o controlador, a passadeira (sem o uso dos leds) e do automóvel na versão anexável.

## 4.3 Controlador

É o controlador que executa toda a gestão temporal do comportamento na interseção.

O resultado dessa execução será um estado que é, posteriormente, enviado aos dispositivos e permitirá sinalizar adequadamente a interseção aos veículos em aproximação.

O módulo do controlador encontra-se sempre no modo transmissor (*Broadcaster*), pois o essencial no seu funcionamento é que transmita os dados resultantes da sua programação aos restantes constituintes do sistema semafórico.

Depois de definir o algoritmo de controlo que se deseja implementar na interseção, o comportamento deste dispositivo é simples e pode descrever-se de forma simplificada tal como representado no código:

```
int main (void)
{
    sum = calculaChecksum (estadoi);
    payloadEstadoi = definirPayload (estado i, sum);

    while 1
    {
        advertising (payloadEstadoi);
    }
}
```

- `calculaChecksum (estadoi)`:

Numa fase inicial o controlador procede ao carregamento da tabela que o fará reconhecer o comportamento que é esperado para cada estado, ou seja, vai tomar conhecimento do conteúdo da tabela representada na figura 4.2.

Depois de carregado esse conteúdo, neste componente é aplicado um mecanismo de checksum a cada estado. O mecanismo de checksum faz a soma dos caracteres ASCII da representação de cada estado, de acordo com a tabela da figura 4.2, ou seja, as fases que compõem o estado bem como os movimentos protegidos e permitidos (se os houver). O resultado deste processo permite então associar, localmente, um valor conciso, específico e representativo das ações em cada estado, e que deve ser o mesmo para todos os dispositivos que se encontram na interseção regulada pela tabela da figura 4.2. O resultado obtido no caso implementado encontra-se presente na tabela 4.2.

Este processo é de extrema relevância uma vez que as mensagens difundidas entre todos os constituintes do sistema transmitirão apenas o estado atual e não o seu significado em termos de verdes e vermelhos nos diversos semáforos.

Desta forma conseguem prevenir-se falhas de interpretação do estado enviado ou recebido. Se o valor do checksum recebido e conhecido localmente for sempre o mesmo sabe-se que as fases e movimentos que definem localmente o estado são as mesmas em todos os dispositivos intervenientes, logo há a certificação da coerência e integridade da informação difundida pelo sistema.

- `definirPayload (estadoi, sum)`:

Estados	Valor do checksum
1	341
2	406
3	493
4	558
5	641
6	771
7	349
8	414
9	503
10	568
11	739
12	653
13	783

Tabela 4.2: Tabela da correspondência de estados e valor de checksum

Para que o módulo envie a mensagem específica desejada é necessário definir a carga paga do PDU no pacote dos canais de anúncio. Na secção 2.3, em 2.3.1, foi descrita a estrutura destes pacotes. Analisando [7], sabe-se que para a definição do conteúdo das mensagens de anúncio é usado o comando de ação ' $N, < hex >$ ', onde  $< hex >$  é o conteúdo que se pretende enviar. Com o RN4020 o tamanho máximo deste campo é de 25 bytes, no formato hexadecimal.

Assim, nesta função, calculado já o valor checksum e sabendo o estado que deve anunciar, a carga paga definida será igual à trama representada na figura 4.7.

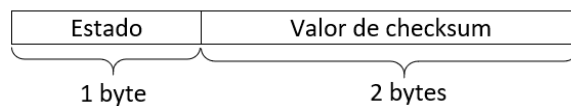


Figura 4.7: Carga paga dos PDU's dos pacotes enviados pelo controlador

- `advertising (payloadEstadoi)`:

Depois de todas as definições ajustadas, esta função trata de disponibilizar por um período de tempo específico a mensagem a todos os dispositivos no alcance.

Olhando para a tabela 4.1, verifica-se que o comando  $N$  é o que coloca o módulo no papel GAP de transmissor, o desejado para este dispositivo. Nesta função faz-se o envio deste comando para a UART do Raspberry Pi, seguido do comando ' $A, < hex16 >, < hex16 >$ '.

Este último só é aceite com sucesso quando temos o módulo no modo periférico ou transmissor, neste caso foi previamente enviado o comando  $N$  para o colocar em modo de transmissor, fazendo com que o comando  $A$  fosse aceite com sucesso. Tal como foi dito em 2.3.1 os eventos de anúncio podem ser de vários tipos. No caso do RN4020, quando enviamos o comando  $A$ , estando o módulo no modo transmissor, os eventos de anúncio serão do tipo não



conectáveis e não direcionados, o conteúdo da mensagem está alocado nos dados específicos do fabricante.

Na estrutura do comando *A* temos dois parâmetros constituídos por 16 bits em formato hexadecimal. O primeiro parâmetro serve para especificar o intervalo de anúncio desejado, o segundo indica o tempo total desejado para a janela de anúncio. Ambos os campos consistem em tempos em milissegundos e o segundo tem que ser maior do que o primeiro.

De acordo com os estudos de diversos autores apresentados em 2.5 é referido que uma atualização de dados com uma frequência de 10Hz dá resposta aos requisitos da maior parte das aplicações SIT, sendo assim o intervalo de anúncio deve deter um valor próximo dos 100ms.

Visto este componente não comunicar diretamente com os utilizadores finais (condutores), não se trata de uma situação temporal crítica, pelo que o intervalo de anúncio selecionado foi de 120ms. Esta opção fundamenta-se na redução do consumo energético, pois quanto mais reduzido for o intervalo de anúncio maior será a frequência de transmissão de mensagens exigida ao módulo, levando a um consumo energético superior uma vez que passa um período de tempo maior a enviar pacotes para os canais de anúncio. Tendo este facto em consideração, escolheu-se um valor que admitisse períodos ativos do módulo mais reduzidos, tendo sempre em atenção não comprometer a segurança e eficácia do sistema. A janela de anúncio deve ser ajustada ao tempo que se pretende estar a anunciar um determinado estado. Neste caso, e para efeitos de testes foi escolhido um valor de 20s. A figura 4.8 representa o processo temporal de anúncio definido.

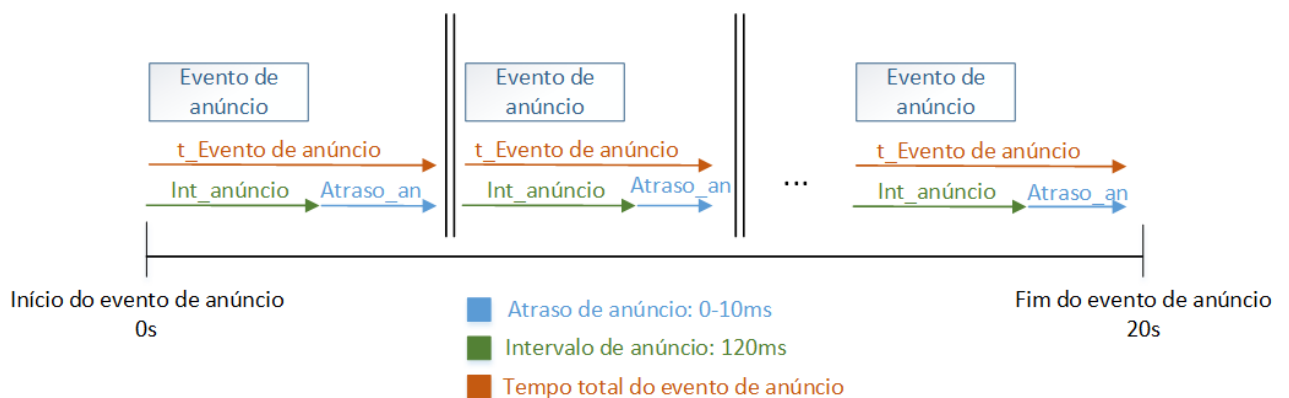


Figura 4.8: Sequência de eventos de anúncio no controlador

#### 4.4 Dispositivo Junto da Passadeira

As funções principais deste dispositivo são transmitir corretamente o sinal do controlador aos veículos e ainda atualizar a sinalização física dos peões sempre que necessário.

Perante a possibilidade da geometria das interseções não permitir ao sinal do controlador alcançar diretamente os veículos que se aproximam, respeitando os requisitos acima identificados, devido a limitações no alcance do BLE, este dispositivo faz uma extensão do sinal garantindo a cobertura desejada.

A distância a que, dentro do veículo, fica disponível o sinal do semáforo é de extrema importância no sentido em que deve permitir a paragem, em segurança sempre que se justifique. Assim torna-se indispensável garantir que essa distância se encontra sempre coberta. Entende-se ainda desejável que este sistema antecipe a percepção do condutor relativamente à permitida pelos semáforos atuais, preparando-o previamente para a situação que irá encontrar.

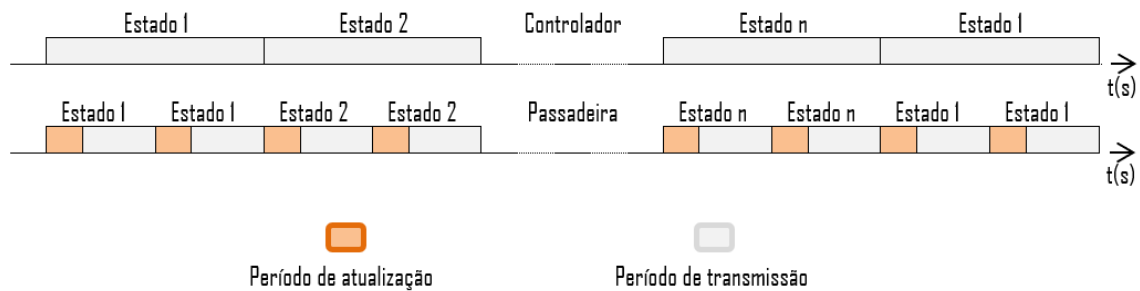


Figura 4.9: Sequência de estados do dispositivo

O seu funcionamento divide-se em dois estados principais, uma vez que recebe informação do controlador e posteriormente deverá reenviá-la. A figura 4.9 representa o dispositivo da passadeira nos estados de atualização e de retransmissão. Como já foi referido e se pode comprovar pela figura 4.9 é evidente o cuidado em estabelecer um período de atualização consideravelmente mais reduzido, quando comparado com o de retransmissão, para que o sinal permaneça a maior parte do tempo disponível aos veículos que se aproximam.

A atividade do módulo pressupõe uma sequência de ações assumindo diferentes papéis que se encontram expostos na figura 4.10.

#### 4.4.1 Período de atualização

Durante este período o módulo assume o papel GAP de observador, faz a descoberta do controlador e interpreta a mensagem recebida atualizando ainda o seu estado.

```
int main (void)
{
    while 1
    {
        sendCommand(J, 1);
        estado=scanning(controlador);
        if(estado == estadoAnterior + 1)
            ...

        sendCommand(J, 0);
    }
    ... }
}
```

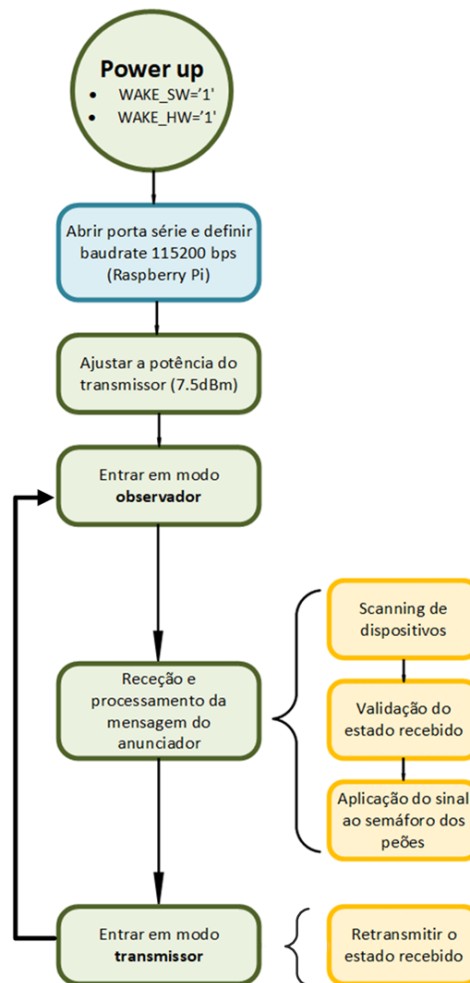


Figura 4.10: Ações do dispositivo, em que se discriminam os papéis BLE adotados pelo RN4020. A verde estão descritas ações relativas à configuração e ação do RN4020, a azul relativas à UART da Raspberry pi, a amarelo a descrição em maior detalhe de ações específicas do módulo.

Atentando que o controlador se encontra no modo transmissor, é necessário garantir que este dispositivo inicia o modo observador pois é o único papel que permite ao módulo receber os pacotes não direcionais e não conectáveis, enviados pelo controlador e que são os únicos relevantes para rececionar nesta situação. Para garantir esta ação é enviado logo de início o comando 'J,1' à UART da Raspeberry para dar indicação ao módulo do papel que deve assumir.

- *scanning(controlador)*:

Esta função encontra-se descrita resumidamente no código apresentado de seguida e tem como objetivos fazer a descoberta de dispositivos BLE nas proximidades, refinar a busca pelo endereço do controlador, receber, interpretar e verificar a mensagem recebida do mesmo e posteriormente retornar o valor do estado atual da interseção.

```

int scanning (macAddControlador)
{
    while (1)
    {
        sendCommand(F,00C8, 00C8);

        while(macAdd != macAddControlador && timePassed <= timeOut)
        {
            macAdd=readUartRx;
            addressType=readUartRx;
            rssi=readUartRx;
            broadcastMsg=readUartRx;

            if(macAdd == macAddControlador)
            {
                guardaRssi();
                estadoLido=1 byte da broadcastMsg;
                checksumLido=2 bytes da broadcastMsg;
                compareChecksum(checksumLido, estado);

                if(compareBem sucedido)
                ...

                sendCommand(J,0);
            }
        }
    }
}

```

De acordo com [7] sabe-se que o comando '*F*,*<hex16>*,*<hex16>*' é o que permite iniciar um scan ativo. Tal como no comando *A* possui dois parâmetros, o primeiro representa o *intervalo de scan* e o segundo a *janela de scan*, ambos em milissegundos. Nesta implementação estes parâmetros foram ajustados para o mesmo valor de 200ms, impondo um scan contínuo até que decorra o tempo máximo de scan permitido ou que se encontre o dispositivo desejado.

Esta fonte [7] menciona ainda a estrutura da resposta resultante da execução do comando *F*. Quando em modo observador, sempre que uma mensagem broadcast é recebida será colocada na UART. Cada nova mensagem começa numa nova linha com a seguinte estrutura:

```
<48bits MAC address>,<1bit Address Type>,<8bit RSSI value>, Brcst:<broadcast message>
```

Este aspeto permite que ao ler a UART do módulo neste dispositivo se consiga facilmente isolar o endereço do módulo transmissor daquela mensagem e compará-lo com o esperado,

armazenando logo informação associada a esse resultado de scan.

Em consonância com o código apresentado em `scanning(controlador)`, quando a comparação do endereço recebido com o esperado é bem sucedida, a mensagem recebida passa a ser interpretada.

**Trama recebida na mensagem de broadcast:**

Segundo [3] o formato dos dados anunciados respeita uma estrutura específica, e é constituída por uma fração significativa e uma não significativa, tal como pode ser analisado na figura 4.11. A significativa é composta por blocos chamados *AD structures*. Cada um destes blocos tem um byte dedicado à definição do comprimento dos seus dados. Olhando para o campo dos dados, o primeiro byte é dedicado a caracterizar o tipo de anúncio, os restantes comportam o conteúdo da mensagem transmitida. A não significativa é apenas constituída por zeros, e portanto não há relevância em transmiti-la. O seu propósito é fazer a extensão do conteúdo de forma a preencher sempre 31 bytes.

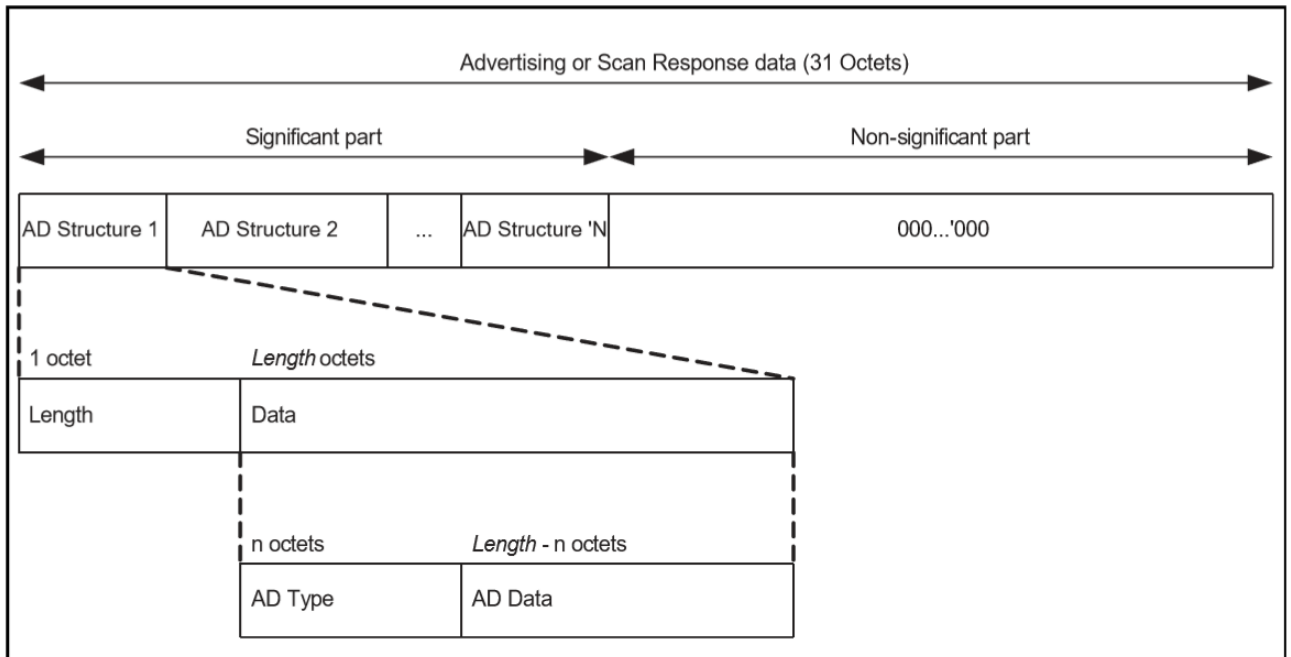


Figura 4.11: Formato das mensagens de anúncio transmitidas [3]

A mensagem de anúncio recebida, vinda do controlador é:

02	01	04	04	FF	estado	valor Checksum
----	----	----	----	----	--------	----------------

Neste caso verificam-se dois blocos de *AD structures*. O primeiro bloco é constituído por:

02	01	04
----	----	----

Sendo que '02' se refere à dimensão de 2 bytes daquela estrutura, e 01 indica o tipo de anúncio. Recorrendo a [3] sabe-se que o valor 0x01 diz respeito ao byte das flags. Neste caso o valor é 0x04, o que significa que o módulo não suporta a versão clássica do Bluetooth (BR/EDR), tendo apenas suporte para BLE tal como é dito em [7] (modo singular).

Relativamente ao bloco seguinte:

04	FF	estado	valor Checksum
----	----	--------	----------------

Pode observar-se que '04' indica que aquela estrutura é constituída por 4 bytes de dados. Existem diversos tipos de anúncio, mas como salientado em [7], ao executar-se o comando *A*, o conteúdo da mensagem encontrar-se-á nos dados específicos do fabricante. Verificando ainda em [3] percebe-se que nesse caso o valor identificador será 0xFF, seguido dos restantes dados específicos. Depois do byte dedicado à especificação do tipo de anúncio seguem-se os bytes da carga paga, definidos através do comando *N*, no controlador, estes são os dados que realmente importam para a análise seguinte. Primeiro existe um byte dedicado ao estado e de seguida 2 bytes para o valor do checksum.

Extraído o estado atual e o campo de checksum seguem-se os processos de validação do estado, começando por comparar o valor do checksum recebido com o localmente calculado. Se a tabela 4.2 estiver bem carregada o valor proveniente do controlador será exatamente o mesmo do local. Após esta verificação o estado pode ser validado, caso contrário é detetado um erro e retornado 0, para que o sinal emitido seja amarelo por segurança, simbolizando mau funcionamento, dado que a representação local do estado recebido não é coerente com a representação do estado no dispositivo controlador. O mecanismo de checksum aqui implementado é o mesmo utilizado na função `calculaChecksum(estadoi)` em 4.3.

Ao finalizar o período de atualização o comando *J,0* é enviado à UART e o módulo retirado do modo observador. Porque os dispositivos BLE, num determinado período de tempo, só podem assumir um papel GAP específico, se não se garantir que o módulo sai do modo observador não será possível iniciar qualquer outro papel, nomeadamente o oposto que fará a desejada retransmissão dos dados.

Visto que o sistema de semáforos proposto não inclui variações dinâmicas, ou seja, não prevê qualquer recolha de informação para influenciar o algoritmo aplicado, a mudança de estados realiza-se de modo sequencial. A avaliação da sequencialidade dos estados recebidos pode constituir assim outra medida de deteção de irregularidades na interação entre este dispositivo e o controlador.

Se se mantiverem sequenciais indica que não existem perdas de comunicação, eliminando o risco de haver estados que não são anunciados. Se for detetada a não sequencialidade dos estados, é assinalada a falha e o dispositivo passa a amarelo como medida de segurança devido à má comunicação verificada.

#### 4.4.2 Período de retransmissão

De uma forma muito semelhante à do controlador, neste período o módulo entra no modo transmissor reenviando, a todos os veículos na proximidade, o sinal que encontrou. É definida a carga paga através do comando *N*, e a estrutura da trama a enviar é praticamente igual à trama remetida pelo controlador. Tem 1 byte para o estado atual, seguido de 2 bytes para o valor do checksum. A variante é que no caso desta trama foram reservados bytes para fazer a identificação da interseção, ou seja, no caso de haver mais que uma interseção com este

sistema implementado é relevante saber exatamente qual a interseção na rota coincidente, tendo esta um identificador específico e único. Num ambiente urbano, por exemplo, haveriam diversas interseções sendo este identificador essencial.

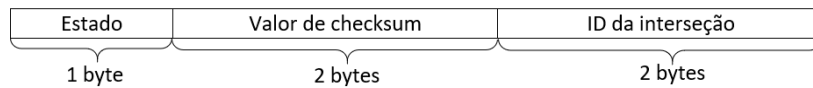


Figura 4.12: Carga paga dos PDU's dos pacotes reenviados pelo dispositivo da passadeira

Para esta prova de conceito tem-se apenas 2 bytes nesse campo mas em determinadas situações essa quantidade de bytes reservados pode não ser suficiente, havendo espaço para a aumentar. Este identificador tem elevada relevância para os veículos, pois ao contrário do que acontece com o controlador e dispositivo junto da passadeira, os veículos não têm um comportamento estático e local, sendo assim, precisam de localizar a interseção para fazer o correto carregamento da tabela relativa aos seus estados.

A finalização deste processo acontece ao iniciar o anúncio. Para isso e à semelhança do controlador usa-se uma função `advertising (payloadEstadoi, tmax)`.

```
switch (estado)
{
    case x:
        ...

        definirPayload(idIntersec, estadoi, sum);

        advertising(payloadEstadoi, tmax);

        break;

    ...
}
```

- `advertising (payloadEstadoi, tmax)`:

É através desta função que se dá início ao anúncio da mensagem definida em `definirPayload(idIntersec, estadoi, sum)`. Envia-se um comando *A* para a UART do Raspberry Pi, mas é definido apenas o intervalo de anúncio, ficando a duração total de anúncio limitada pelo tempo máximo recebido em vez de ser pelo segundo parâmetro deste comando. Ao contrário do controlador, este dispositivo foi idealizado para comunicar diretamente com veículos, pelo que, é desejável que o período entre o qual se envia um novo pacote de anúncio seja mais reduzido que no controlador. O valor do intervalo de anúncio definido foi de 80 ms, dando a possibilidade de refrescar a informação nos veículos com maior frequência.

Este comportamento manter-se-á até que se esgote o tempo máximo estabelecido para esta função (2º parâmetro enviado). O tempo máximo é calculado com base no tempo total

que se pretende que o dispositivo despenda no processo de atualização e retransmissão, tempo total de 10 s, retirando o tempo já gasto no período de atualização, que é variável em cada processo de descoberta e análise do resultado recebido, sendo desejável que fosse inferior a 1 s. Pode resumir-se que:

$$t_{\max} = t_{\text{TotalAnúncio}} = t_{\text{desejadoActEAn}} - t_{\text{dispendidoAct}}$$

#### 4.4.3 Display para peões

Para além de transmitir o estado do semáforo aos veículos, este dispositivo é responsável também por disponibilizar a sinalização luminosa aos peões. Assim, depois de receber, interpretar e verificar a mensagem dos pacotes de anúncio altera, sempre que necessário, a cor do semáforo ao mesmo tempo que retransmite a mensagem aos automóveis.

Com a ajuda da biblioteca *wiringPi()* [52], em cada estado são ativados os portos GPIO necessários da raspberry que estavam conetados a leds, simulando a sinalização física.

No trecho de código seguinte representa-se o acréscimo da implementação desta funcionalidade.

```
switch (estado)
{
    case x:

/*controlo dos GPIO*/

        digitalWrite(2,HIGH/LOW);
        digitalWrite(3,HIGH/LOW);
        digitalWrite(4,HIGH/LOW);

/*período de anúncio do estado do sinal */

        definirPayload(idIntersec, estadoi, sum);
        advertising(payloadEstadoi, tmax);

        break;

    ...
}
```

#### 4.5 Dispositivo Dentro do Veículo

A função deste dispositivo é estabelecer a ligação visual com o condutor. Deve por isso, processar toda a informação e no final apresentar ao condutor a informação essencial, o sinal semafórico que encontrará na via, exibido de uma forma simples e direta.



Como se referiu na arquitetura proposta surgiram diversas possibilidades para a interface com o condutor. Uma das alternativas recorre a um equipamento, já bastante familiar ao utilizador, como o smartphone ou dispositivo móvel semelhante. A outra propõe o recurso a um dispositivo capaz de habilitar a receção de mensagens via BLE no interior do veículo e simultaneamente fácil de anexar ao mesmo. Esta opção é viável quando não se deseja ou não seja possível o recurso à aplicação.

Nesta secção descreve-se a primeira alternativa, especificando a aplicação Android criada. Foi usado o tablet, Samsung Galaxy TabA SM-T285, com versão Android 5.1.1 e BLE para a simulação e teste da mesma.

#### 4.5.1 Aplicação Android Studio

A partir do fluxograma da figura 3.10, desenvolveu-se uma aplicação que permitisse testar o BLE quando utilizado num dispositivo móvel e verificar a sua interação com os módulos RN4020, empregues neste trabalho, recorrendo ao Android Studio. Assim, o desenho da aplicação e o cuidado de certificar o cumprimento dos requisitos de interface com o condutor, descritos no 3.2, do ponto de vista da melhor forma de apresentação da informação, não constituiu um objetivo deste trabalho. Resumindo, o foco encontra-se no estudo da comunicação e não no desenvolvimento e avaliação do melhor desenho para a aplicação.

Com o desenvolvimento da versão 4.3 (nível API 18) a Android passa a incluir suporte para BLE, englobando API's que permitem a descoberta de dispositivos, consulta de serviços e transmissão de informação [55]. Para tornar possível a partir da aplicação criada aceder às funcionalidades BLE do dispositivo móvel Android foi, em primeiro lugar, necessário requerer as permissões específicas no manifesto [55] [56]:

- *BLUETOOTH*: para a aplicação estabelecer qualquer comunicação via Bluetooth;
- *BLUETOOTH\_ADMIN*: permite-lhe descobrir e emparelhar-se com outros dispositivos Bluetooth, bem como ajustar as respectivas definições;
- *hardware.bluetooth\_le*: necessário para especificar se a aplicação precisa, ou não de recorrer ao hardware do dispositivo móvel que o habilita a comunicar via BLE. No âmbito deste projeto é desejável que o meio de comunicação BLE se encontre sempre disponível, caso não seja suportado, a aplicação não deve correr, pelo que se descreve no manifesto:  

```
<uses-feature android:name="android.hardware.bluetooth_le"
android:required="true"/>.
```

Por fim ativaram-se as imprescindíveis permissões relativas à localização. Sem elas não se obteriam, com sucesso, resultados de scan de dispositivos BLE, uma vez que geralmente as sinalizações enviadas por dispositivos LE estão associadas a uma localização. Assim encontra-se ainda no manifesto [56]:

- *ACCESS\_COARSE\_LOCATION*: possibilita que a aplicação acesse à localização aproximada do dispositivo;
- *ACCESS\_FINE\_LOCATION*: é uma permissão semelhante à anterior, mas neste caso acede a uma localização precisa;
- *hardware.location*: assinala que a aplicação irá utilizar recursos para determinar a localização, podendo esta localização ser GPS, celular ou de rede;

- *hardware.location.gps*: declara que a aplicação usa recursos hardware do GPS do dispositivo móvel para obtenção de coordenadas de localização precisas.

Criou-se uma classe chamada “scanning” para o desenvolvimento das ações na aplicação. Ao iniciar esta classe começa imediatamente uma verificação das permissões e requisitos exigidos para o correto funcionamento das estruturas que se deseja operar com a aplicação.

Neste trabalho foi indispensável a confirmação do suporte do BLE pelo dispositivo a utilizar e se fosse suportado, detetar se estava ativado para viabilizar o uso desta comunicação. Caso não se verifique a ativação do Bluetooth, é dada a possibilidade ao utilizador de fazê-lo para poder prosseguir a execução da aplicação.

Posteriormente verifica-se se a localização está ou não ativada. Como se referiu a ativação da mesma é requerida para o próprio funcionamento do BLE pelo que se estiver desativada o utilizador, tal como no caso do Bluetooth, tem a possibilidade de a ativar e prosseguir com normal uso da aplicação. Se esta ativação não for permitida, a aplicação é encerrada.

Simultaneamente, no layout apresentam-se dois botões. Um inicia o scan e outro para o finalizar. Por motivos de melhor compreensão e controlo desta ação ao longo do processo de teste, a tarefa de iniciar o scan de dispositivos é acionada pressionando um botão, mas em cenários reais esta função deve ser iniciada automaticamente para não interferir com o ato primário da condução.

Ao pressionar o botão *start Scan*, é iniciada a descoberta de dispositivos BLE nas proximidades. Por opção definiu-se que o scan efetuado tivesse baixa latência. Embora se aumente assim o consumo energético, tal como é referido em [57], já que o *duty-cycle* é elevado, os resultados deste scan serão mais frequentes e por isso o condutor receberá informação mais atualizada.

Sempre que encontra um novo dispositivo é retornado um resultado do scan. Através deste resultado consegue saber-se [58]:

- o endereço do dispositivo transmissor;
- um parâmetro chamado de *ScanRecord* que possui uma combinação da mensagem transmitida no evento anúncio, e quando solicitada, da resposta ao scan;
- o valor da potência do sinal recebido;
- o tempo, em nano segundos, desde a inicialização até se observar o *ScanRecord*.

Quando recebe uma nova resposta do processo de scan, o endereço do dispositivo transmissor é comparado com o já conhecido, e se corresponder é então guardado o valor da potência do sinal e do tempo decorrido até à obtenção daquele *ScanRecord*. Analisar-se-á também a mensagem recebida, ou seja, o conteúdo do *ScanRecord*. Para além disso, aquando do sucesso da comparação dos endereços, guardam-se ainda dados relativos à localização geográfica do dispositivo no interior do veículo, nesse momento. Estes dados tiveram maior importância neste trabalho, na fase de avaliação do protótipo, no sentido de permitir compreender e estudar o comportamento da receção do sinal no interior do veículo.

Os dados de localização conseguiram-se utilizando o provedor GPS, ou seja, a localização é obtida usando satélites. Elegeu-se esta opção considerando que a aplicação funcionará sempre no exterior e que os resultados obtidos por esta via são mais precisos. Definiu-se o intervalo de um segundo para a atualização dos valores da localização. Guardaram-se a latitude e

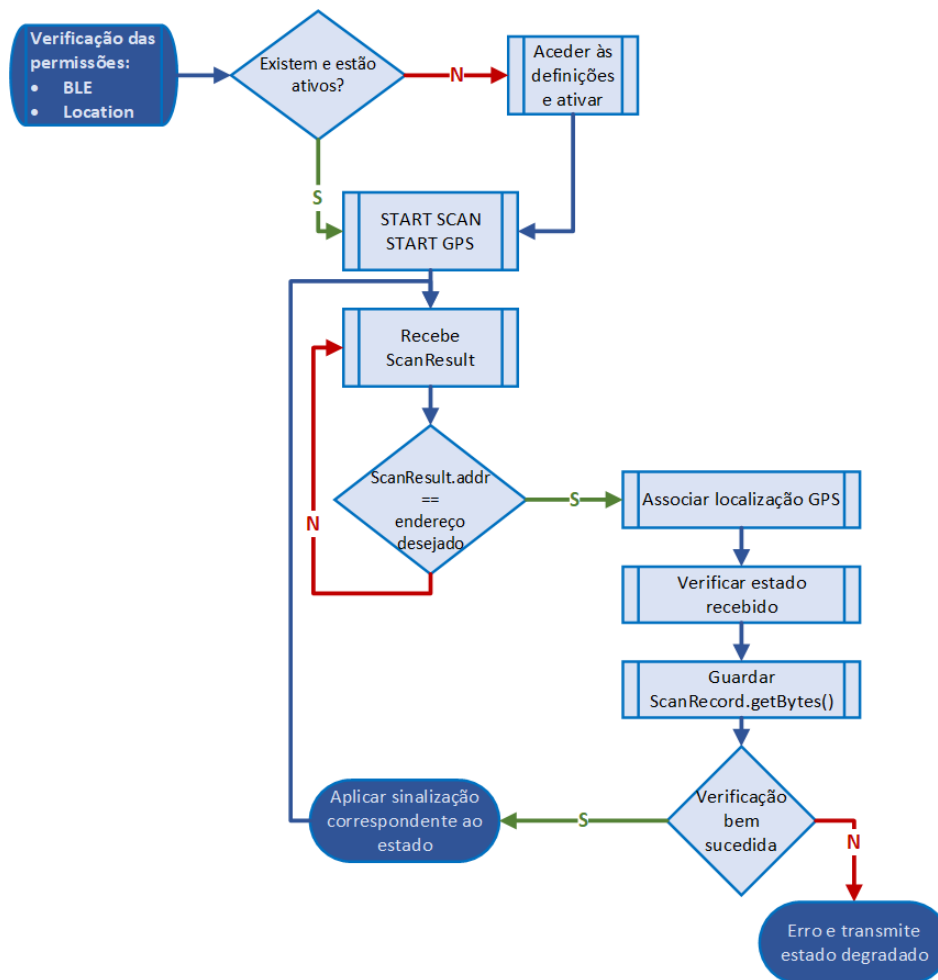


Figura 4.13: Fluxograma das ações desempenhadas pela aplicação Android

longitude em graus, a precisão da localização obtida radial e em metros e a velocidade em metros/segundo. É ainda disponibilizado o tempo UTC em ms, mas não foi utilizado.

Quanto à interpretação do *ScanRecord* e conforme o que acontece nos outros dispositivos, compartimentou-se a mensagem recebida nos bytes dedicados ao estado, valor do checksum e ainda a identificação da interseção. A validação do estado é feita comparando o valor de checksum local, para aquela interseção, com o valor recebido. Se toda a informação for coerente é exibido ao condutor o estado do semáforo.

De acordo com o estado do semáforo, surge uma informação visual a advertir o condutor. Foram impostas no layout as sinalizações representadas na figura 4.14. E como já se tem referido pretende-se ainda reforçar a sinalização de estados conflituosos com as passadeiras para alertar o condutor da possibilidade de encontrar peões. Usando uma interface visual como o smartphone esta tarefa é simplificada tornando-se possível. Sendo assim quando ocorre uma dessas fases o layout apresentou-se como na figura 4.14 e). Sempre que detetada qualquer anomalia de funcionamento, é impressa uma sinalização específica como se mostra na figura 4.14 a).

Ao desenvolver esta prova de conceito, a pesquisa do dispositivo correto junto da interseção

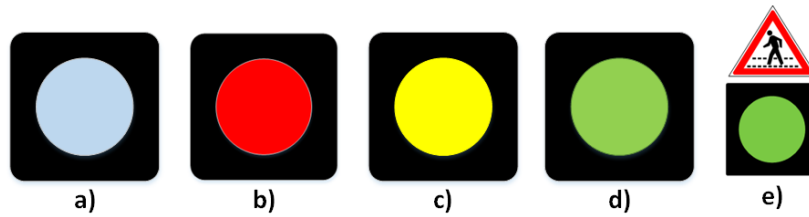


Figura 4.14: Símbolos do layout correspondendo ao sinal que deve ser disposto mediante o estado recebido.

foi efetuada através do endereço do módulo. Porém, em situação real o comportamento não poderá ser o mesmo uma vez que não se conhecem, à priori os endereços específicos dos dispositivos no percurso. Nesse caso terá que se recorrer a outros mecanismos cujo objetivo passará por identificar o dispositivo transmissor correto, pode por exemplo, essa filtragem ser feita através duma seleção com base em dados GPS e potência do sinal recebido. Conhecendo a posição e direção de circulação do veículo seria possível fazer a descoberta dos dispositivos e o scan do que se encontra na rota coincidente com o mesmo.

A segunda alternativa foi implementada recorrendo ao conjunto descrito na figura 4.6.

#### 4.5.2 Dispositivo anexável

A implementação deste dispositivo é semelhante à fase de atualização implementada no dispositivo junto à passadeira. Assim, o papel GAP do módulo é sempre de observador, fazendo a constante descoberta de dispositivos BLE nas proximidades e o scan de mensagens por ele enviados. A sua funcionalidade pode ser descrita como:

```
int main (void)
{
    while 1
    {
        sendCommand(J,1); //coloca o modulo em modo observador
        estado=scanning(dispositivoPassadeira);
        switch (estado)
        {
            case x:
                digitalWrite(2,HIGH/LOW);
                digitalWrite(3,HIGH/LOW);
                digitalWrite(4,HIGH/LOW);
                break;
        } ...
    }
}
```

Para a simulação deste dispositivo e à semelhança do que foi descrito na aplicação, faz-se a seleção do transmissor com base no endereço conhecido do dispositivo, sendo esse o parâmetro enviado para a função `scanning(dispositivoPassadeira)`.

Na função `scanning(dispositivoPassadeira)` o processo é igual ao explicado em 4.4.

Após a recepção também é confirmado o estado, comparando o valor do checksum local, da interseção identificada, com o recebido. Se toda a informação for coerente, aplica-se o estado, ativando o led que sinaliza a cor correspondente àquela fase e disponibilizando assim ao condutor a informação semafórica dentro do seu veículo.



## Capítulo 5

# Validação e Resultados Obtidos

Depois de realizado todo o processo de implementação da arquitetura idealizada e descrita em 3.3, que decorreu em laboratório, seguiu-se a fase de testes para permitir avaliar a robustez, eficácia e viabilidade do sistema.

Dado que se propõe o uso deste sistema em ambiente rodoviário, os testes efetuados realizaram-se no exterior e em diversos ambientes e cenários reais, permitindo avaliar diferentes parâmetros do sistema quando sujeito às condições do trânsito urbano.

Numa primeira fase, os testes realizados possibilitaram validar a comunicação entre os dispositivos estáticos posicionados na via, posteriormente passou-se a testar a comunicação destes com os dispositivos móveis em circulação dentro de um veículo, assim, os resultados obtidos classificaram-se em estáticos e dinâmicos.

Para a análise dos dados criaram-se ficheiros que gravaram os valores de desempenho tanto do aplicativo como dos dispositivos constituídos pelos Raspberry Pi e módulo Bluetooth, o seu processamento fez-se com a ajuda do MATLAB.

Este capítulo é portanto totalmente dedicado à exposição, descrição e análise dos resultados alcançados, apresentando-se primeiro os dados da validação estática e de seguida os obtidos em cenários dinâmicos.

### 5.1 Estáticos

Em primeiro lugar e para testar a viabilidade desta arquitetura avaliou-se a capacidade de comunicação entre o controlador e o dispositivo da passadeira.

Propôs-se que o controlador fosse estrategicamente posicionado na via comunicando o estado do semáforo a todos os dispositivos dispostos nas vias de acesso à interseção. Por esse motivo é de elevada relevância verificar a respetiva comunicação a várias distâncias e determinar a partir de que ponto se encontra comprometida. Delimitando esta distância percebe-se melhor o posicionamento adequado do controlador para que o seu alcance cubra todos os dispositivos junto das passadeiras e dê maior resposta aos veículos que se aproximam do local.

Esta etapa de testes classifica-se como estática pois ambos os dispositivos adquirem posições fixas na estrada, não havendo neste caso qualquer tipo de interferência da velocidade dos nós.

Para efetuar esta primeira fase de testes escolheu-se um local com uma linha de campo de visão praticamente desimpedida, por grandes distâncias e com reduzidas interferências tanto

de pessoas como de veículos. Foi selecionada a Avenida da Europa, em Viseu, como mostra a figura 5.1 onde se colocou um dispositivo numa mesma posição ao longo de todo o processo de teste, sendo que o segundo dispositivo era movido entre testes para a distância desejada. Mediram-se diversos parâmetros considerando a variável distância que mostraram a evolução das variações na comunicação.



Figura 5.1: Avenida da Europa, onde se efetuaram os ensaios descritos na avaliação estática: a) local de posicionamento dos dispositivos, b) meio envolvente.

### 5.1.1 Taxa de receção de pacotes

Os testes iniciais avaliaram a taxa de receção de pacotes. Colocou-se um dispositivo a transmitir pacotes nos canais de anúncio por um período de 20s e registaram-se os valores a diversas distâncias progredindo de 0 até 140m.

Tal como descrito no 2.3 sabe-se que o tempo total do evento de anúncio será o intervalo de anúncio acrescido de um período pseudo aleatório, definido pela própria camada de ligação, que pode variar entre 0 e 10ms. Assim, se for definido um intervalo de anúncio de 150ms, a camada de ligação terá que enviar um pacote nesse período de tempo, sendo o tempo total de anúncio definido por  $150\text{ms} + [0-10\text{ms}]$ , pelo que num período de 20s terão que ser enviados mais que 125 ( $20\text{s}/(150\text{ms}+10\text{ms})$ ) e menos que 133 ( $20\text{s}/(150\text{ms}+0\text{ms})$ ) pacotes num canal. Visto que o período de atraso de anúncio é pseudo aleatório e definido pela camada de ligação, não se sabe exatamente o número de pacotes enviados, pelo que se mediram diversas vezes o



número de pacotes recebidos na UART, de um total de 133 no máximo, por cada período de 20s em diversas distâncias e foi calculada a percentagem de pacotes recebidos relativamente à capacidade de receção máxima verificada, ou seja, à distância de 0m.

Deste modo foi possível compreender o efeito da distância na quantidade de pacotes recebidos e quantificar se a sua variação seria significativa.

Na figura 5.2 o gráfico da taxa de receção de pacotes em função da distância demonstra a variação da mesma nas diferentes distâncias mencionadas.

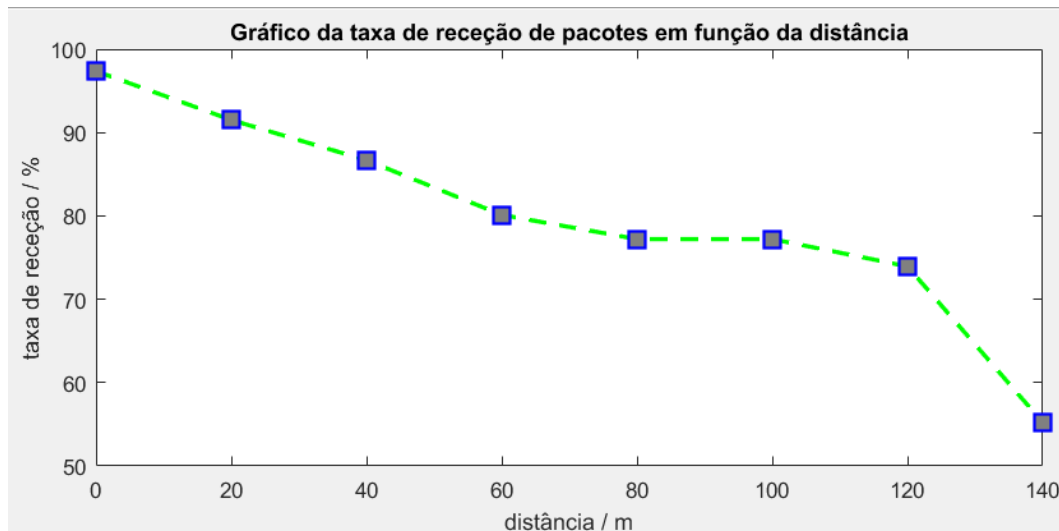


Figura 5.2: Gráfico da taxa de receção de pacotes em função da distância entre dispositivos

De seguida procurou-se então compreender de que modo poderia a distância interferir na qualidade da comunicação ao ponto de comprometer o funcionamento idealizado para este sistema. Fixaram-se os dispositivos, controlador e da passadeira, com uma distância entre eles previamente definida e fizeram-se medições do tempo de atualização do controlador bem como da potência do sinal recebido no momento em que é rececionada a mensagem do pacote de anúncio enviado.

Também aqui a distância de avaliação entre dispositivos começou aos 0m com incrementos de 20m e considerando que o desenho da arquitetura propõe que estes dispositivos cubram a área de uma interseção e que por outro lado o valor teórico descrito para o alcance do módulo é mais de 100m, optou-se por realizar medições até aos 140m.

Para cada avaliação colocaram-se os dispositivos em funcionamento e deixou-se percorrer um ciclo completo, ou seja, o controlador anunciou os 13 estados possíveis definidos. Durante este período não se detetaram falhas uma vez que o dispositivo da passadeira recebeu todos os estados de modo sequencial e aplicou corretamente a cor do semáforo correspondente. No final e também para cada distância foi calculada a média dos valores armazenados para cada parâmetro testado.

### 5.1.2 Tempo de atualização do estado

Ao efetuar as primeiras avaliações ainda a reduzidas distâncias, observou-se que o intervalo de anúncio de 120ms, proposto inicialmente, causava um aumento considerável no tempo

de descoberta do controlador por parte do dispositivo junto da passadeira. Este comportamento determinou uma redefinição do período de anúncio do controlador, quando a comunicar com o dispositivo da passadeira, para 90ms em vez de 120ms. Assim sendo, os resultados apresentados neste capítulo têm por base o valor de 90 ms para o intervalo de anúncio do controlador.

Na figura 5.3 expõem-se os resultados obtidos, no que respeita ao tempo de atualização do estado do semáforo em função da distância.

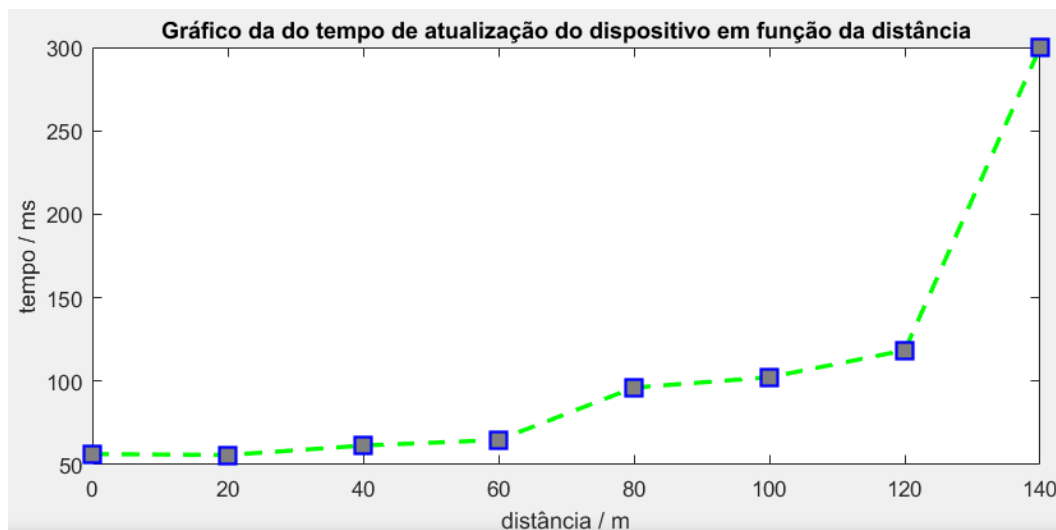


Figura 5.3: Gráfico do tempo de descoberta e validação da mensagem em função da distância entre dispositivos

Apurou-se que a 0m o tempo de atualização é de 56.33ms e a partir daí aumenta progressivamente até aos 60m. Entre os 60m e os 80m verifica-se um crescimento mais acentuado, de 64.75ms para 96.11ms, voltando depois a ascender lentamente até aos 120m. Dos 120m aos 140m este tempo sofre o maior incremento verificado, dos 118.40ms para os 300.00ms.

É possível também observar que até 100m o tempo de atualização da informação é inferior ou muito próximo dos 100ms, portanto se o dispositivo da passadeira se encontra no período de atualização durante esse tempo significa que a informação semafórica não é disponibilizada aos veículos durante um máximo de 100ms, valor este que não compromete a frequência requerida para a maior parte das aplicações SIT, os já referidos 100ms. Porém encontra-se muito próximo da margem sendo que as distâncias que cumprem melhor este parâmetro são as inferiores a 60m.

Comparando os gráficos da figura 5.2 e da figura 5.3 entende-se, através da análise da taxa de entrega do canal, que os resultados obtidos para o tempo de atualização apresentam a progressão esperada. Aos 0m a taxa de receção é a mais elevada, com 97.37% assim como o tempo de 56.33 é o mínimo.

Evoluindo na distância verifica-se que à medida que a taxa de receção diminui o tempo de atualização aumenta, pois a falha na receção de um pacote implica esperar pelo próximo que ocorrerá no evento de anúncio seguinte. Salienta-se ainda o intervalo dos 80m aos 100m em que a alteração do comportamento não é significativa, e ainda, o dos 120m aos 140m onde a taxa de receção decresce significativamente atingindo os 55.21% culminando no aumento do tempo de atualização para os 300ms.

### 5.1.3 Potência do sinal recebido

Como já se disse, outra métrica avaliada e que permitiu validar a qualidade da comunicação do sistema em função da distância foi a potência do sinal recebido (RSSI) no dispositivo da passadeira.

A figura 5.4 mostra a representação gráfica do RSSI em função da distância.

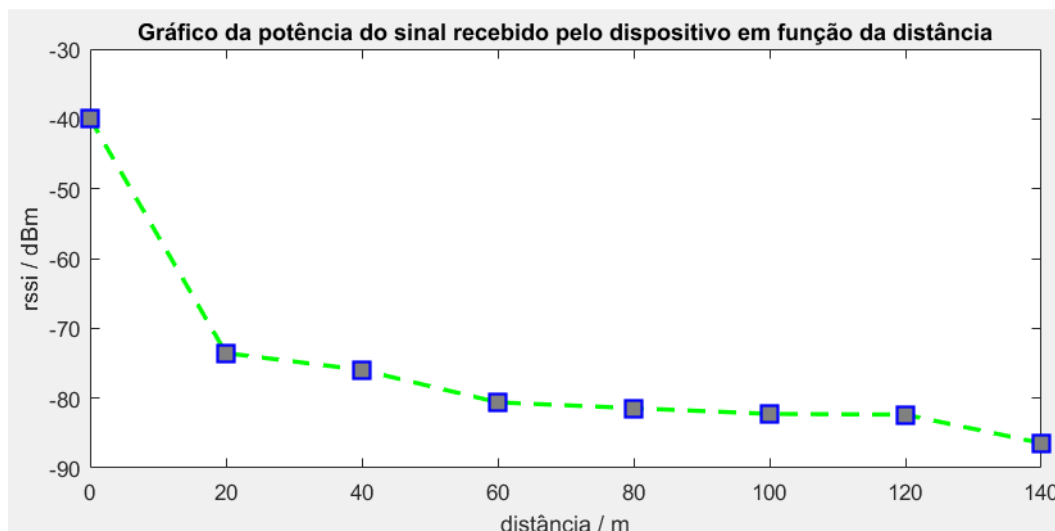


Figura 5.4: Gráfico da potência do sinal recebido em função da distância entre dispositivos

Da análise do gráfico ressalta um decréscimo acentuado na potência do sinal recebido, passando de  $-39.96$  dBm aos 0m para  $-73.56$  dBm aos 20m. Embora se constate esta variação brusca, fazendo dos primeiros 20m os mais críticos relativamente a variações na potência do sinal, não se verifica para a mesma distância, este efeito no tempo de atualização da mensagem de anúncio como demonstra o gráfico da figura 5.3. Apesar da queda observada no valor do RSSI, o que representa uma potência significativamente mais baixa, o valor não é inferior ao definido pela sensibilidade do recetor [6], pelo que a receção do sinal se faz com sucesso e em tempo útil.

A partir desse valor a potência vai decrescendo gradualmente mantendo-se sempre próxima dos  $-80$  dBm, não se voltando a repetir baixas de potência tão acentuadas como a verificada inicialmente. Como era previsível o RSSI mais baixo observou-se aos 140m atingindo os  $-86.44$  dBm.

## 5.2 Dinâmicos

A realização dos testes dinâmicos permitiu introduzir a variável velocidade e validar a comunicação entre o dispositivo da passadeira e os dispositivos móveis conforme proposto na arquitetura do sistema.

O primeiro cenário escolhido para avaliar a performance do sistema num ambiente rodoviário foi uma estrada de reduzida densidade veicular, devido à necessidade de manter uma velocidade constante para monitorizar o impacto da mesma na comunicação entre os nós, o que seria impossível em ambientes com maior fluxo de veículos. Estas validações foram feitas na Avenida do Aeródromo, em Viseu, tal como apresentado na figura 5.5, durante o período

da manhã por haver ainda menos afluência, desejável neste caso. Para além disso é um troço reto que permite obter uma linha de campo de visão desimpedida por uma longa distância e atingir a velocidade de teste antes de entrar no troço de teste.



Figura 5.5: Avenida do Aeródromo, onde se realizou a validação apresentada nas secções 5.2.1 e 5.2.2.

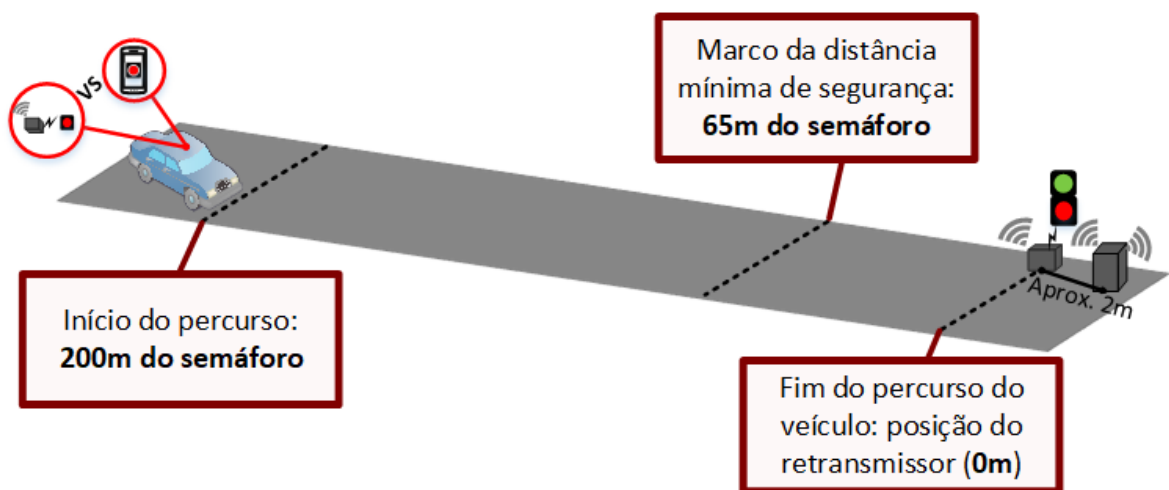


Figura 5.6: Esquemático da validação efetuadas na primeira fase dos testes dinâmicos.

Tal como representado na figura 5.6, selecionou-se um troço de teste com 200m nos quais o veículo circulou a uma velocidade constante para que esta fosse mantida em toda a zona de cobertura do módulo de acordo com as especificações.

Fora do veículo posicionaram-se, separados por uma curta distância de 2m, o controlador e o dispositivo da passageira que procedeu à retransmissão da informação do controlador para

os dispositivos colocados dentro do veículo. Nesta fase a distância entre o controlador e o retransmissor não constituiu uma variável foco pelo que embora se pretendesse considerar o impacto que teria na comunicação em estudo, o seu posicionamento foi simplificado.

No interior do habitáculo foram instalados, na zona superior do tablier, o tablet com a aplicação desenvolvida em Android Studio e o dispositivo anexável com o módulo RN4020. A inclusão dentro do veículo do conjunto Raspberry Pi e Módulo RN4020 foi feita conforme representado na figura 5.7.

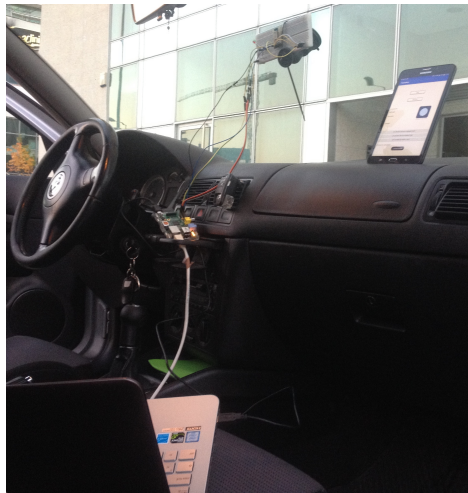


Figura 5.7: Disposição no interior do veículo do tablet e do dispositivo anexável.

A determinação da velocidade de teste contemplou um intervalo compreendido entre a mínima após o início do andamento - 20 Km/h e a máxima de 60 Km/h que corresponde a um excesso de 10 Km/h relativamente à velocidade máxima de circulação, permitida dentro das localidades [59]. As medições realizaram-se mantendo velocidades constantes de 20,30,40,50 e 60km/h.

Relativamente à distância a medida de 65 metros foi considerada como referência ao longo dos testes executados porque, como anteriormente descrito em 3.2.1, este é o espaço requerido à paragem segura de um veículo, quando a circular a 50km/h. Sendo assim, verificou-se previamente a descoberta do sinal antes de atingir a marca dos 65m.

A realização dos testes dinâmicos possibilitou colher dados das duas soluções propostas paralelamente. Verificou-se que em todo o troço de teste foi possível a descoberta do sinal em ambos os dispositivos. Sendo assim, em função da velocidade, tornou-se relevante avaliar a comunicação do ponto inicial do percurso (a 200m do semáforo) até aos 65m e depois dos 65m até ao próprio semáforo através de:

- tempo da atualização da informação, ou seja, o tempo que levava desde que se verificava uma mensagem correta recebida até à seguinte, sendo relevante para avaliar o tempo que o veículo permanecia sem informação nova, podendo já a mensagem anterior não ser correspondente à real situação no caso de se verificar um período muito grande entre duas receções;
- número de ordem de atualizações efetivadas ao longo do percurso.

O processo descrito encontra-se apresentado no diagrama da figura 5.8.

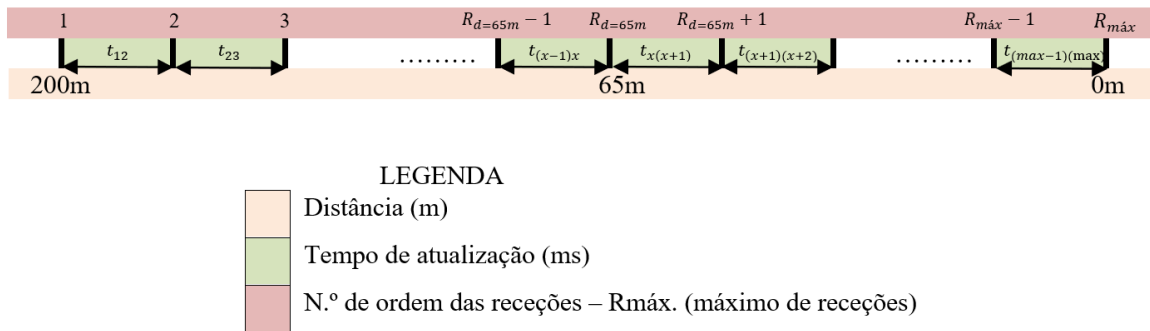


Figura 5.8: Diagrama representativo da obtenção dos resultados nos testes dinâmicos.

### 5.2.1 Aplicativo desenvolvido

O tablet foi o dispositivo utilizado para apresentar o sinal semafórico dentro do veículo através da aplicação desenvolvida para o efeito.

Os resultados conseguidos pelo aplicativo estão patentes nas figuras de 5.9 a 5.18, cujos gráficos demonstram os parâmetros registados para validar a comunicação entre os dispositivos.

Verifica-se globalmente que ao longo do troço de teste é estabelecida a comunicação entre o aplicativo colocado no interior do veículo e o dispositivo que anuncia o estado atual do semáforo, porém a evolução relativa ao número de receções corretas das mensagens não foi sempre a mesma.

A figura 5.9 mostra o gráfico que representa a distância dos 200m até aos 65m do semáforo percorrida a uma velocidade constante de 20Km/h e onde se observam, na posição mais afastada do semáforo, tempos de atualização maiores e mais irregulares atingindo os 5.5s mas com amplitudes de variação mais baixas a partir da 9ª receção correta. O número de mensagens recebidas corretamente ao longo destes 135m é de apenas 31.

Já no gráfico da figura 5.10 observa-se que o tempo entre receções e o número de receções corretas obtidas, à mesma velocidade, no percurso final de aproximação ao semáforo, dos 65m aos 0m, o padrão de irregularidade se mantém embora o tempo máximo para a atualização da informação tenha sido próxima de 600ms, de 593 ms, valor máximo muito inferior ao que se tinha verificado no gráfico da figura 5.9 e por isso o número de receções corretas tenha aumentado sensivelmente para o dobro.

Quando a velocidade constante passa para os 30km/h o tempo da atualização mantém-se muito irregular desde os 200m atingido 1.7s, como se expõe na figura 5.11 e só a partir da 27ª receção os tempos entre receções diminuem não se conseguindo no entanto grande estabilidade.

No percurso dos 65m até ao semáforo, o gráfico da figura 5.12 mostra que o tempo entre receções se mantém irregular e embora apresente maior número de receções corretas abaixo dos 200ms ainda se registam alguns picos acima dos 600ms, sendo o valor máximo registado de 661 ms.

Analisando os resultados obtidos à velocidade de 40Km/h observa-se no gráfico da figura 5.13 um abrandamento do padrão de irregularidade com tempos de atualização inferiores a 1s, após a 8ª receção correta e o valor máximo registado foi 1.9s, apesar disso e com o aumento



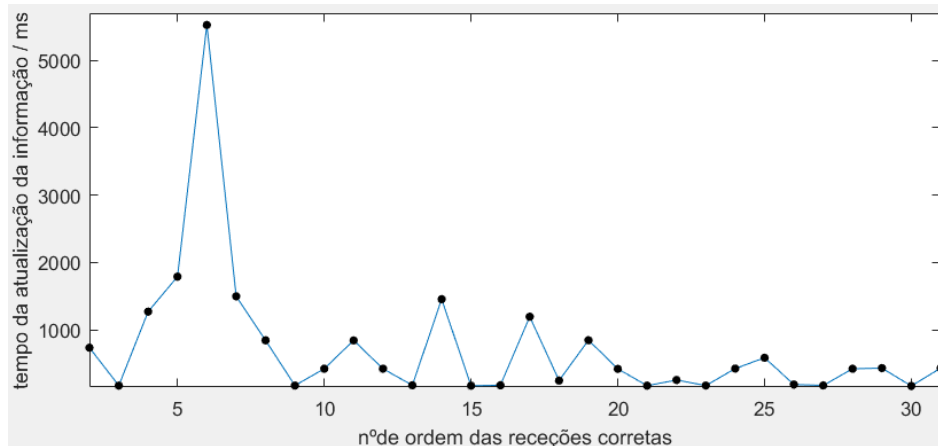


Figura 5.9: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

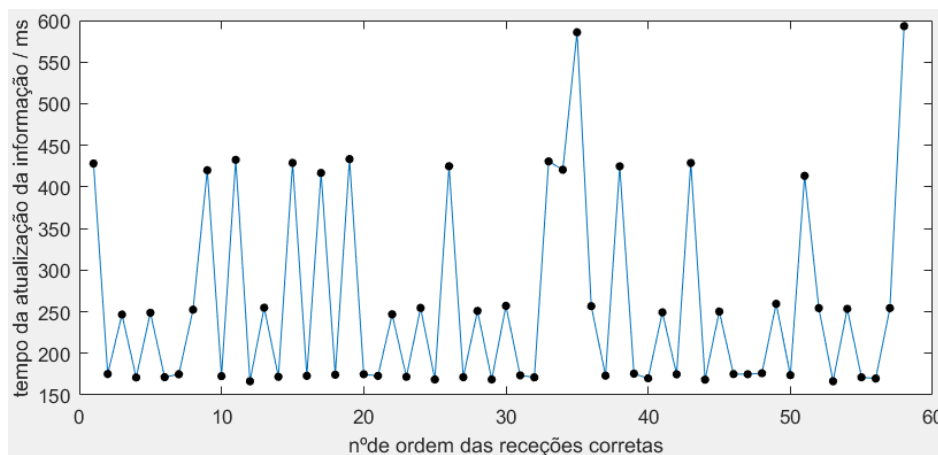


Figura 5.10: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 65m até ao semáforo.

da velocidade verifica-se uma redução do número de recepções corretas que é de apenas 25 nos 135m percorridos.

No gráfico da figura 5.14 mantêm-se tempos de atualização irregulares mesmo na aproximação ao semáforo, com um máximo de 603 ms, embora com valores sempre abaixo dos 600ms após a 6ª recepção correta.

Prosseguindo a análise para a velocidade de 50 Km/h, o gráfico da figura 5.15 expõe uma tendência para estabilizar o tempo de atualização da informação com elevações esporádicas dos valores, sendo a máxima de 2.2s, e uma redução do número de recepções corretas que se vai tornando mais marcada com o aumento da velocidade.

Desde os 65m até ao semáforo, o gráfico da figura 5.16 representa maior estabilidade nos tempos de atualização que não deixa porém de apresentar alguns picos esporadicamente, sendo o pico máximo verificado de 769 ms.

Para a velocidade de teste de 60Km/h, a figura 5.17 apresenta um gráfico com tempos

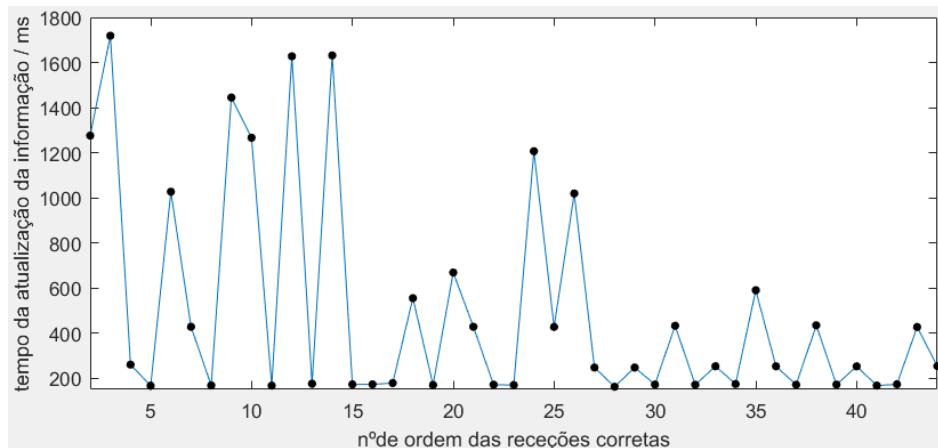


Figura 5.11: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

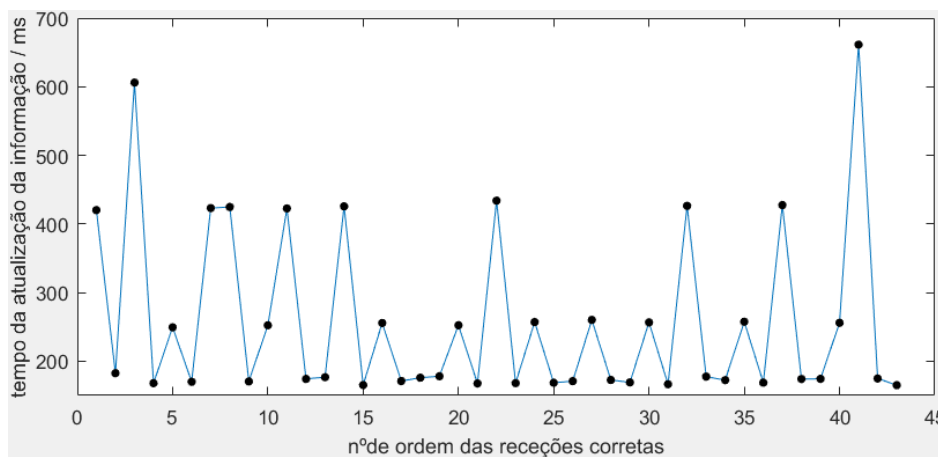


Figura 5.12: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 65m até ao semáforo.

de atualização relativamente baixos que estabilizam a partir da 5ª recepção correta embora no total para o percurso dos 200m aos 65m se registem apenas 14. O valor máximo obtido para o período de atualização, como se pode ver a partir do gráfico da figura 5.17 é de 3.2s.

Após os 65m, o gráfico da figura 5.18 mantém o padrão de irregularidade do tempo entre recepções como nos respectivos valores que continuam próximos dos 200ms, tendo sido registado um valor máximo de atualização de 835 ms ao longo do percurso descrito.



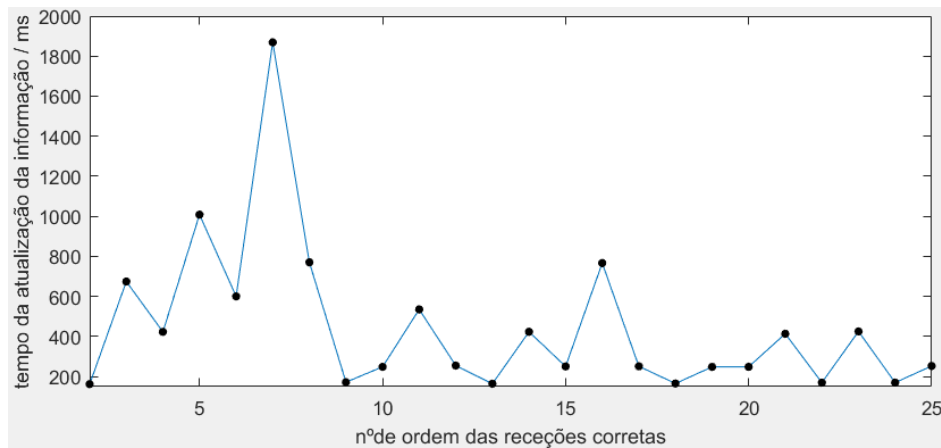


Figura 5.13: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

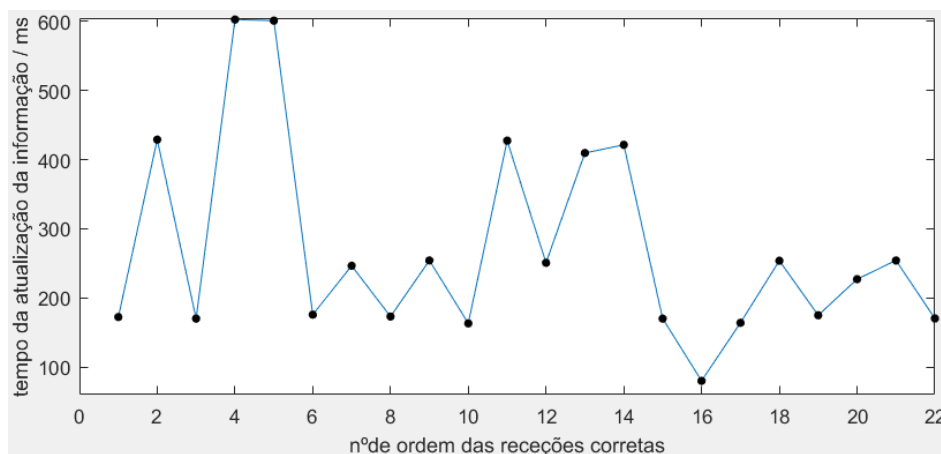


Figura 5.14: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 65m até ao semáforo.

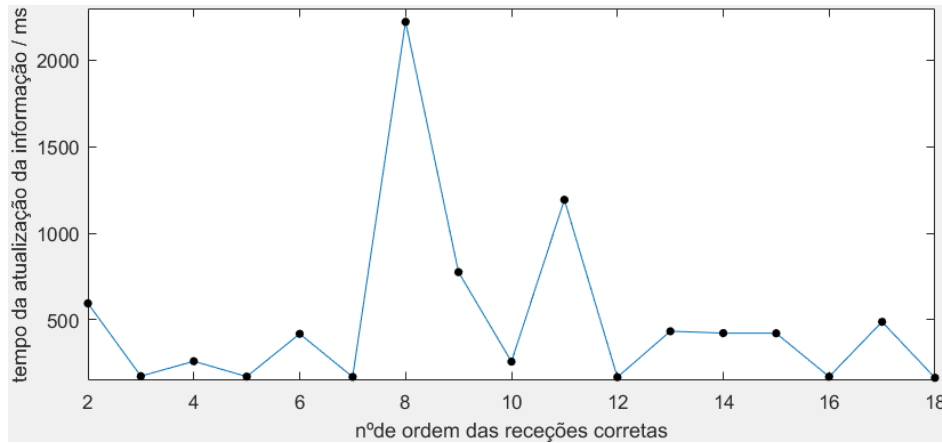


Figura 5.15: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

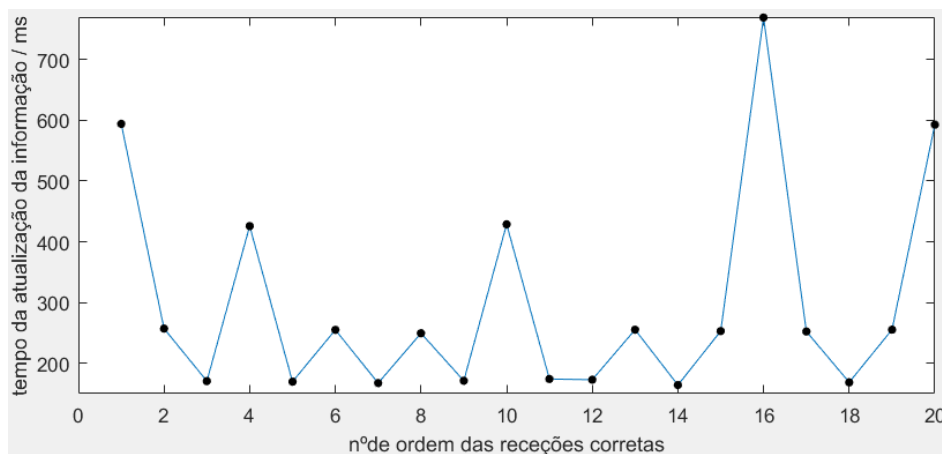


Figura 5.16: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 65m até ao semáforo.

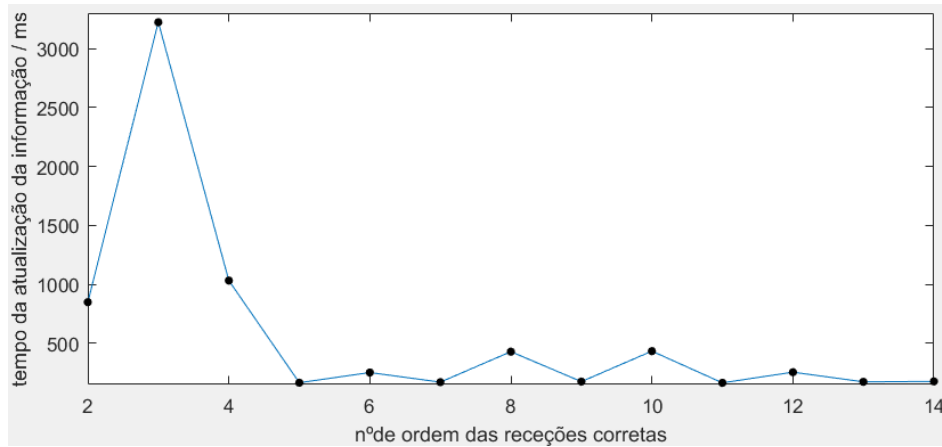


Figura 5.17: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

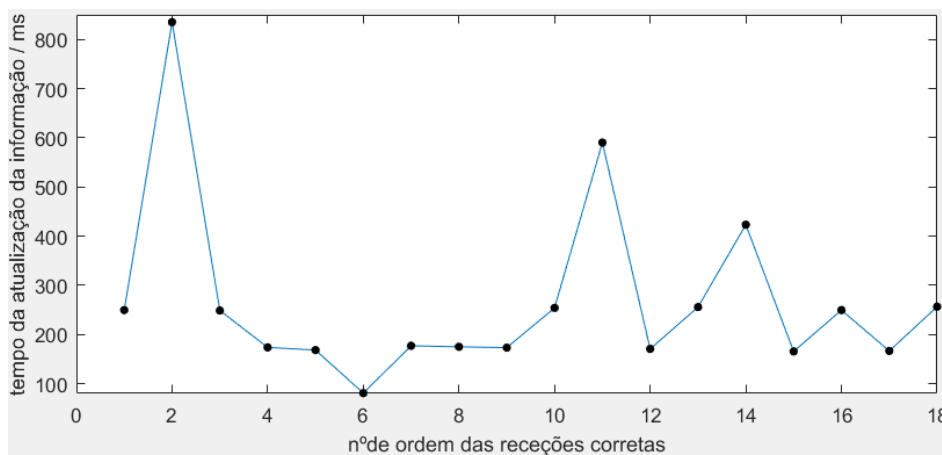


Figura 5.18: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 65m até ao semáforo.

## 5.2.2 Dispositivo anexável - Conjunto Raspberry Pi e Módulo RN4020

Este conjunto corresponde à solução apresentada como alternativa ao uso do aplicativo. Os resultados obtidos para a sua validação dispõem-se nas figuras 5.19 a 5.28 e mostram os gráficos resultantes do registo da receção de informação válida ao longo do percurso.

Numa análise geral verifica-se que os resultados obtidos utilizando este conjunto são melhores que os conseguidos através da aplicação, uma vez que para intervalos de distância iguais registam-se um maior número de mensagens recebidas dado que o tempo de atualização é consideravelmente menor. Este comportamento permite que o estado disposto no interior do veículo, com o conjunto anexável, seja mais fiel à situação real.

Como já foi referido, durante o troço de teste completo conseguiu estabelecer-se a comunicação entre o dispositivo no interior do veículo e o que se encontra a anunciar o estado atual, porém a qualidade da receção das mensagens não foi sempre a mesma.

No gráfico da figura 5.19 a primeira receção correta apresentada corresponde à distância de 200m do semáforo, surgindo posteriormente o número de receções corretas ao longo do percurso até aos 65m. Compreende-se que na posição mais afastada do semáforo o tempo de atualização é maior e mais irregular, atingindo os 4.4s. A partir da 50<sup>a</sup> receção este valor estabiliza próximo dos 85ms, permitindo que haja a receção de maior número de mensagens.

A figura 5.20 mostra o gráfico do tempo entre receções corretas e o número de receções verificado, à mesma velocidade de 20Km/h, no percurso final de aproximação ao semáforo, ou seja, dos 65m aos 0m. Observa-se uma continuidade no padrão de receção das mensagens com valores próximos dos 85ms e em que se registou um valor máximo de 250 ms e esporadicamente valores de aproximadamente 180 ms.

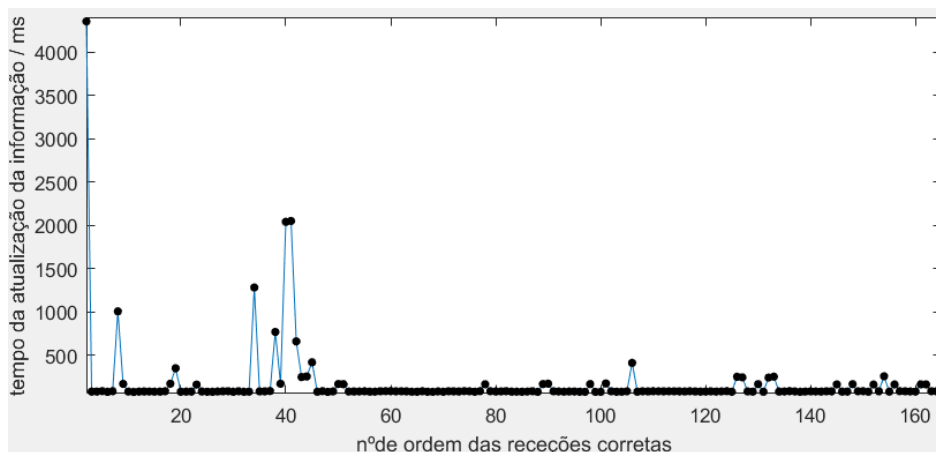


Figura 5.19: Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

O comportamento aferido à velocidade de 20km/h é semelhante para as restantes velocidades testadas, porém os parâmetros da comunicação avaliados registam algumas variações.

A figura 5.21 mostra que na avaliação feita a partir dos 200m, com velocidade constante de 30 Km/h, o tempo da atualização mantém-se muito irregular aproximadamente até à 30<sup>a</sup> receção, sendo registado o valor máximo de todo o percurso de 2.4s. Depois desse período, o tempo de atualização reduz para valores próximos de 85ms, no entanto não se consegue

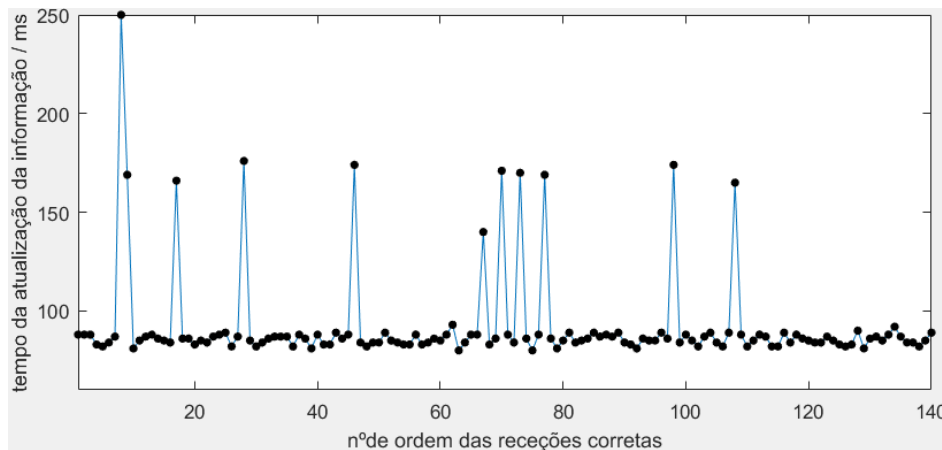


Figura 5.20: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 20Km/h, desde 65m até ao semáforo.

grande estabilidade em torno desse valor, havendo aumentos do tempo de atualização para cerca dos 250ms, mesmo com a aproximação aos 65m, culminando num menor número de recepções corretas.

Dos 65m até ao semáforo a recepção feita encontra-se pelos 85ms apresentando alguns picos mais próximos dos 180ms em todo o percurso, no entanto inicialmente ainda foi registado um valor máximo de 250ms, características demonstradas no gráfico da figura 5.22

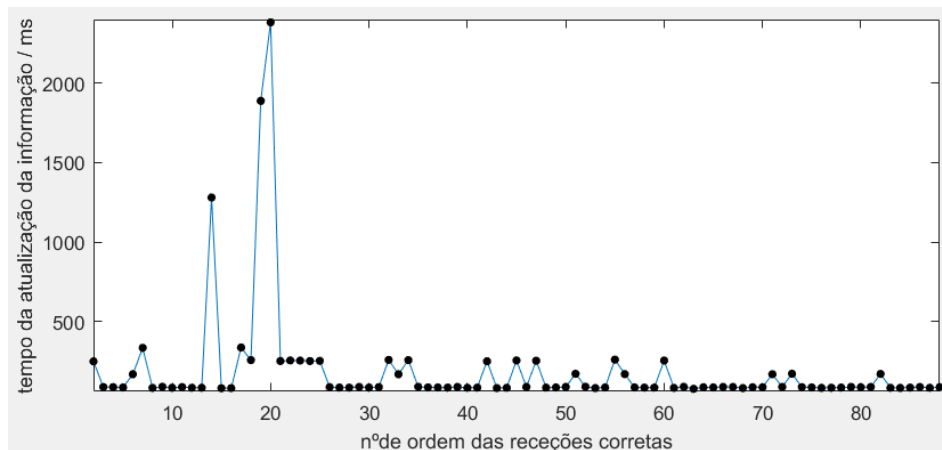


Figura 5.21: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

Prosseguindo a exposição dos resultados observa-se no gráfico da figura 5.23 que à velocidade de 40Km/h se mantém a irregularidade no tempo de atualização da informação, onde se registou o valor máximo de 861 ms, tornando-se mais regular após a 20ª recepção correta.

Também no gráfico da figura 5.24 se apresenta o tempo de atualização que mantém um comportamento semelhante aos casos anteriores mas onde há uma redução do número de recepções corretas que se vai tornando mais marcada com o aumento da velocidade. Salienta-

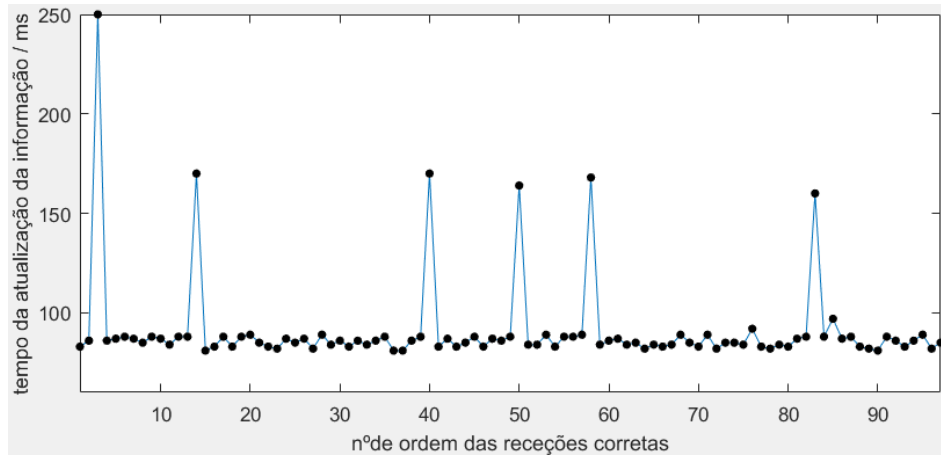


Figura 5.22: Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 30Km/h, desde 65m até ao semáforo.

se ainda que o valor máximo verificado para o tempo de atualização foi de 177ms.

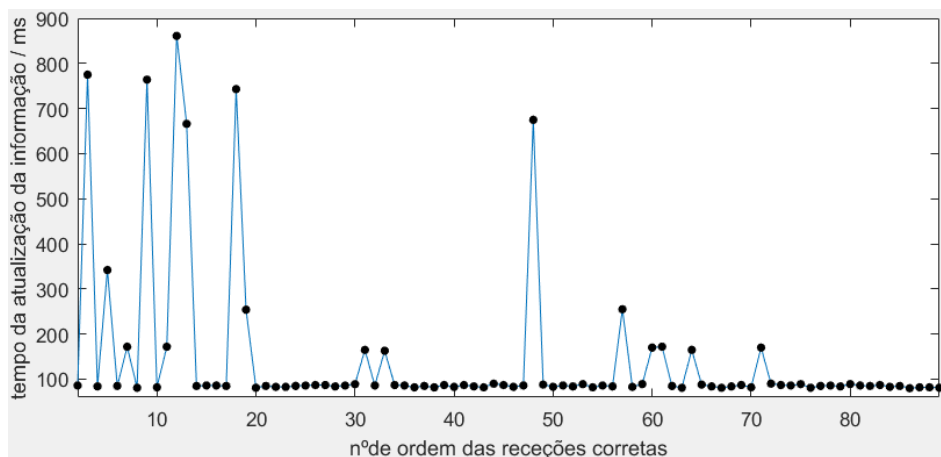


Figura 5.23: Gráfico do tempo entre receções corretas de mensagens e o número total de receções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

Para a velocidade de teste de 50 Km/h o gráfico da figura 5.25 expõe uma irregularidade no tempo da atualização mais prolongada, embora com variações menos acentuadas, atingindo um pico máximo de 515 ms.

Após os 65m, a figura 5.26 apresenta o respetivo gráfico que revela uma estabilização dos tempos da atualização embora com variações dispersas, cujo valor mais elevado é de 309ms, sendo as restantes menos acentuadas com valores próximos dos 170ms.

A figura 5.27 mostra um gráfico com tempos de atualização relativamente baixos correspondendo a um padrão de irregularidade que se mantém ao longo do percurso, mas com variações menos acentuadas a uma velocidade de 60Km/h, com um valor máximo de atualização atingido de 1s.

Desde os 65m até ao semáforo o gráfico da figura 5.28 reflete maior regularidade no tempo

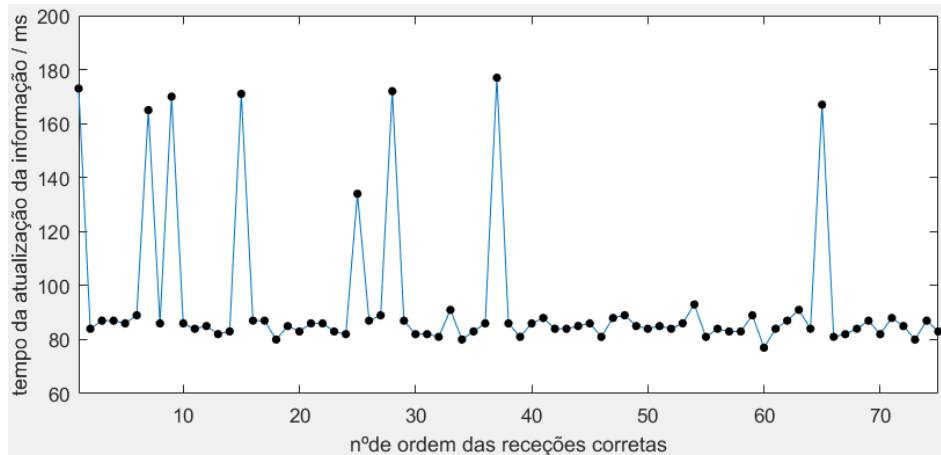


Figura 5.24: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 40Km/h, desde 65m até ao semáforo.

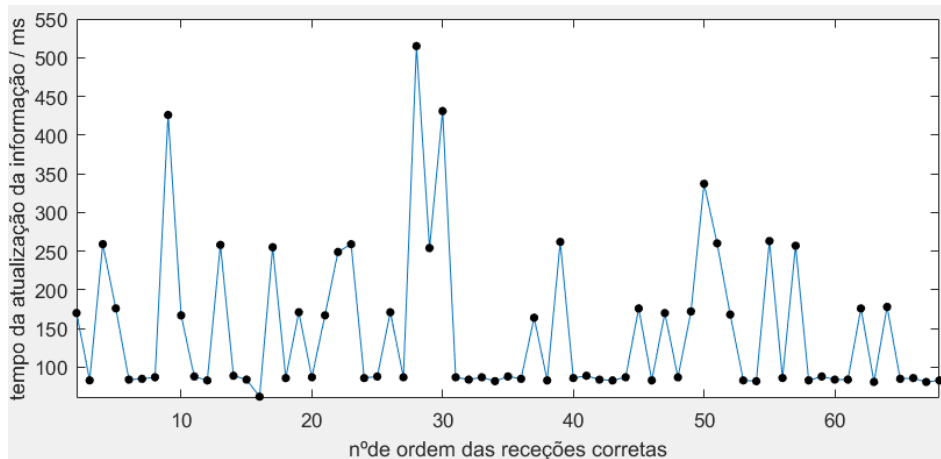


Figura 5.25: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.

da atualização que apresenta pontualmente alguns picos com um valor máximo de 165ms.

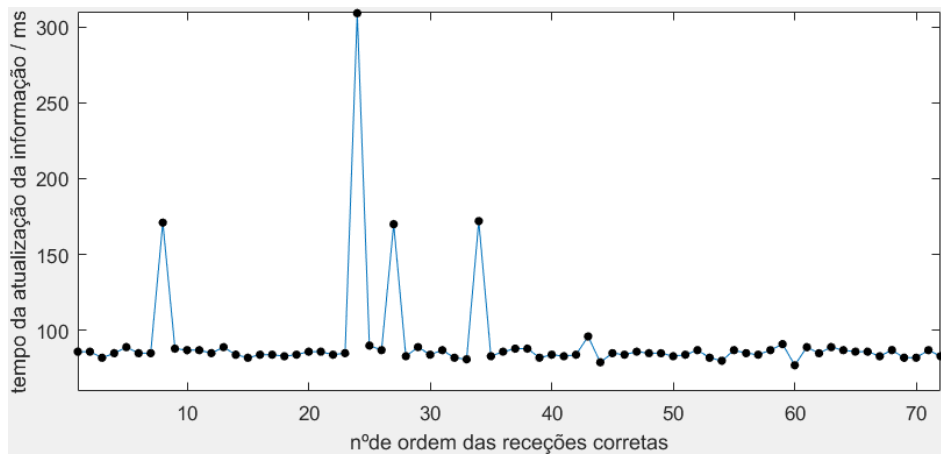


Figura 5.26: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 50Km/h, desde 65m até ao semáforo.

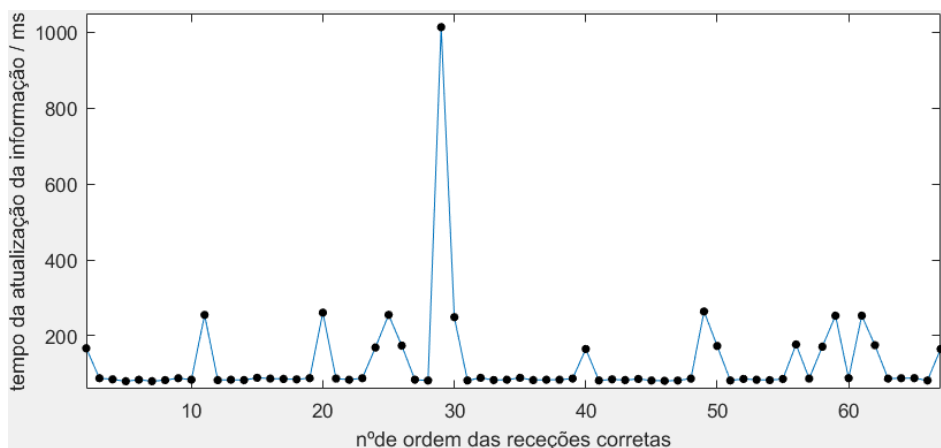


Figura 5.27: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 200m até aos 65m de distância do semáforo.



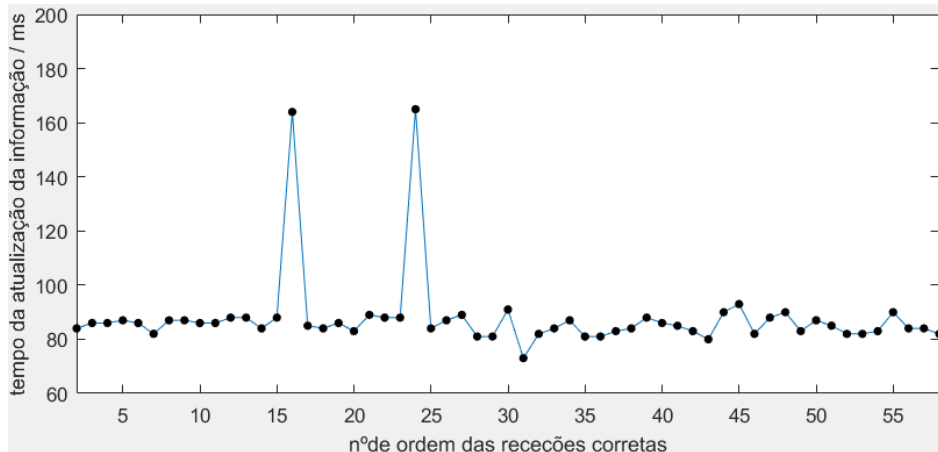


Figura 5.28: Gráfico do tempo entre recepções corretas de mensagens e o número total de recepções feitas para velocidade constante de 60Km/h, desde 65m até ao semáforo.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam um resumo dos parâmetros estudados para cada velocidade, bem como a comparação entre o desempenho das duas soluções testadas nas diversas velocidades. É visível que os valores do tempo de atualização no aplicativo foram sempre superiores aos do dispositivo anexável, independentemente da distância ao semáforo. Para além disso, comparando o número de mensagens recebidas corretamente em cada uma das duas soluções, sob o efeito das mesmas condições de teste, este mantém-se sempre muito inferior na aplicação.

Velocidade	Tempo médio de atualização antes dos 65m	Tempo médio de atualização depois dos 65m	Nº de mensagens corretas recebidas antes dos 65m	Nº de mensagens corretas recebidas depois dos 65m
20 Km/h	686.3 ms	256.8 ms	32	58
30 Km/h	480.1 ms	254.0 ms	45	42
40 Km/h	426.96 ms	272.36 ms	25	22
50 Km/h	473.03 ms	297.33 ms	18	20
60 Km/h	535.09 ms	267.30 ms	14	18

Tabela 5.1: Tabela do resumo das características estudadas nos testes dinâmicos com o uso da aplicação

Salienta-se também que a velocidade adotada não condiciona as alterações no tempo de atualização, ou seja, confrontando os valores das colunas dos tempos médios, entende-se que as flutuações dos seus valores não dependem do aumento da velocidade, uma vez que as variações não são significativas nem acontecem ao ritmo do aumento da velocidade. Constata-se, por exemplo, na tabela 5.2 que a uma velocidade de circulação mais elevada, 60Km/h, dos 65 aos 0m do semáforo, o tempo médio de atualização é mais baixo (90.74ms) do que o conseguido no mesmo percurso para a uma velocidade menor, 50Km/h que foi de 91.83ms.

Neste parâmetro podem surgir fatores interferentes de diversas fontes, por exemplo, obstrução da linha de campo de visão e aumento da distância são os que causam maiores perturbações. O que se confirma analisando os valores obtidos antes e depois dos 65m de distância

Velocidade	Tempo médio de atualização antes dos 65m	Tempo médio de atualização depois dos 65m	Nº de mensagens corretas recebidas antes dos 65m	Nº de mensagens corretas recebidas depois dos 65m
20 Km/h	176.77 ms	92.49 ms	165	140
30 Km/h	183.42 ms	91.38 ms	88	97
40 Km/h	142.82 ms	93.49 ms	89	75
50 Km/h	145.46 ms	91.83 ms	68	72
60 Km/h	126.81 ms	90.74 ms	67	58

Tabela 5.2: Tabela do resumo das características estudadas nos testes dinâmicos com o uso do conjunto anexável

ao dispositivo anunciador. A média dos valores expostos antes dos 65m é sempre superior à exibida depois dos 65m, em ambas as soluções apresentadas.

Apesar de se terem colhido os valores paralelamente na aplicação e no dispositivo anexável, não se verifica que os tempos apresentados sigam a mesma evolução, ou seja, apesar de o tempo máximo de atualização se ter verificado aos 30km/h no dispositivo do módulo, o mesmo não aconteceu na aplicação. Isto pode dever-se ao facto de o seu posicionamento dentro do veículo não ser exatamente o mesmo o que levou a diferenças nas fontes de interferência, pois o que interferiu no sinal de um, num certo momento, pode não ter interferido no outro. Para além disso tem que se ter ainda em consideração que as antenas de cada módulo BLE utilizado diferem, estando uma integrada no smartphone e a outra é a antena do módulo selecionado, semelhante à antena do dispositivo que se encontra no exterior do veículo a anunciar a informação semafórica.

A partir da análise das tabelas percebe-se ainda a influência da velocidade na comunicação. Verifica-se, de modo geral que à medida que a velocidade é maior o número de mensagens recebidas é menor, isto acontece dado que com o aumento da velocidade o mesmo percurso demora menos tempo a fazer-se e se o tempo de atualização não varia proporcionalmente com a velocidade obriga a que o número de mensagens recebidas seja inferior. Esta relação pode comprovar-se também através do gráfico patente na figura 5.29 que representa o número total de receções corretas em função da velocidade comparando as duas soluções testadas.

### 5.2.3 Interseção

O segundo cenário testado foi o emprego de todo o sistema numa interseção real, também em Viseu, mais no centro da cidade, na Rua Quinta d'el Rei, como demonstra a figura 5.30. O período escolhido neste caso, foi durante a tarde, num domingo, momento no qual se tem sempre grande fluxo de tráfego e pessoas.

Embora se trate de uma interseção de quatro vias a implementação foi delineada para apenas um troço de aproximação, pelo que os testes realizados refletem a respetiva validação. A opção por estudar este ambiente em concreto procura submeter o sistema a condições reais, nomeadamente à passagem de diversos tipos de veículos permitindo observar possíveis interferências.

O controlador foi instalado entre duas das vias, junto à estrada e o retransmissor na posição oposta. Foi escolhida a direção oposta precisamente para posicionar o controlador e

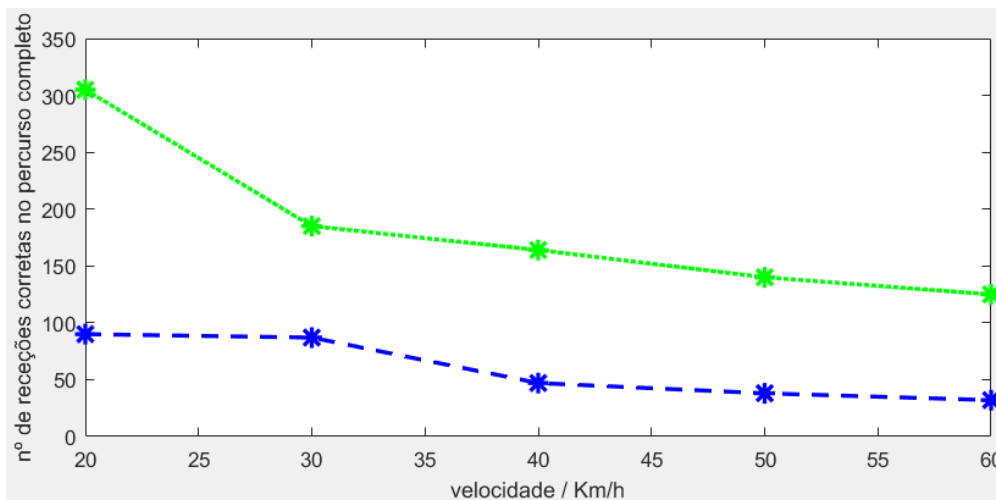


Figura 5.29: Gráfico da comparação entre o número de recepções corretas feitas, em todo o percurso, em função da velocidade. A verde do dispositivo anexável. A azul da aplicação.

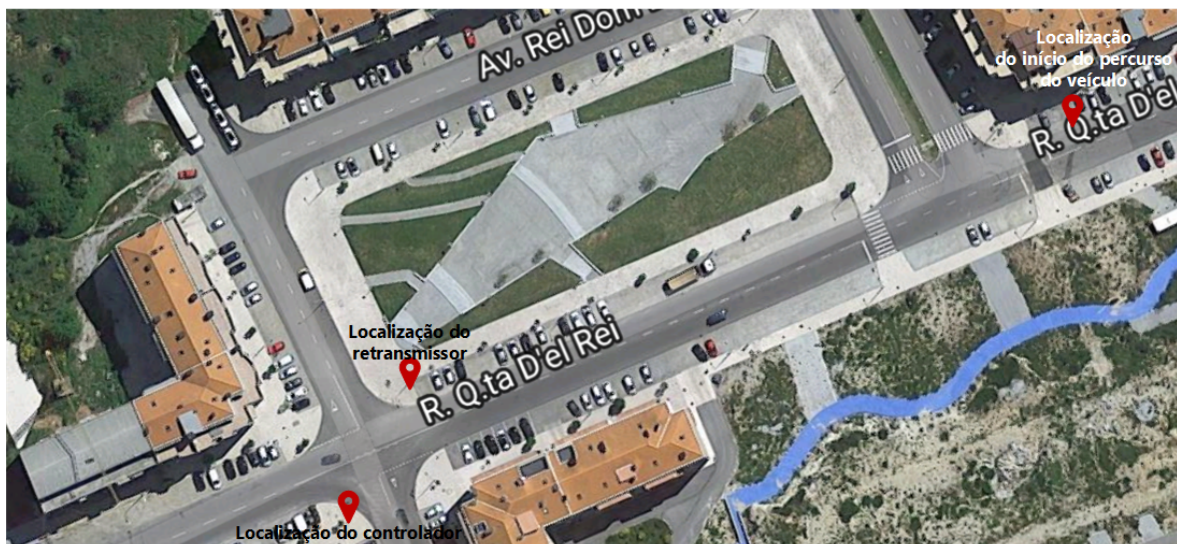


Figura 5.30: Disposição dos dispositivos na interseção em teste.

o dispositivo da passareira na pior situação possível relativamente à geometria da interseção, ou seja, a maior distância entre eles de modo a observar o impacto que causaria na sua interação. Os dispositivos ficaram assim distanciados 37m. Finalmente colocaram-se dentro do veículo, o conjunto Raspberry Pi e módulo BLE e a aplicação Android, fazendo-o passar na interseção, sujeito à velocidade permitida em função do tráfego presente. Neste teste as condições não foram tão controladas, e a velocidade sofreu influência do movimento das ruas, tanto de veículos como de peões.

Assim, avaliou-se em primeiro lugar a interação entre os dispositivos fixos, verificando-se que a passagem de veículos na interseção não produzia grande interferência na sua comunicação. O dispositivo da passareira conseguiu manter baixos tempos de atualização, como

desejado. Deixaram-se ainda os dois dispositivos correr por alguns ciclos completos não se detetando erros durante todo esse período em que a aplicação do sinal semafórico e posterior retransmissão foi sempre bem sucedida.

Ao finalizar esta avaliação introduziu-se o veículo na respetiva aproximação à interseção. O troço de aproximação percorrido foi em linha reta e como referido não houve particular interesse em controlar as condições no que diz respeito à velocidade. Este exercício repetiu-se oito vezes e nas tabelas 5.3 e 5.4 encontram-se sumarizados os resultados relevantes para a análise do comportamento neste cenário, tanto da aplicação Android como do dispositivo anexável.

Repetição	Velocidade Média	Primeira descoberta	Tempo médio de atualização	Nº de descobertas
1	24.76 Km/h	114,33 m	426,39 ms	39
2	35.72 Km/h	102.48 m	313.77 ms	35
3	38.47 Km/h	94.00 m	289.50 ms	30
4	21.26 Km/h	111.14 m	321.97 ms	63
5	33.61 Km/h	108.71 m	308.20 ms	36
6	34.57 Km/h	126.69 m	338.43 ms	36
7	36.02 Km/h	107.08 m	271.67 ms	36
8	34.37 Km/h	121.70 m	363.26 ms	34

Tabela 5.3: Tabela do resumo das características estudadas na aproximação à interseção com o uso da aplicação

Repetição	Velocidade Média	Primeira descoberta	Tempo médio de atualização	Nº de descobertas
1	24.76 Km/h	120.82 m	106.43 ms	173
2	35.72 Km/h	102.48 m	109.97 ms	126
3	38.47 Km/h	123.93 m	131.66 ms	119
4	21.26 Km/h	119.30 m	107.34 ms	193
5	33.61 Km/h	123.61 m	110.16 ms	136
6	34.57 Km/h	101.67 m	95.92 ms	130
7	36.02 Km/h	114.87 m	101.90 ms	132
8	34.37 Km/h	104.93 m	95.99 ms	131

Tabela 5.4: Tabela do resumo das características estudadas na aproximação à interseção com o uso do conjunto anexável

Numa análise comparativa compreende-se que o alcance máximo não é muito variável em todas as repetições nem mostra significativa variação entre as duas soluções testadas, o mesmo não acontece no que respeita ao tempo médio de atualização. Há que salientar porém uma redução do alcance comparativamente aos testes dinâmicos que se deve ao facto de não terem sido asseguradas condições ideais, como uma linha de campo de visão desimpedida entre os dispositivos reduzindo por isso o alcance conseguido.

O dispositivo anexável mostra um tempo de atualização muito inferior ao do aplicativo, na linha do que já acontecia nos testes anteriores. Analisando a tabela 5.4. é importante observar

que os tempos médios de atualização, mesmo numa situação com diversas interferências, se mantêm em valores próximos dos 100ms, como pretendido.

Nas figuras 5.31 e 5.32 apresentam-se os gráficos da evolução do tempo de atualização com a aproximação à interseção comparando o melhor e o pior alcance conseguidos.

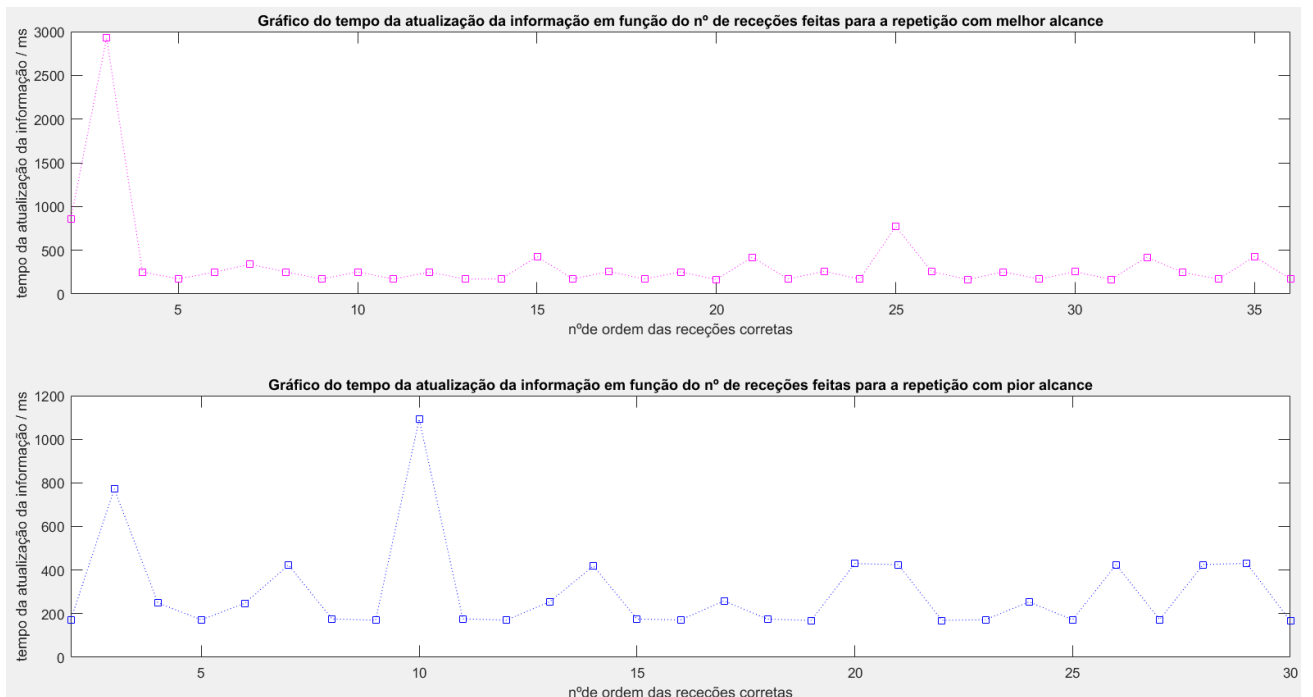


Figura 5.31: Gráfico da evolução do tempo de atualização com a aproximação da interseção recorrendo ao tablet com o aplicativo.

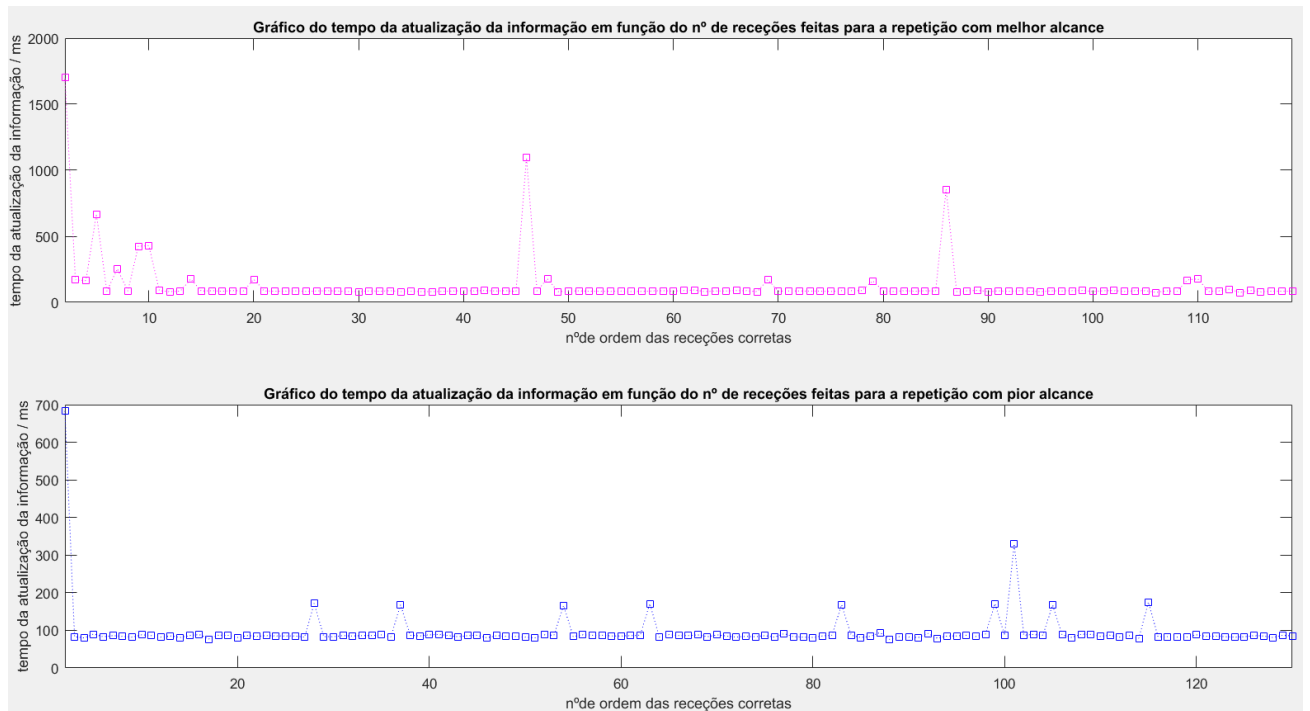


Figura 5.32: Gráfico da evolução do tempo de atualização com a aproximação da interseção recorrendo ao conjunto com módulo RN4020 e Raspberry Pi.

### 5.3 Considerações Finais

Como mencionado ao longo deste capítulo realizaram-se inicialmente testes estáticos que permitiram validar o alcance do sinal, entre os dispositivos que se encontram posicionados na via e foi garantida a sua capacidade em cobrir toda a área de uma interseção.

Posteriormente concretizaram-se os testes dinâmicos para validar as soluções de interface colocadas no interior do veículo e de acordo com a arquitetura proposta. Medindo simultaneamente parâmetros como o alcance, tempo de atualização e o número de mensagens corretas recebidas em função de diferentes velocidades aplicadas, tendo-se observado diferenças significativas no seu desempenho, uma vez que os resultados obtidos através do uso da aplicação foram globalmente piores que utilizando o dispositivo anexável.

Ao longo de todo o processo de testes foi perceptível a influência da direcionalidade da antena na comunicação. O comportamento demonstrado pela figura 4.4, foi verificado na prática e fora desse ângulo o sinal recebeu-se com má qualidade, tendo uma potência muito fraca mesmo a curta distância e um tempo de descoberta muito elevado, chegando mesmo a haver falha na receção.

É ainda importante salientar que na utilização do dispositivo constituído pelo conjunto Raspberry Pi e módulo BLE a frequência de 10Hz, necessária para a maioria das aplicações SIT, é conseguida em média na distância superior mas próxima dos 65m, bem como desse ponto aos 0m do semáforo.

## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Neste trabalho foi feito um estudo da viabilidade do BLE em contexto veicular. Foi estruturada, implementada e avaliada, utilizando apenas os canais de anúncio, uma solução que visa desmaterializar o sistema de semáforos como o conhecemos, passando a informação do sinal semafórico para o interior do veículo, em sistemas semafóricos de controlo temporal fixo. A solução proposta visa atingir esse objetivo através da interação de um controlador local, retransmissores de sinal nas vias de acesso e dispositivos dedicados à receção da informação vinda destes, todos integrados numa determinada interseção.

A função do controlador é coordenar o sinal do sistema semafórico com base no algoritmo mais adequado ao local, programado neste dispositivo. O resultado do processamento do algoritmo é uma informação que permitirá definir o estado dos semáforos de todos os utilizadores da via. Essa informação é transmitida através dos canais de anúncio do BLE a todos os dispositivos sob o alcance do controlador local. Os retransmissores, dispositivos colocados junto da passadeira devem, por curtos períodos de tempo escutar nos canais de anúncio mensagens vindas apenas do controlador e posteriormente estender o sinal para que chegue atempadamente aos veículos a uma maior distância. Assim avaliou-se ainda o impacto no período de atualização da troca de papéis BLE, não tendo sido verificado que este funcionamento provocasse distúrbios. São estes os dispositivos também encarregues de atualizar o sinal semafórico dos peões de acordo com o estado anunciado pelo controlador. Finalmente os veículos quando entram na zona de alcance da interseção recebem a sinalização semafórica, através do dispositivo integrado no seu interior.

Deste modo, o encargo financeiro associado às infraestruturas atuais destes sistemas deixaria de existir tornando possível informar o condutor, de forma pessoal, sobre o estado da interseção de que se aproxima, podendo ainda associar-se outras componentes de informação para além da visual, como por exemplo auditiva, recorrendo a uma tecnologia de reduzido custo, fácil implementação e integração.

Foram projetadas e testadas duas soluções possíveis. Uma recorrendo a hardware presente já no quotidiano de muitas pessoas, smartphone, e outra através de um dispositivo formado por um conjunto integrado especialmente para este projeto, dispositivo anexável. Ambas apresentaram algumas limitações no seu desempenho e situações não ideais.

Relativamente ao uso do aplicativo verificou-se nos exercícios de teste que os resultados obtidos não foram os esperados para as exigências do projeto. Apesar de a nível de alcance

máximo conseguido o desempenho ter sido bom, recebendo o sinal a uma distância muito superior aos 65m estabelecidos como distância mínima exigida, o tempo de atualização é demasiado longo e irregular. Este é um dado fundamental para que se possa garantir a fiabilidade do sinal semaforico apresentado ao condutor.

Quanto menor for o tempo de atualização, mais coerente será a informação do interior do veículo com a do controlador, o que é de elevada importância para o condutor que se aproxima de um semáforo e necessita de agir em conformidade com o que lhe é apresentado. Um período de atualização longo pode originar um desfasamento entre o sinal apresentado ao condutor e o que está a ser anunciado pelo controlador aumentando a probabilidade de situações conflituosas na interseção.

Ainda referente ao aplicativo é de salientar que o desenvolvimento de uma aplicação robusta, próxima de um produto final, respeitando todos os requisitos, desde segurança, design e prioridade, que são exigidos a uma aplicação como esta não foram um foco ao longo do trabalho.

No que diz respeito aos módulos BLE RN4020 escolhidos, apresentaram de um modo geral bom desempenho nos testes efetuados, quer a nível do alcance quer do tempo de atualização. Apesar da boa performance verificada, deve salientar-se que esta foi afetada pela posição da antena. Embora fosse espetável, de acordo com o diagrama de radiação presente nos detalhes do módulo, que a qualidade do sinal regredisse ao deslocar-se da posição ideal, não se esperava que o movimento de poucos centímetros na antena, numa distância fixa, afetasse fortemente o sinal chegando ao extremo de, por vezes, o perder.

Se na fase de teste esta situação não foi muito problemática uma vez que o seu posicionamento foi ajustado pontualmente, numa situação real este comportamento poderia ser altamente prejudicial porque, no interior dos veículos o movimento e a trepidação podem alterar a posição específica e condicionar o seu funcionamento.

Pode dizer-se que apesar das desvantagens e limitações detetadas, a utilização dos canais de anúncio do BLE nas comunicações V2I, nomeadamente em sistemas semaforicos, tem algumas potencialidades que precisam ser otimizadas.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento do presente estudo que culminou na respectiva avaliação, foi perceptível que determinados aspetos da implementação podem ser aperfeiçoados. Para além disso, também se requer outros tipos de avaliação e submissão a diferentes testes até poder afirmar a completa viabilidade da solução proposta e enumerar eventuais vantagens da sua utilização.

Assim, apresentam-se aqui alguns tópicos de estudo que se salientam para desenvolvimentos futuros:

- Entende-se, como foi visto no capítulo cinco que o recurso ao aplicativo não foi bem sucedido, já que os valores do período de atualização obtidos se encontram muito acima dos desejados. No entanto verificou-se ainda que o alcance satisfazia as necessidades exigidas, assim, propõe-se como trabalho a desenvolver futuramente, a otimização do código formulado no sentido obter impacto na redução do tempo de atualização. Para além disso trata-se de uma aplicação de elevada prioridade sendo que requer um maior cuidado a ser programada para que possa ser eficiente na interação com o condutor.



- Um tópico importante será o desenvolvimento de mecanismos que garantam a coerência das tabelas carregadas em todos os dispositivos. Nestas encontra-se a representação do que cada estado significa, pelo que devem ser exatamente as mesmas em todos os dispositivos no local. Isto é, quando ocorre uma atualização, essa deve ser verificada em todas as tabelas locais dos dispositivos.
- A melhoria do processo após a deteção de erros também poderá constituir um trabalho a implementar, uma vez que a imposição dum estado degradado, para além de notificar o condutor, impondo o amarelo, deve accionar ainda um mecanismo de sinalização e reporte desse erro, sem ser localmente.
- Outro tópico interessante passa por compreender o consumo energético desta solução uma vez que poderá constituir um ponto positivo comparativamente a outras soluções. O seu reduzido consumo energético é uma das características mais atrativa no emprego desta tecnologia e ao longo desta pesquisa não foi avaliado de nenhuma forma o consumo energético dos componentes do sistema.
- A segurança necessitará de sofrer um processo de melhoria, já que por se tratar de um sistema semaforico é importante que seja garantida na troca de informação. Ao utilizar os canais de anúncio conseguiu reduzir-se o período gasto com a troca de informação ao eliminar o tempo de emparelhamento que pode tornar o início da troca de dados com outro dispositivo muito mais longo. Porém, se por um lado se ganha tempo para troca de dados, o emparelhamento enquanto mecanismo de segurança no estabelecer da comunicação entre os dispositivos, deixa de existir.
- Futuramente deverá considerar-se também um projeto de análise da viabilidade económica para os dispositivos anexáveis, utilizados como solução alternativa aos smartphones.



# Bibliografia

- [1] Bluetooth Core Specification. <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification>. Accessed: Março 2017.
- [2] Technical Considerations for Bluetooth Low Energy application developers. <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/technical-considerations>. Accessed: Março 2017.
- [3] SIG Bluetooth. Bluetooth core specification version 4.0. *Specification of the Bluetooth System*, 2010.
- [4] Joseph DeCuir. Introducing bluetooth smart: Part 1: A look at both classic and new technologies. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 3(1):12–18, 2014.
- [5] Thomas Urbanik, Alison Tanaka, Bailey Lozner, Eric Lindstrom, Kevin Lee, Shaun Quayle, Scott Beaird, Shing Tsoi, Paul Ryus, Doug Gettman, et al. *Signal Timing Manual*. Transportation Research Board, 2015.
- [6] Bluetooth® Low Energy Module. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/50002279B.pdf>. Accessed: Novembro 2017.
- [7] RN4020 Bluetooth® Low Energy Module User’s Guide. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70005191B.pdf>. Accessed: Novembro 2017.
- [8] World Vehicle Population Tops 1 Billion Units ward’s auto blog. <http://wardsauto.com/news-analysis/world-vehicle-population-tops-1-billion-units>. Accessed: Março 2017.
- [9] Number of cars sold worldwide from 1990 to 2017 (in million units). <https://www.statista.com/statistics/200002/international-car-sales-since-1990/>. Accessed: Dezembro 2017.
- [10] European Commission. Road safety in the European Union - Trends, statistics and main challenges. *Mobility and Transport*, (November), 2016.
- [11] Generic Attributes (GATT) and the Generic Attribute Profile. <https://www.bluetooth.com/specifications/generic-attributes-overview>. Accessed: Março 2017.
- [12] Number of smartphone users worldwide from 2014 to 2020 (in billions), howpublished = <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>, note = Accessed: Março 2017.

- [13] Kuor-Hsin Chang. Bluetooth: a viable solution for iot?[industry perspectives]. *IEEE Wireless Communications*, 21(6):6–7, 2014.
- [14] Richard J Weiland and Lara Baughman Purser. Intelligent transportation systems. *Transportation in the new millennium*, 2000.
- [15] Lino Manuel Baptista Figueiredo. *Sistemas inteligentes de transporte*. PhD thesis, Universidade do Porto, 2005.
- [16] Bob Williams. *Intelligent transport systems standards*. Artech House, 2008.
- [17] Hannes Hartenstein and LP Laberteaux. A tutorial survey on vehicular ad hoc networks. *IEEE Communications magazine*, 46(6), 2008.
- [18] Muhammad Alam, Joaquim Ferreira, and José Fonseca. *Intelligent transportation systems: Dependable vehicular communications for improved road safety*, volume 52. Springer, 2016.
- [19] Roberto A Uzcátegui, Antonio Jose De Sucre, and Guillermo Acosta-Marum. Wave: A tutorial. *IEEE Communications magazine*, 47(5), 2009.
- [20] ETSI EN 302 663 v1.2.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band. [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/302663/01.02.01\\_60/en\\_302663v010201p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302663/01.02.01_60/en_302663v010201p.pdf). Accessed: Novembro 2017.
- [21] João Matos, Arnaldo Oliveira, Tiago Meireles, Nuno Ferreira, Pedro Mar, José Fonseca, Duarte Carona, António Serrador, and Jorge Lopes. Emergent vehicular communications: Applications, standards and implementation. In *Proc URSI Seminar of the Portuguese Committee*, volume 1, pages 1–1, 2010.
- [22] M Shahid Anwer and Chris Guy. A survey of vanet technologies. *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, 5(9):661–671, 2014.
- [23] Adrian Abunei, Ciprian-Romeo Comşa, and Ion Bogdan. Implementation of etsi its-g5 based inter-vehicle communication embedded system. In *Signals, Circuits and Systems (ISSCS), 2017 International Symposium on*, pages 1–4. IEEE, 2017.
- [24] Benjamin B Rhoades and James M Conrad. A survey of alternate methods and implementations of an intelligent transportation system. In *SoutheastCon, 2017*, pages 1–8. IEEE, 2017.
- [25] ETSI EN 302 636-5-1 V2.1.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; GeoNetworking; Part 5: Transport Protocols; Sub-part 1: Basic Transport Protocol. [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302600\\_302699/3026360501/02.01.01\\_60/en\\_3026360501v020101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/3026360501/02.01.01_60/en_3026360501v020101p.pdf). Accessed: Novembro 2017.
- [26] Sushma U Bhoover, Anusha Tugashetti, and Pratiksha Rashinkar. V2x communication protocol in vanet for co-operative intelligent transportation system. In *Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA), 2017 International Conference on*, pages 602–607. IEEE, 2017.

- [27] Raphael Frank, Walter Bronzi, German Castignani, and Thomas Engel. Bluetooth low energy: An alternative technology for vanet applications. In *Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), 2014 11th Annual Conference on*, pages 104–107. IEEE, 2014.
- [28] Youcong Ni, Sun Cong, Zhao Ting, Peng Ye, Chunyan Wang, and Luo Zeng. A profile for step data transmission based on bluetooth low energy. In *Green Computing and Communications (GreenCom), 2013 IEEE and Internet of Things (iThings/CPSCom), IEEE International Conference on and IEEE Cyber, Physical and Social Computing*, pages 2043–2047. IEEE, 2013.
- [29] Michel Ferreira, Ricardo Fernandes, Hugo Conceição, Wantanee Viriyasitavat, and Ozan K Tonguz. Self-organized traffic control. In *Proceedings of the seventh ACM international workshop on VehiculAr InterNETworking*, pages 85–90. ACM, 2010.
- [30] Alessandro Bazzi, Alberto Zanella, Barbara M Masini, and Gianni Pasolini. A distributed algorithm for virtual traffic lights with ieee 802.11 p. In *Networks and Communications (EuCNC), 2014 European Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2014.
- [31] Cristina Olaverri-Monreal, Pedro Gomes, Michelle Krüger Silvéria, and Michel Ferreira. In-vehicle virtual traffic lights: A graphical user interface. In *Information Systems and Technologies (CISTI), 2012 7th Iberian Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [32] Walter Bronzi, Raphael Frank, German Castignani, and Thomas Engel. Bluetooth low energy for inter-vehicular communications. In *Vehicular Networking Conference (VNC), 2014 IEEE*, pages 215–221. IEEE, 2014.
- [33] Inaki Iglesias, Lucia Isasi, Maider Larburu, Veronica Martinez, and Begoña Molinete. I2v communication driving assistance system: on-board traffic light assistant. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. IEEE 68th*, pages 1–5. IEEE, 2008.
- [34] Răzvan Andrei Gheorghiu and Marius Minea. Energy-efficient solution for vehicle prioritisation employing zigbee v2i communications. In *Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2016 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2016.
- [35] Vineeth Kodire, Sreebha Bhaskaran, and HN Vishwas. Gps and zigbee based traffic signal preemption. In *Inventive Computation Technologies (ICICT), International Conference on*, volume 2, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [36] Jinyang Li, Yuanrui Zhang, and Yixiang Chen. A self-adaptive traffic light control system based on speed of vehicles. In *Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), 2016 IEEE International Conference on*, pages 382–388. IEEE, 2016.
- [37] Audi launches first Vehicle-to-Infrastructure (V2I) technology in the U.S. starting in Las Vegas. <https://www.audiusa.com/newsroom/news/press-releases/2016/12/audi-launches-vehicle-to-infrastructure-tech-in-vegas>. Accessed: Setembro 2017.
- [38] Connected Signals Products & services . <https://connectedsignals.com/products/>. Accessed: Setembro 2017.

- [39] Enlighten User Guide (Android). <https://connectedsignals.com/v2if-signal-feed-appliance/http://connectedsignals.com/enlighten-instructions-android/>. Accessed: Setembro 2017.
- [40] Enlighten User Guide (iPhone). <http://connectedsignals.com/enlighten-instructions-iphone/>. Accessed: Setembro 2017.
- [41] V2If Signal Feed Appliance. <https://connectedsignals.com/v2if-signal-feed-appliance/>. Accessed: Setembro 2017.
- [42] Enlighten BMW Integration. <http://connectedsignals.com/enlighten-instructions-bmw/>. Accessed: Setembro 2017.
- [43] BMW Group Announces the First Integration of EnLighten App. [https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0227922EN\\_US/bmw-group-announces-the-first-integration-of-enlighten-app?language=en\\_US](https://www.press.bmwgroup.com/usa/article/detail/T0227922EN_US/bmw-group-announces-the-first-integration-of-enlighten-app?language=en_US). Accessed: Setembro 2017.
- [44] Tentative Agenda. Manual on uniform traffic control devices. *Transportation*, 2017.
- [45] A Board T Kersloot A Stevens, A Quimby and P Burns. Design guidelines for safety of in-vehicle information systems. [http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20060728\\_165141\\_88073\\_UG340\\_Final\\_Report.pdf](http://www.transport-research.info/sites/default/files/project/documents/20060728_165141_88073_UG340_Final_Report.pdf). Accessed: Julho 2017.
- [46] AASHTO AASHTO. Policy on geometric design of highways and streets, 2001. [https://nacto.org/docs/usdg/geometric\\_design\\_highways\\_and\\_streets\\_aashto.pdf](https://nacto.org/docs/usdg/geometric_design_highways_and_streets_aashto.pdf). Accessed: Julho 2017.
- [47] Rui Silva Oliveira. Distância de paragem: parte 3 – Distância de paragem. <http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/ArtigosTecnicos/Documents/Dist%C3%A2ncia%20de%20paragem%20parte%203%20-%20dist%C3%A2ncia%20de%20paragem.pdf>. Accessed: Julho 2017.
- [48] Rui Silva Oliveira. Distância de paragem: parte 1 – distância de reacção. [http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/ArtigosTecnicos/Documents/Artigo\\_absolute%20motors.pdf](http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/ArtigosTecnicos/Documents/Artigo_absolute%20motors.pdf). Accessed: Julho 2017.
- [49] Rui Silva Oliveira. Distância de paragem: parte 2 – Distância de travagem. [http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/ArtigosTecnicos/Documents/Dist\\_travagem%20\(absolute%20Motors\)%20r.pdf](http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/ArtigosTecnicos/Documents/Dist_travagem%20(absolute%20Motors)%20r.pdf). Accessed: Julho 2017.
- [50] Tiago Manuel Oliveira da Silva et al. Definição do sistema de controlo de velocidade em vias urbanas. 2012.
- [51] IST-Engenharia Mecânica. Calculadora de distâncias de paragem para um veículo. [http://www.dem.ist.utl.pt/acidentes/suv/doc/Calculadora\\_de\\_distancia\\_de\\_travagem\\_V09.xlsx](http://www.dem.ist.utl.pt/acidentes/suv/doc/Calculadora_de_distancia_de_travagem_V09.xlsx). Accessed: Julho 2017.
- [52] Biblioteca wiringPi(). <http://wiringpi.com/>. Accessed: Outubro 2017.

- [53] Biblioteca wiringPi(): Core Functions. <http://wiringpi.com/reference/core-functions/>. Accessed: Outubro 2017.
- [54] Biblioteca wiringPi(): Serial Library. <http://wiringpi.com/reference/serial-library/>. Accessed: Outubro 2017.
- [55] Bluetooth Low Energy. <https://developer.android.com/guide/topics/connectivity/bluetooth-le.html>. Accessed: Outubro 2017.
- [56] Manifesto do Aplicativo,uses-feature. <https://developer.android.com/guide/topics/manifest/uses-feature-element.html>. Accessed: Outubro 2017.
- [57] ScanSettings. <https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/le/ScanSettings.html>. Accessed: Outubro 2017.
- [58] ScanRecord. <https://developer.android.com/reference/android/bluetooth/le/ScanRecord.html>. Accessed: Outubro 2017.
- [59] Código da Estrada, ANSR. [http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/CodigoDaEstrada/Documents/Codigo\\_Estrada\\_2014\\_versaoWEB.pdf](http://www.ansr.pt/SegurancaRodoviaria/CodigoDaEstrada/Documents/Codigo_Estrada_2014_versaoWEB.pdf). Accessed: Novembro 2017.