



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e de
Computadores**

Avaliação da Capacidade e Cobertura em Redes ITS-G5

MÁRIO RUI DA SILVA FERREIRA

(Licenciado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações e de Computadores)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações
na Área de Especialização em Telecomunicações

Orientador: Doutor António João Nunes Serrador

Júri:

Presidente: Doutor Nuno Miguel Machado Cruz

Vogal: Professor Nuno António Fraga Juliano Cota

setembro, 2021

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor António Serrador, por toda a sua disponibilidade, conhecimento e orientação prestada ao longo do desenvolvimento de toda a dissertação.

À Siemens pelo apoio, informação e dados disponibilizados que foram essenciais para o desenvolvimento da ferramenta construída no âmbito desta dissertação, em especial ao Engenheiro Afonso Pais de Sousa por toda a atenção e ajuda proporcionadas.

Por fim, gostaria de agradecer à minha família, sobretudo à minha mãe, por todo o carinho, suporte e ânimo oferecidos para que conseguisse atingir os meus objetivos.

Resumo

A tecnologia ITS-G5 surge no âmbito dos Sistemas de Transporte Inteligentes com o propósito de aumentar a percepção dos utilizadores/veículos em relação ao ambiente rodoviário, tendo em conta o que se passa no meio envolvente, através das comunicações *Vehicle-To-Everything* (V2X).

Esta tese tem como objetivo analisar a cobertura e a capacidade de uma rede ITS-G5. Revelando-se, deste modo, pertinente a consideração dos requisitos dos operadores rodoviários, tais como, a quantificação dos recursos a aplicar no meio rodoviário, para que as comunicações V2X sejam asseguradas em diferentes ambientes de propagação.

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta de *Software* que permite avaliar a capacidade de transmissão e de cobertura dos nós de comunicação *Road-Side-Units* (RSU). O estudo realizado sobre esta ferramenta, demonstra o impacto de características rádio, tais como, o ambiente de propagação, as perdas de sinal, as modulações usadas, serviços e protocolos considerados para este tipo de comunicações.

De acordo com os resultados obtidos verificou-se que a componente limitadora neste tipo de redes, ou seja, a cobertura ou a capacidade, assim como o número de RSU a implementar pelos operadores rodoviários pode variar consoante o cenário-teste em análise. Denotou-se, também, pela observação dos testes realizados, que são necessários no mínimo 2 RSU/km tanto no ambiente rural como no urbano, sendo que no ambiente rural esse número de RSU visa suportar o tráfego de dados gerado pelos nós da rede, enquanto que no ambiente urbano pretende assegurar a cobertura da rede.

Palavras-chave: ITS-G5, V2X, RSU, Capacidade.

Abstract

ITS-G5 technology appears in the scope of Intelligent Transport Systems (ITS) with the purpose of increasing the perception of users/vehicles in relation to the road environment, taking into account what is happening in the surrounding environment, through Vehicle-To-Everything communications (V2X).

This thesis aims to analyse the coverage and capacity of an ITS-G5 network. Having in mind road operator's requirements, such: quantify the resources to be applied on the road so that V2X communications are ensured in different propagation environments.

In this work a software tool was developed, allowing data transmission and coverage capacity evaluation, using Road-Side-Units (RSU) communication nodes. The study carried out on this tool, demonstrates the impact of radio characteristics such as the propagation environment, signal losses, the modulations used, services, and protocols considered for this type of communications.

According to the results obtained, it was found that the limiting component in this type of networks, that is, coverage or capacity, as well as the number of RSU to be implemented by road operators, may vary depending on the test-scenario under analysis. It was also denoted, by observing the tests carried out, that a minimum of 2 RSU/km is needed in both rural and urban environments, and in the rural environment this number of RSU is intended to support the data traffic generated by the network nodes, while in the urban environment it is intended to ensure network coverage.

Keywords: ITS-G5, V2X, RSU, Capacity.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Acrónimos	xv
Lista de Símbolos	xvii
Capítulo 1: Introdução	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 MOTIVAÇÃO.....	1
1.3 OBJETIVOS	2
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
1.5 PUBLICAÇÃO.....	3
Capítulo 2: Estado da Arte	5
2.1 REDES DE COMUNICAÇÕES VEICULARES	5
2.1.1 Caraterísticas da rede.....	5
2.1.2 Arquitetura da rede	6
2.1.3 Tipos de comunicações veiculares	7
2.1.4 Tipos de aplicações veiculares.....	8
2.1.5 Atribuição do espectro de frequências.....	9
2.2 NORMA: IEEE WAVE.....	10
2.2.1 Arquitetura da norma IEEE WAVE	10
2.2.2 IEEE 802.11p: Camadas PHY e MAC.....	12
2.3 A NORMA ETSI ITS-G5.....	14
2.3.1 Arquitetura da norma ETSI ITS-G5	14
2.3.2 Tipos de mensagens ETSI ITS-G5.....	16
2.4 NORMA: 3GPP C-V2X	17
2.5 PROJETOS ITS-G5.....	19

Capítulo 3: Especificação e Desenvolvimento da Ferramenta	21	
3.1	MODELO RÁDIO	22
3.2	MODELO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO	29
3.2.1	Capacidade da Via	29
3.2.2	Volume de Tráfego Automóvel	30
3.3	MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS DO OBU	30
3.3.1	Tráfego de Dados Gerado por Tipo de Mensagem	30
3.3.2	Tráfego de dados gerado por veículos	31
3.3.3	Tráfego de dados gerado por OBU	31
3.4	MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS DO RSU	32
3.4.1	Capacidade do canal	32
3.4.2	Eficiência Espectral do Canal	33
3.4.3	Tráfego de dados suportado	33
3.4.4	Tráfego de dados gerado pelo RSU	34
3.5	METODOLOGIA DE PLANEAMENTO	34
3.6	ARQUITETURA DA FERRAMENTA	36
3.7	FERRAMENTA DESENVOLVIDA	38
Capítulo 4: Análise de Resultados	41	
4.1	ANÁLISE DO MODELO RÁDIO	41
4.1.1	Modelo de propagação	41
4.1.2	Margens adicionais	44
4.1.3	Fórmula de Friis	46
4.1.4	Relação Sinal-Ruído	50
4.2	ANÁLISE DO MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS	51
4.2.1	Tráfego de dados suportado	51
4.2.2	Tráfego de dados gerado	52
4.3	PLANEAMENTO	57
4.4	APLICAÇÃO EM CENÁRIOS REAIS	59
Capítulo 5: Conclusões e Trabalho Futuro	65	
5.1	CONCLUSÃO	65
5.2	PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO	66
Bibliografia	67	

Anexo A 71

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de arquitetura das redes de comunicações veiculares (extraído de [4]).....	7
Figura 2.2 - Espectro de radiofrequências na faixa dos 5.9 GHz (extraído de [8])	10
Figura 2.3 - Arquitetura da norma IEEE WAVE (extraído de [16]).....	12
Figura 2.4 - Arquitetura da norma ETSI ITS-G5 (extraído de [3]).....	15
Figura 2.5 - Comunicações em modo direto com a utilização da interface PC5 (extraído de [26]).....	18
Figura 2.6 - Arquitetura da interface PC-5 (extraído de [27]).	18
Figura 2.7 - Comunicações em modo rede com a interface Uu (extraído de [26]).....	19
Figura 3.1 – Definição das distâncias d2D e d3D (extraído de [30]).....	23
Figura 3.2 - Diagrama de blocos do modelo rádio	36
Figura 3.3 - Diagrama de blocos do modelo de tráfego rodoviário	37
Figura 3.4 - Diagrama de blocos do modelo de tráfego de dados do OBU	37
Figura 3.5 - Diagrama de blocos do modelo de tráfego de dados do RSU	38
Figura 3.6 - Bloco relativo à metodologia de planeamento	38
Figura 3.7 - Interface Variables da ferramenta desenvolvida	39
Figura 3.8 - Interface Coverage da ferramenta desenvolvida	39
Figura 3.9 - Interface Capacity da ferramenta desenvolvida	40
Figura 3.10 - Interface Outputs da ferramenta desenvolvida	40
Figura 4.1 - Atenuação de propagação do sinal em ambiente rural LOS e NLOS	42
Figura 4.2 - Atenuação de propagação do sinal em ambiente urbano LOS e NLOS.....	43
Figura 4.3 - Perdas totais de sinal para os cenários de teste I-IV	45
Figura 4.4 - Potência Recebida para os cenários de teste I-IV	47
Figura 4.5 - Relação Sinal-Ruído verificada nos cenários de teste I-IV	50
Figura 4.6 - Ambiente Rodoviário I (extraído de [38]).....	60
Figura 4.7 - Ambiente Rodoviário II (extraído de [38])	61

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens das arquiteturas das redes de comunicações veiculares	7
Tabela 3.1 – Variáveis do Modelo de Propagação	22
Tabela 3.2 – Modelo de propagação do ambiente rural em LOS	24
Tabela 3.3 – Modelo de propagação do ambiente rural em NLOS	24
Tabela 3.4 – Modelo de propagação do ambiente urbano em LOS	25
Tabela 3.5 - Modelo de propagação do ambiente urbano em NLOS	25
Tabela 3.6 - Variáveis relativas à Fórmula de Friis	28
Tabela 3.7 - Variáveis relativas à SNR	28
Tabela 3.8 - Variáveis relativas à Capacidade da Via	29
Tabela 3.9 - Variáveis associadas ao volume real do tráfego da via	30
Tabela 3.10 - Variáveis relativas ao tráfego de dados gerado por tipo de mensagem	31
Tabela 3.11 - Variáveis pertencentes ao tráfego de dados gerado por veículos	31
Tabela 3.12 - Variáveis pertencentes ao tráfego de dados gerado por OBU	32
Tabela 3.13 - Variáveis relativas à Capacidade do Canal	33
Tabela 3.14 - Variáveis relativas à Eficiência Espectral do Canal	33
Tabela 3.15 - Variáveis relativas ao tráfego de dados suportado pelo RSU	34
Tabela 4.1 - Variáveis de entrada do Modelo de Propagação do Sinal	42
Tabela 4.2 - Nível de sinal mínimo das diferentes modulações ITS	47
Tabela 4.3 – Raio de cobertura e região de predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste I	48
Tabela 4.4 - Raio de cobertura e região de predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste II	48
Tabela 4.5 - Raio de cobertura e região predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste III	49

Tabela 4.6 - Raio de cobertura e região de predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste IV	49
Tabela 4.7 – Débito suportado pelas diferentes modulações ITS-G5	52
Tabela 4.8 Tráfego de dados médio suportado por canal e pelo RSU na zona de cobertura ...	52
Tabela 4.9 – Definição dos valores atribuídos às variáveis L_v , dEV e T	53
Tabela 4.10 - Volume de tráfego rodoviário para os cenários de teste I e III	53
Tabela 4.11 – Definição das mensagens inseridas no Perfil A	54
Tabela 4.12 - Definição das mensagens inseridas no Perfil B	55
Tabela 4.13 - Definição das mensagens inseridas no Perfil C	56
Tabela 4.14 – Tráfego de dados gerado pelo RSU, OBU e Veículos para o cenário de teste I	56
Tabela 4.15 Tráfego de dados gerado pelo RSU, OBU e Veículos para o cenário de teste III	57
Tabela 4.16 – Número de RSU a colocar por km para o cenário de teste I considerando os diferentes perfis de tráfego de dados	58
Tabela 4.17 - Número de RSU a colocar por km para o cenário de teste III considerando os diferentes perfis de tráfego de dados	59
Tabela 4.18 - Características do Ambiente Rodoviário I.....	60
Tabela 4.19 - Tráfego de dados dos diferentes equipamentos ITS para o Ambiente Rodoviário I.....	61
Tabela 4.20 - Número de RSU a considerar para os diferentes perfis de tráfego de dados do Ambiente Rodoviário I.....	61
Tabela 4.21 - Características do Ambiente Rodoviário II	62
Tabela 4.22 - Tráfego de dados dos diferentes equipamentos ITS para o Ambiente Rodoviário II	62
Tabela 4.23 - Número de RSU a considerar para os diferentes perfis de tráfego de dados do Ambiente Rodoviário II.....	63

Acrónimos

3GPP - *3rd Generation Partnership Project*

BSS - *Basic Service Set*

BSSID - *Basic Service Set Identification*

BTP - *Basic Transport Protocol*

CAM - *Cooperative Awareness Message*

C-ITS - *Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativo*

CPM - *Collective Perception Message*

D2D - *Device-to-Device Communication Standard*

DENM - *Decentralized Environmental Notification Message*

DLL - *Data Link Layer*

eNBs – *evolved NodeBs*

ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*

EUA – *Estados Unidos da América*

ISO - *International Organization for Standardization*

ITS – *Intelligent Transport Systems*

LLC – *Logical Link Control*

LOS – *Linha de Vista*

LTE - *Long Term Evolution*

MAC – *Camada de Acesso ao Meio*

MCM - *Manoeuvre Coordination Message*

NLOS – *Não Linha de Vista*

OBU - *On-Board-Unit*

OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OSI - *Open Systems Interconnection*

Path-Loss – Variação da atenuação do sinal em função da distância

PCM - *Platooning Control Message*

PHY – Camada física

RMS - *Root Mean Square*

RSU - *Road-Side-Unit*

SAE - *Society of Automobile Engineers*

SNR – Relação Sinal-Ruído

SPAT and MAP - *Signal Phase and Time and Map Message for Traffic Lights*

V2D - *Vehicle-to-Device*

V2G - *Vehicle-to-Grid*

V2I - *Vehicle-to-Infrastructure*

V2M - *Vehicle-to-Motorcycle*

V2N - *Vehicle-to-Network*

V2P - *Vehicle-to-Pedestrian*

V2V - *Vehicle-to-Vehicle*

V2X - *Vehicle-to-Everything/ Comunicações veiculares*

VAM - *VRU Awareness Message*

VRU - *Vulnerable Road User*

WAVE - *Wireless Access in Vehicular Environment*

WBSS - *WAVE Basic Service Set*

WLAN - *Wireless Local Area Network*

WSMP - *Wave Short Message Protocol*

Lista de Símbolos

σ –Desvio Padrão

C -Capacidade da via

d -Distância ao RSU

d_{EV} -Distância de segurança entre veículos

d_{2D} -Distância 2D

d_{3D} -Distância 3D

f_c -Frequência central do canal

G_E -Ganho da antena de emissão

G_R -Ganho da antena de recepção

h -Altura média dos edifícios locais

h_{BS} -Altura do RSU

h_{UT} -Altura do OBU

I_M -Margem de Interferência

L -Perdas de sinal

LB_c -Largura de banda dos canais

L_{Cabo} -Perdas de cabo

Limit-Limite mínimo de SNR

L_{MP} -Dimensão do pacote associada a determinado tipo de mensagem ITS-G5

L_{OLOS_V} -Perdas de sinal resultantes da obstrução do sinal em LOS entre veículos

L_p -*Path-Loss* médio

L_{PP} -Perdas de penetração do sinal no veículo

L_R -Área de cobertura máxima do RSU (Diâmetro)

L_V -Comprimento médio dos veículos

M_L -Limites das várias modulações

M_R -Tráfego de dados gerado, por segundo, para certo tipo de mensagem ITS-G5

N_C -Número de canais ITS

P_E -Potência de emissão do RSU

P_R -Potência de recepção do OBU

$P_{R_{Modulação}}$ -Nível de sinal mínimo de uma modulação

$P_{Ruído}$ -Potência do ruído

R -Taxa de ocupação da via

RSU_{AC} -Ritmo de transmissão médio suportado por cada canal do RSU

RSU_{ADT} -Tráfego médio de dados suportado pelo RSU

S_E -Eficiência espectral média de um canal ITS-G5

SNR -Relação Sinal-Ruído

T -Número de faixas da estrada

t_R -*Bit-Rate* associado a cada modulação ITS-G5

T_R -Tráfego de dados gerado pela estrada

T_{TOBU} -Tráfego de dados gerado por OBU

T_{TRSU} -Tráfego de dados gerado pelo RSU

T_X -Número de pacotes transmitidos, por segundo, para determinado tipo de mensagem ITS-G5

U_p -Porcentagem de utilização de um tipo de mensagem

V -Volume Real de Tráfego da via

w -Largura média das ruas locais

X_σ -*Shadow Fading Factor*

Capítulo 1: Introdução

1.1 ENQUADRAMENTO

Anualmente o número de veículos nas estradas tem sofrido um aumento significativo, um pouco por todo o mundo, resultante do crescimento da população mundial, bem como da diminuição dos custos associados ao funcionamento dos veículos [1].

Como consequência do aumento da circulação rodoviária surgem efeitos adversos, nomeadamente, o aumento do congestionamento das estradas e do tempo necessário para percorrer determinado percurso. Denota-se, também, a existência de um número considerável de acidentes, de mortes e de pessoas com sequelas, constituindo-se, assim, a segurança rodoviária e a eficiência e gestão do tráfego um desafio para as autoridades.

Outro problema decorrente do aumento da circulação rodoviária corresponde à poluição atmosférica. Esta tem provocado impactos não só a nível ambiental, mas também a nível económico e de saúde das pessoas [2].

Com o propósito de dar resposta aos problemas explicitados surgem os *Intelligent Transport Systems* (ITS). Estes constituem-se como uma tecnologia capaz de gerir, de forma eficiente, as informações partilhadas entre os vários elementos da estrada (veículos e infraestruturas dispostas ao longo das faixas de rodagem), automatizando, por sua vez, as comunicações *Vehicle-to-Everything* (V2X) entre os diferentes nós com o propósito de elevar os níveis de segurança e conforto nas estradas, possibilitando a minimização do impacto ambiental causado pelo tráfego rodoviário.

1.2 MOTIVAÇÃO

As comunicações V2X constituem-se como uma possível solução para os problemas relativos ao meio rodoviário, tendo o interesse pelo seu desenvolvimento propulsionado o surgimento de novas tecnologias capazes de suportar este tipo de comunicações como, por exemplo, a norma *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) ITS-G5, devendo continuar a apostar-se na investigação acerca deste tipo de tecnologia e na realização de testes relativos à implementação da mesma.

Assim sendo, a concretização desta dissertação visa estimar qual o número mínimo de infraestruturas a aplicar ao longo da faixa de rodagem, denominadas de *Road-Side Unit* (RSU), necessárias para que se consiga implementar as redes ITS-G5 nos diferentes ambientes de propagação, facilitando o processo de aplicação deste tipo de redes ao meio rodoviário.

1.3 OBJETIVOS

O principal objetivo desta tese consiste em analisar a cobertura e a capacidade de uma rede ITS-G5, de forma a que os operadores rodoviários consigam quantificar os recursos a aplicar no meio rodoviário, permitindo que as comunicações V2X sejam asseguradas em diferentes ambientes de propagação.

Com o intuito de dar resposta ao objetivo supracitado foram definidas as seguintes metas para esta dissertação:

- Identificar o que é uma rede veicular, quais as suas características, quais as arquiteturas que lhe estão associadas, quais os tipos de comunicação e de aplicações presentes nas mesmas;
- Reconhecer as diferentes tecnologias que possibilitam a existência de redes de comunicações veiculares;
- Analisar quais as componentes necessárias para a determinação da capacidade e da cobertura, por parte dos equipamentos ITS;
- Definir a estrutura de um modelo que descreva como se alcançam os valores de cobertura e da capacidade dos equipamentos pertencentes a este tipo de redes;
- Desenvolver uma ferramenta de *software* que agregue todas as componentes definidas no ponto anterior, de forma a obter o número de RSU necessário a implementar nas estradas, sendo, posteriormente, realizada a análise dessa aplicação em múltiplos cenários.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos, designadamente: a presente introdução, o estado da arte, a especificação e desenvolvimento da ferramenta, a análise de resultados e a conclusão.

Ao longo da introdução foi elaborada uma breve delimitação da temática em estudo, denominada de enquadramento, sendo descrita qual a motivação para a seleção do tema analisado ao longo desta dissertação, quais os objetivos e a estrutura definidos para a mesma e, por último, a publicação associada. De seguida, no estado de arte, será realizada uma apresentação genérica das redes de comunicações veiculares, nomeadamente, das suas características mais importantes, dos diferentes tipos de arquitetura, de comunicações e de aplicações veiculares, bem como da atribuição do espectro de frequências para este tipo de redes. Serão abordadas, similarmente, as diferentes tecnologias que suportam este tipo de redes e os diferentes projetos relacionados com as mesmas. No capítulo “Especificação e desenvolvimento da ferramenta” serão definidos os diversos modelos necessários para que se consiga obter um valor de número de RSU a implementar nas estradas. No capítulo 4 serão testados diferentes cenários, com vista na compreensão dos principais fatores que influenciam o número de RSU a dispor ao longo das estradas. Por último, será realizada uma síntese das principais ideias geradas ao longo desta dissertação e a sua relevância para os operadores rodoviários.

1.5 PUBLICAÇÃO

Ao longo do desenvolvimento desta dissertação foi aceite um artigo científico para o 9º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia denominado de “Desafios da Engenharia na Cooperação para o Desenvolvimento e Combate às Alterações Climáticas”, que decorrerá em 2021, adiado agora para 2022 devido à pandemia e à insegurança em Moçambique.

- M. Ferreira and A. Serrador, "Implementação e Desempenho da Tecnologia ITS-G5 em Ambiente Urbano e Autoestrada", in 9º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 2022. (Aceite).

Capítulo 2: Estado da Arte

Ao longo deste capítulo serão abordados alguns conceitos, normas e projetos relacionados com as comunicações veiculares ITS-G5.

Primeiramente, será analisada toda a vertente relativa às redes de comunicações veiculares, estando esta subdividida nos seguintes tópicos: diferentes características e arquiteturas deste tipo de rede; tipos de comunicações veiculares; grupos distintos de aplicações existentes; espectro de frequências atribuído a este tipo de comunicações.

De seguida, será efetuada a identificação das principais normas existentes para este tipo de comunicações, bem como o estudo da arquitetura presente em cada.

Por último, serão apresentados alguns projetos que se encontram em desenvolvimento sobre esta temática, sendo realizada uma breve descrição dos mesmos.

2.1 REDES DE COMUNICAÇÕES VEICULARES

As redes de comunicações veiculares são formadas por veículos e por infraestruturas que, com recurso a comunicações sem fios, permitem que os vários elementos da rede comuniquem entre si. Para que este tipo de comunicações se realize é necessário que os elementos da rede como os veículos se encontrem equipados com um dispositivo OBU (*On-Board-Unit*) e que as infraestruturas possuam um dispositivo RSU [3].

2.1.1 Características da rede

As redes de comunicações veiculares apresentam características que as diferenciam das restantes redes *ad-hoc*, uma vez que os nós pertencentes às mesmas dizem respeito sobretudo aos veículos. Assim sendo, é possível destacar algumas propriedades específicas das comunicações veiculares [3], designadamente:

- **Topologia de rede dinâmica** – graças à elevada mobilidade dos nós e à constante alteração da direção dos mesmos constata-se uma permanente mudança na posição dos nós em relação aos nós vizinhos, verificando-se uma alteração frequente da topologia da rede;

- **Desconexões frequentes** – a sua ocorrência pode relacionar-se com diversos fatores, tais como, a topologia da rede dinâmica, a alta mobilidade dos nós, as condições climatéricas, a baixa densidade do tráfego e a obstrução repentina, devido à presença de obstáculos;
- **Baixa latência** – apresenta-se como sendo uma característica importante, uma vez que permite que os veículos disponham de informação atualizada sobre o meio circundante, independentemente da velocidade a que os mesmos circulem;
- **Fiabilidade** – a fiabilidade nas redes de comunicações veiculares deve mitigar as falhas na transmissão, de forma a minimizar a introdução de erros;
- **Privacidade e segurança** – a privacidade deve ser assegurada para que este tipo de redes seja aceite, tanto pelas pessoas como pelas autoridades governamentais. No que diz respeito às falhas na segurança estas podem ter um grande impacto a nível rodoviário, podendo implicar a perda de vidas humanas.

2.1.2 Arquitetura da rede

Tendo em conta as características relativas às redes de comunicações veiculares, a arquitetura das mesmas apresenta-se como um ponto de extrema importância, dada a vertente dinâmica da rede.

Em relação à arquitetura esta pode ser classificada em três categorias, como apresentado na Figura 2.1, podendo ser [4]:

- **Puramente *ad-hoc*** – redes em que as estações ITS, mais especificamente os veículos, não necessitam de uma infraestrutura externa para poderem comunicar mutuamente, sempre que se encontrem próximos o suficiente uns dos outros;
- **Puramente celular/ *Wireless Local Area Network (WLAN)*** – corresponde a uma rede baseada numa infraestrutura, com pontos de acesso ligados entre si, disponibilizando uma cobertura sem fios a todos os elementos da rede, sendo possível os veículos usarem esses pontos para se comunicarem e se ligarem à *Internet*;
- **Híbrida** – consiste numa junção das duas arquiteturas anteriores, combinando as comunicações *ad-hoc* com a implementação de infraestruturas, os RSU, em pontos estratégicos da via, de forma a colmatar as fraquezas das duas arquiteturas apresentadas.

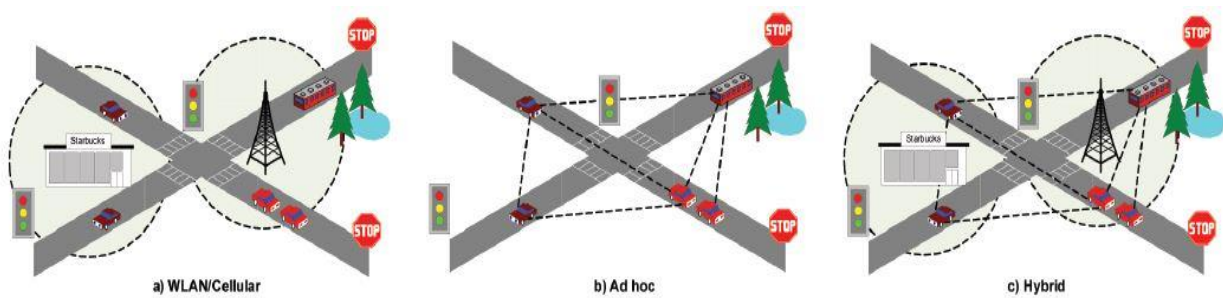


Figura 2.1 – Tipos de arquitetura das redes de comunicações veiculares (extraído de [4]).

De seguida apresentam-se, na Tabela 2.1, as vantagens e as desvantagens de cada arquitetura no que diz respeito à cobertura e aos custos de implementação das mesmas.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens das arquiteturas das redes de comunicações veiculares

Arquitetura	Puramente <i>ad-hoc</i>	Puramente celular/ <i>WLAN</i>	Híbrida
Vantagens	Baixo custo	Boa cobertura	Boa cobertura Custos moderados
Desvantagens	Baixa cobertura	Custos elevados	-

2.1.3 Tipos de comunicações veiculares

As redes de comunicações veiculares suportam um conjunto de comunicações definido como V2X que têm como objetivo proporcionar um aumento da perceção dos utilizadores rodoviários sobre o meio envolvente podendo, desta forma, contribuir para a diminuição do congestionamento rodoviário, do número de acidentes e do consumo por parte dos veículos, traduzindo-se, sobretudo, num aumento da segurança rodoviária [5].

Deste modo, serão referidos os diferentes tipos de comunicação V2X que suportam as várias opções de conectividade, podendo estes ser definidos como [6]:

- **V2V (*Vehicle-to-Vehicle*)**: permite a troca de informação entre veículos como, por exemplo, o posicionamento e a velocidade dos mesmos, sem que seja necessária a conetividade com a rede de telecomunicações;

- **V2I (*Vehicle-to-Infrastructure*):** é utilizada para possibilitar a troca de dados entre um veículo e os vários RSU presentes ao longo da faixa de rodagem;
- **V2P (*Vehicle-to-Pedestrian*):** visa a partilha de informação entre os veículos e os utilizadores vulneráveis, através dos seus telemóveis ou de qualquer outro tipo de equipamento que permita este tipo de comutação de dados;
- **V2D (*Vehicle-to-Device*):** pretende permitir a comunicação entre o veículo e dispositivos, tais como, a *smart key* e o *car tracker*;
- **V2G (*Vehicle-to-Grid*):** tem como meta possibilitar a comunicação entre os veículos elétricos e a rede elétrica, de forma a proporcionar o acesso a determinados serviços;
- **V2M (*Vehicle-to-Motorcycle*):** serve para estabelecer a troca de dados entre veículos e motociclos.
- **V2N (*Vehicle-to-Network*):** possui como finalidade a comunicação entre o veículo e a rede móvel, com o intuito de aceder a determinados serviços da rede como, por exemplo, obter o conhecimento antecipado de um acidente, do congestionamento de uma via ou o acesso à *Internet*.

2.1.4 Tipos de aplicações veiculares

As comunicações veiculares têm sido alvo de um crescente interesse devido às aplicações que estas podem introduzir no meio rodoviário, dado que o seu objetivo consiste em reduzir o número de acidentes nas estradas, o congestionamento do tráfego e a poluição causada pelos veículos, sendo a segurança, a qualidade de vida e o conforto dos passageiros a sua prioridade. Deste modo, organismos reguladores como o ETSI têm estabelecido algumas aplicações a serem implementadas a nível Europeu.

Estas aplicações podem dividir-se em três grupos principais [4], [7]: (i) aplicações de segurança rodoviária, (ii) aplicações de eficiência e gestão do tráfego e (iii) aplicações de informação e entretenimento.

- Aplicações de segurança rodoviária:** visam a diminuição da sinistralidade e consequente perda de vidas através da emissão de avisos e mensagens curtas que têm como objetivo informar o condutor acerca do que se passa em torno do veículo, de forma

mais rápida;

- ii. **Aplicações de eficiência e gestão do tráfego:** têm como propósito melhorar a fluidez do tráfego e a coordenação do mesmo através do fornecimento de mensagens portadoras de informação atualizada sobre a localização em que o veículo se encontra;
- iii. **Aplicações de informação e entretenimento:** possibilitam o acesso a informações relacionadas com a vertente do entretenimento e com a determinação de possíveis pontos de interesse. No que diz respeito ao entretenimento é possível obter o acesso à *Internet*, enquanto que ao nível dos pontos de interesse possibilita a determinação, por exemplo, da localização de um posto de abastecimento, de um hotel, entre outros.

Dos três tipos de aplicações mencionadas as que têm sido alvo de maior atenção são as de segurança e as de eficiência do tráfego, porém as aplicações associadas ao entretenimento apresentam-se como um catalisador para o desenvolvimento das redes de comunicações veiculares.

2.1.5 Atribuição do espectro de frequências

Para que as comunicações associadas às redes de comunicações veiculares se processem é necessário que exista a atribuição de uma gama de frequências específica do espectro eletromagnético, para que os diferentes nós da rede consigam comunicar entre si.

O primeiro país a reservar uma gama de frequências de 75 MHz na faixa dos 5.9 GHz, (Figura 2.2) [8], de forma a permitir as comunicações ITS, foi os *Estados Unidos da América* (EUA).

A Europa, tal como os EUA, disponibilizou na mesma faixa de frequências a gama dos 5855-5925 MHz, para o desenvolvimento deste tipo de sistemas [3].

A atribuição do espectro de frequências para este tipo de redes proporcionou o desenvolvimento de diferentes *standards* capazes de permitir este tipo de comunicações como, por exemplo o: IEEE WAVE, ETSI ITS-G5 e 3GPP C-V2X. Estas normas serão apresentadas nos subcapítulos seguintes.

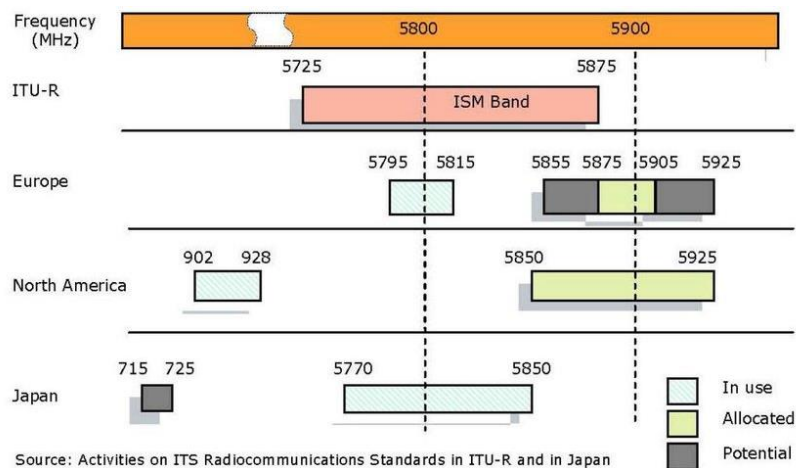


Figura 2.2 - Espectro de radiofrequências na faixa dos 5.9 GHz (extraído de [8])

2.2 NORMA: IEEE WAVE

A norma IEEE WAVE caracteriza-se por ser um *standard* assente sobre WLAN modificado, que permite a existência de comunicações veiculares entre os vários elementos da rede.

2.2.1 Arquitetura da norma IEEE WAVE

No decorrer deste ponto será efetuada uma análise das várias normas que constituem a arquitetura do *standard Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE)*, nomeadamente os *standards* IEEE 802.11p e IEEE 1609.1-4, que definem a arquitetura, o modelo de comunicação, a estrutura de gestão, a segurança e o acesso ao meio por parte dos veículos.

Esta norma é formada por um conjunto de *standards* que compõem a sua pilha/*stack* protocolar, estando estes associados às diferentes camadas do modelo *Open Systems Interconnection (OSI)* [4]. As normas que constituem este *stack* denominam-se e definem-se como:

- **IEEE 802.11p**

A norma IEEE 802.11p é uma extensão da família de normas de redes sem fios IEEE 802.11 que define as camadas física (PHY) e de acesso ao meio (MAC), necessárias para que se possa operar num ambiente veicular [4], [9].

- **IEEE 1609.1**

Esta norma define os serviços e as interfaces da aplicação de Gestão de Recursos da Arquitetura WAVE que têm como objetivo favorecer a interoperabilidade das aplicações WAVE, permitindo a comunicação entre as aplicações que funcionam nos RSU e nos OBU [10], [11], [12].

- **IEEE 1609.2**

A norma IEEE 1609.2 é responsável pela segurança na comunicação. Este *standard* define o formato, o processamento e a troca de mensagens seguras, lidando com as questões da autenticação e criptografia [3].

- **IEEE 1609.3**

Esta norma oferece os serviços de encaminhamento e endereçamento da informação, associados às normas WAVE, na camada de rede e de transporte do modelo OSI. Este *standard* é, também, responsável pela configuração e gestão da ligação WAVE, fornecendo suporte para aplicações de alta prioridade, sobre *Wave Short Message Protocol* (WSMP), e para aplicações tradicionais como, por exemplo, o acesso à *Internet*, sobre IPv6. Assume, igualmente, como propósito a transmissão de *frames* IPv6 e WSMP, a sua alocação para a transmissão no canal correto, bem como a gestão da prioridade das mensagens [3], [4], [13].

- **IEEE 1609.4**

Tem como finalidade possibilitar operações entre diferentes canais, com vista no suporte de diferentes tipos de aplicações, como é o caso das aplicações de segurança rodoviária e as de entretenimento [14].

- **SAE J2735**

Define o conjunto de mensagens a ser utilizado para as comunicações V2X, tal como a sua estrutura [4], [9], [15].

Na Figura 2.3 [16] encontram-se apresentadas as várias normas pertencentes ao *standard* IEEE WAVE, que foram sumariamente descritas ao longo deste subcapítulo.

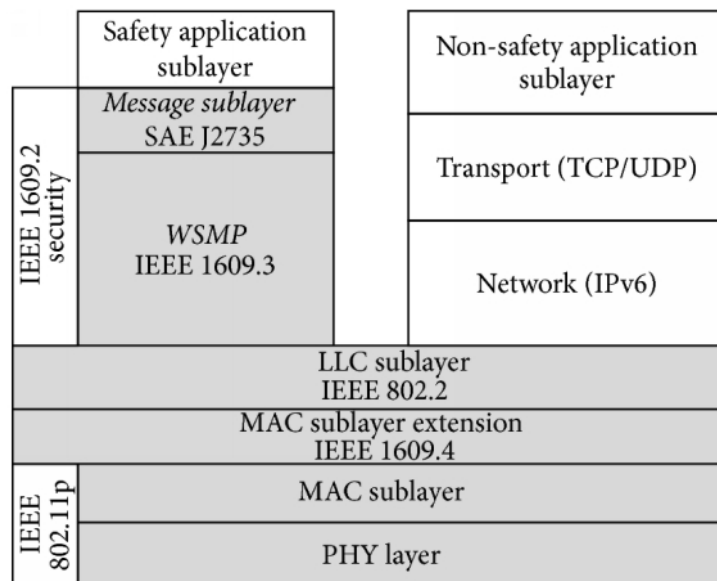


Figura 2.3 - Arquitetura da norma IEEE WAVE (extraído de [16]).

2.2.2 IEEE 802.11p: Camadas PHY e MAC

Após esta primeira abordagem sobre os vários *standards* pertencentes à norma WAVE será analisada, com maior detalhe, a norma IEEE 802.11p, sendo referidas as alterações efetuadas, tanto na camada PHY como na MAC, para que este tipo de comunicações possa ocorrer em ambiente rodoviário.

No que diz respeito à camada PHY, o IEEE 802.11p efetuou três modificações fundamentais relativamente ao IEEE 802.11a, designadamente, [10]:

- Na largura de banda dos canais, que passou de 20 MHz do IEEE 802.11a para 10 MHz do IEEE 802.11p. A utilização de canais com uma menor largura de banda, em ambiente rodoviário, tem como propósito reduzir o maior *Root Mean Square* (RMS) do espalhamento do atraso esperado em ambientes veiculares. Esta alteração foi conseguida utilizando o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), resultando apenas na duplicação dos parâmetros do domínio temporal;
- Na alteração dos requisitos de desempenho do recetor rádio, que se revelam mais restritivos do que os presentes na norma anterior, sobretudo no que se refere à rejeição de canais adjacentes. Estes requisitos têm como propósito a redução da interferência

entre canais, problema considerável em zonas de grande densidade veicular;

- Na alteração dos requisitos de transmissão das mensagens, mais propriamente na redução da latência, que se constitui como a modificação mais importante em relação à norma anterior, uma vez que permite que os veículos consigam obter informação sobre o meio envolvente, mais atualizada, e com o mínimo *delay* possível, de modo a evitar acidentes e mortes.

Para além das alterações mencionadas na camada PHY foram também implementadas certas mudanças e requisitos na camada MAC, como é possível verificar pelos pontos que se seguem, [17]:

- **Introdução do modo WAVE** – veio permitir que uma estação que se encontre neste modo possa enviar e receber tramas de outros veículos, independentemente da mesma pertencer ou não a um WBSS (*WAVE Basic Service Set*), bastando, para isso, enviar as tramas com o *wildcard* BSSID (*Basic Service Set Identification*), com os campos “From DS” e “To DS”, configurados a zero;
- **Definição do funcionamento e criação de um WBSS** - um BSS deste tipo resulta de um conjunto de estações que se encontram no modo WAVE e que se comunicam através de um BSSID comum. A criação deste tipo de BSS resulta do envio de um *beacon* por parte de um nó, no modo WAVE, portador de todas as informações necessárias para que outros nós que se encontrem no meio se consigam ligar aquele WBSS;
- **Descrição do comportamento de um nó aquando da entrada e da saída de um WBSS** - um nó só entra para um WBSS, apenas e só, quando o mesmo se encontra configurado para enviar e receber tramas com o BSSID definido para o WBSS a que se propõe. A saída, por sua vez, acontece quando o MAC do mesmo deixa de enviar e receber tramas que usam o BSSID desse WBSS;
- **Restrição do comportamento de um nó para que possa pertencer a este tipo de BSS** - para que um nó pertença a um WBSS não pode pertencer a nenhum outro em simultâneo, como também não deve usar procedimentos de autenticação ou associação MAC.

A análise da norma IEEE 802.11p revela-se necessária na medida em que a mesma serviu de base para a norma Europeia.

2.3 A NORMA ETSI ITS-G5

A norma ETSI ITS-G5, foi criada seguindo a norma IEEE WAVE, sendo o seu propósito permitir a existência de comunicações veiculares entre os vários elementos da rede.

2.3.1 Arquitetura da norma ETSI ITS-G5

A arquitetura da norma ITS-G5, rege-se, tal como a norma IEEE WAVE, pelos princípios do modelo OSI, encontrando-se subdividida em várias camadas às quais estão atribuídas um conjunto de funções e características específicas. Estas camadas serão abordadas de forma sucinta, tendo em conta a norma EN ETSI 302 665 [18], sendo apresentadas de seguida:

- **Acesso (*Access Layer*)**

A camada de Acesso é formada por duas camadas, a PHY e a *Data Link Layer* (DLL). A primeira tem como função permitir o acesso ao meio e a segunda tem como propósito gerir o acesso aos canais de comunicação lógicos, encontrando-se subdividida nas camadas MAC e LLC.

- **Rede e transporte (*Networking & transport layer*)**

Esta camada tem como finalidade realizar a gestão da rede, assim como o transporte de dados entre comunicações existentes entre veículos e entre veículos e outros nós da rede. Ao nível da rede existem dois protocolos de interesse, o GeoNetworking e o IPv6. O primeiro permite a disseminação da informação de um nó para o outro através do encaminhamento dos dados, em ambiente veicular, sem recurso à infraestrutura das redes celulares móveis, sendo os dados transmitidos a partir do *Basic Transport Protocol* (BTP), enquanto que o IPv6 é utilizado em aplicações que requeiram, por exemplo, o acesso à *Internet*, utilizando os protocolos de transporte tradicionais, o UDP e o TCP.

- ***Facilities***

Nesta camada é realizada a recolha, o tratamento e a disponibilização dos dados às aplicações que deles necessitem, sendo esses dados provenientes dos sensores do veículo, da rede em que

o mesmo se apresente e de outros veículos que se encontrem a comunicar com o mesmo. Para além das funções mencionadas, esta camada permite, similarmente, a autenticação das aplicações, possibilitando a comunicação com as redes disponíveis das camadas abaixo.

- **Aplicação (*Application layer*)**

A presente camada define os vários tipos de aplicações existentes em ambientes veiculares, os seus *use-cases*, bem como a sua estrutura e os critérios a verificar para a sua utilização.

- **Gestão (*Management layer*)**

A camada de gestão tem como propósito gerir as restantes camadas do *stack* e permitir a troca de informação entre as mesmas.

- **Segurança (*Security layer*)**

Esta camada garante a segurança e a privacidade das restantes camadas da norma, solucionando as questões relacionadas com a autenticação e criptografia.

A Figura 2.4 apresenta as várias camadas pertencentes à norma ITS-G5, identificando também algumas funções das mesmas e as suas relações com as restantes camadas.

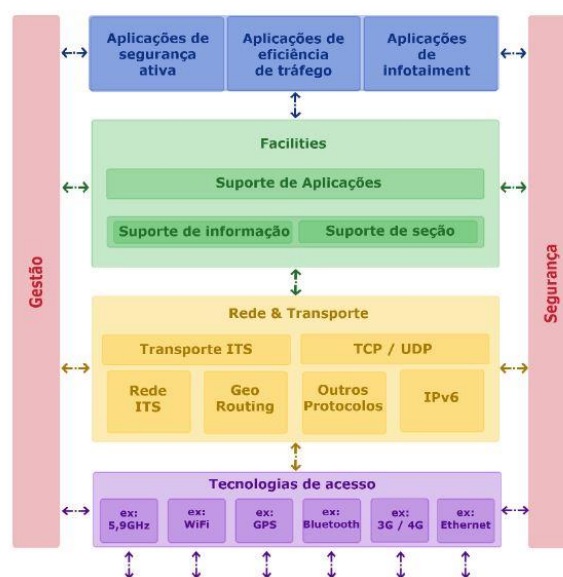


Figura 2.4 - Arquitetura da norma ETSI ITS-G5 (extraído de [3]).

2.3.2 Tipos de mensagens ETSI ITS-G5

As redes de comunicações veiculares, como tem sido referido até então, suportam um conjunto de comunicações V2X que, acima de tudo, têm como finalidade melhorar a segurança e eficiência do meio rodoviário, assim como reduzir as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera.

Deste modo, para que as comunicações referentes a este tipo de redes se processem é necessária a troca de diferentes tipos de mensagens consoante o tipo de evento ou informação que se pretenda transmitir.

Neste subcapítulo serão apresentados, de seguida, alguns tipos de mensagens utilizados na tecnologia ITS-G5, nomeadamente:

- **CAM (*Cooperative Awareness Message*)** – este tipo de mensagem oferece informação acerca do estado de um veículo, da sua posição e da sua velocidade, fornecendo, também, outros dados aos nós circundantes [19];
- **DENM (*Decentralized Environmental Notification Message*)** – as DENM são geradas e transmitidas quando ocorrem determinados eventos como, por exemplo, a circulação de veículos de emergência, sendo transmitidos avisos com o propósito de alertar os utilizadores do meio rodoviário dessas ocorrências [20];
- **VAM (*Vulnerable Road User Awareness Message*)** – estas mensagens permitem a partilha de informação entre dispositivos como os motociclos, as bicicletas e os peões com os veículos e as infraestruturas colocadas ao longo das faixas de rodagem. O objetivo deste tipo de mensagens consiste em tornar os *Vulnerable Road Users* (VRUs) mais conscientes do meio envolvente, fornecendo alertas sobre o risco de colisão entre um nó rodoviário e um/uns VRU/VRUs [21];
- **CPM (*Collective Perception Message*)** – podem ser definidas como sendo mensagens que possibilitam a partilha de informação, detetada pelos sensores presentes num determinado nó ITS, de forma a que os restantes nós, nas proximidades, consigam ter uma maior perceção do ambiente que os rodeia, para além das suas capacidades de

deteção. Revelando-se, deste modo, possível, a identificação de objetos, tais como, veículos não conectados à rede veicular, peões, obras nas estradas, entre outros [22];

- **SPAT and MAP (*Signal Phase and Time and Map Message for Traffic Lights*)** - estes dois tipos de mensagens têm como propósito evitar que os veículos que se encontrem a circular em direção a uma interseção fiquem parados desnecessariamente à espera da transição da fase do semáforo, através da gestão e controlo do tráfego, oferecendo, por sua vez, informações sobre a velocidade a que os mesmos devem circular com base nos tempos de transição de fase do semáforo [23], [24];
- **PCM (*Platooning Control Message*)** – neste tipo de mensagem o propósito consiste em sincronizar, sempre que possível, a circulação de um conjunto de camiões, aumentando-se, sobretudo, a eficiência do tráfego rodoviário [25];
- **MCM (*Manoeuvre Coordination Message*)** – as mensagens MCM têm como objetivo apoiar a coordenação de manobras entre veículos.

2.4 NORMA: 3GPP C-V2X

A norma *Cellular V2X*, ao contrário das apresentadas até este ponto, caracteriza-se por operar sobre uma rede celular, tendo sido introduzida pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), na *Release 14*, como um serviço pertencente à plataforma *Long Term Evolution* (LTE) que possibilitaria a comunicação V2X.

Esta norma apresenta dois modos de comunicação nomeadamente, o direto e o em rede, sendo os mesmos utilizados consoante o tipo de aplicação que se pretende efetuar. Os dois modos de comunicação mencionados serão descritos e aprofundados de seguida.

- **Modo direto**

O modo direto suporta a troca de informação em tempo real a curtas distâncias através da interface PC5, muitas vezes definida como *Sidelink*. Esta interface é utilizada pelas aplicações que se encontram inseridas no âmbito da segurança rodoviária, possibilitando as comunicações V2V, V2I e V2P, como ilustrado na Figura 2.5 [26].

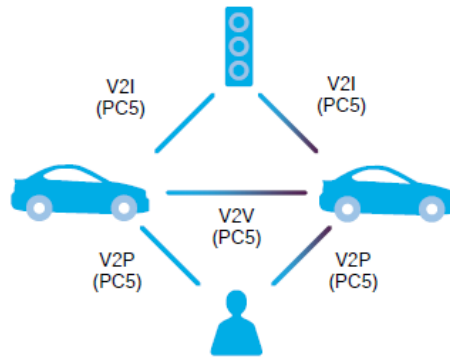


Figura 2.5 - Comunicações em modo direto com a utilização da interface PC5 (extraído de [26]).

Para além das características apresentadas, esta interface, embora pertença a uma norma que se encontra sobre o domínio do LTE, não possui o suporte da rede celular, ou seja, não necessita de cobertura para que permaneça a funcionar, encontrando-se a mesma a operar na faixa ITS dos 5.9 GHz.

No que diz respeito à arquitetura deste tipo de interface, como representado na Figura 2.6 [27], as camadas mais baixas resultam da adaptação do *Device-to-Device Communication Standard* (D2D), como parte dos serviços ProSe definidos nas *Releases* 12 e 13 do 3GPP, enquanto que as camadas superiores utilizam as normas definidas pelo ETSI, pelo *Society of Automobile Engineers* (SAE), pelo *International Organization for Standardization* (ISO) e pelo IEEE [6].

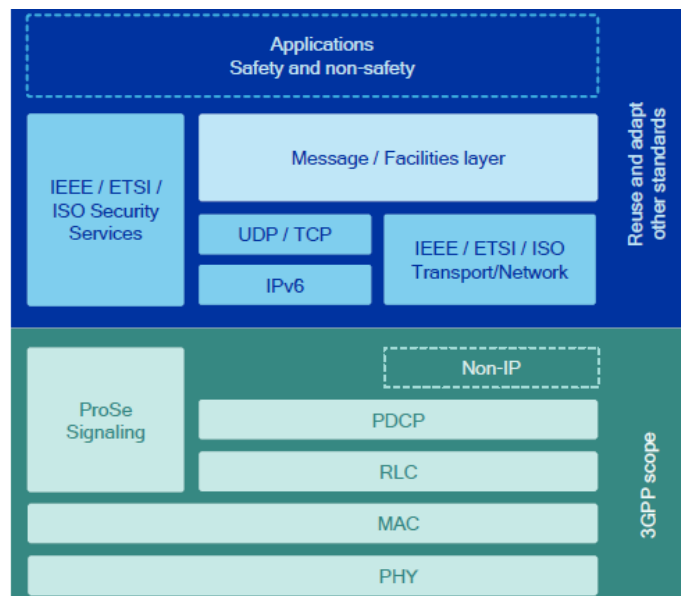


Figura 2.6 - Arquitetura da interface PC-5 (extraído de [27]).

- **Modo Rede**

Este modo, ao contrário do anterior, tem em vista a comunicação de longo alcance através da interface Uu, aproveitando, por sua vez, a infraestrutura LTE que se encontra disseminada um pouco por todo o lado, para ligar os dispositivos dos utilizadores e dos veículos às estações base (eNBs) e à rede principal, como é possível constatar pela observação da Figura 2.7, de modo a permitir as comunicações V2N, bem como a inclusão de serviços como é o caso do acesso à *Internet*, a aplicações de conforto e entretenimento e ainda a aplicações direcionadas à gestão do tráfego [6].

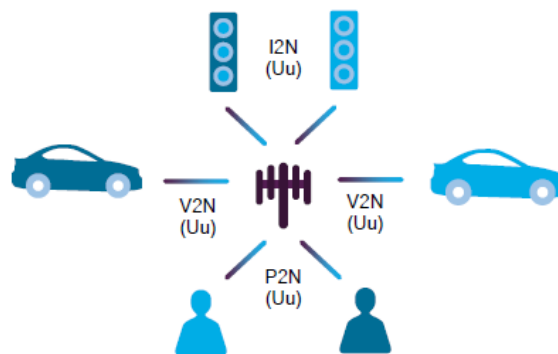


Figura 2.7 - Comunicações em modo rede com a interface Uu (extraído de [26]).

2.5 PROJETOS ITS-G5

Dado o crescente interesse em torno das comunicações V2X verifica-se a existência de diversos projetos, a nível mundial, relacionados com as mesmas.

No que diz respeito à Europa, a Comissão Europeia é a principal impulsionadora da investigação e do desenvolvimento das comunicações anteriormente mencionadas, estabelecendo ligação com diversos órgãos e consórcios europeus. Estas relações são essenciais para que se estabeleça um sistema que proporcione uma maior modernização na condução, minimizando o número de mortes nas estradas e a poluição atmosférica e maximizando a fluidez do tráfego e a segurança rodoviária [4].

O ETSI é o principal responsável pela definição das normas europeias relativamente às comunicações veiculares. Por outro lado, o *Car-to-Car Communication Consortium* constitui-se como uma entidade que tem como função estabelecer a arquitetura e o princípio geral das comunicações V2X na Europa, sendo composta por diversas empresas da indústria automóvel, de tecnologia, por centros de investigação e universidades [4].

Estas organizações encontram-se envolvidas em dois dos maiores projetos em desenvolvimento a nível europeu, designadamente o:

- **C-Roads** – tem como propósito conseguir implementar serviços interoperáveis transfronteiriços, referentes aos Sistemas de Transporte Inteligente Cooperativo (C-ITS), no transporte rodoviário dos diferentes estados-membros Europeus [28];
- **C-Streets** – cujo objetivo consiste na implementação de pilotos, no âmbito dos serviços C-ITS, em inúmeras áreas urbanas que suportam a rede transeuropeia de transportes, permitindo a continuidade do projeto iniciado pelo *C-Roads* [29].

Para além dos projetos mencionados, projetos esses de implementação no terreno da tecnologia ITS-G5, encontram-se em desenvolvimento projetos de investigação, tais como:

- **Ensemble** – tem como meta o desenvolvimento e a definição de um *standard* ITS, capaz de gerir, controlar e sincronizar a circulação de um conjunto de camiões de marcas distintas;
- **Imagine** – tem como objetivo a criação de uma norma que apoie a coordenação de manobras entre veículos.

Capítulo 3: Especificação e Desenvolvimento da Ferramenta

Neste capítulo serão apresentadas as diversas componentes que compõem a arquitetura da aplicação elaborada no âmbito desta dissertação com o propósito de compreender qual o número mínimo de RSU necessários a implementar numa estrada.

No que se refere à arquitetura da ferramenta de *software* gerada, esta encontra-se assente num conjunto de modelos, cada um desempenhando uma função específica. Esses modelos pretendem simular determinadas características relativas ao meio rodoviário e dos equipamentos utilizados nos ITS, nomeadamente os OBU e os RSU.

Ao longo do presente capítulo serão abordados 4 modelos, que definirão os primeiros 4 subcapítulos do mesmo, designadamente: o modelo rádio; o modelo de tráfego rodoviário; o modelo de tráfego de dados do OBU; o modelo de tráfego de dados do RSU.

No primeiro modelo, será explanado como se estima o raio de cobertura do RSU. No modelo referente ao tráfego rodoviário será descrito como se estipula o volume real de tráfego automóvel nas estradas. No modelo seguinte, será definido como se obtém o tráfego de dados gerado por OBU e pelo conjunto de veículos presentes numa estrada. No quarto, efetuar-se-á uma demonstração do modo como se determinam características, tais como, a capacidade média oferecida pelo RSU em cada canal e a sua eficiência espectral, sendo, também, apresentada a maneira como o tráfego de dados suportado e gerado é calculado para este dispositivo.

De seguida, será apontado mais um subcapítulo alusivo à metodologia de planeamento, em que se percecionará a quantidade de infraestruturas a implementar ao longo das faixas de rodagem, com base nos modelos anteriores.

Por fim, serão ainda apresentados os últimos 2 subcapítulos, designadamente: a arquitetura da ferramenta; ferramenta desenvolvida.

3.1 MODELO RÁDIO

O modelo rádio tem como objetivo permitir a determinação do raio de cobertura do RSU para um certo cenário de teste. Este valor é obtido através de um conjunto de pontos, como apresentado de seguida.

- **Modelo de Propagação**

O primeiro passo para determinar o raio de cobertura de um RSU passa pela seleção de um modelo de propagação adequado que permita obter a variação da atenuação do sinal em função da distância (*Path-Loss*), tendo sido para o efeito escolhido o modelo de propagação ETSI TR 138 901 [30].

A Tabela 3.1 identifica as várias variáveis necessárias para o cálculo da atenuação de propagação através do modelo selecionado.

Tabela 3.1 – Variáveis do Modelo de Propagação

Variáveis	Descrição
Ambiente	Rural ou Urbano (<i>Urban Street-Canyon</i>)
Localização	Em linha de vista (LOS) ou não (NLOS)
f_c	Frequência central do canal [GHz]
h_{BS}	Altura do RSU [m]
h_{UT}	Altura do OBU [m]
h	Altura média dos edifícios locais [m]
w	Largura média das ruas locais [m]
d	Distância ao RSU [m]
L_p	<i>Path-Loss</i> médio [dB]

Previamente à apresentação das equações necessárias para determinar o *Path-Loss* médio é necessário compreender como se calcula a distância entre o RSU e o OBU. Este valor é determinado segundo a norma ETSI TR 138 901, através de um conjunto de distâncias e alturas como especificado na Figura 3.1.

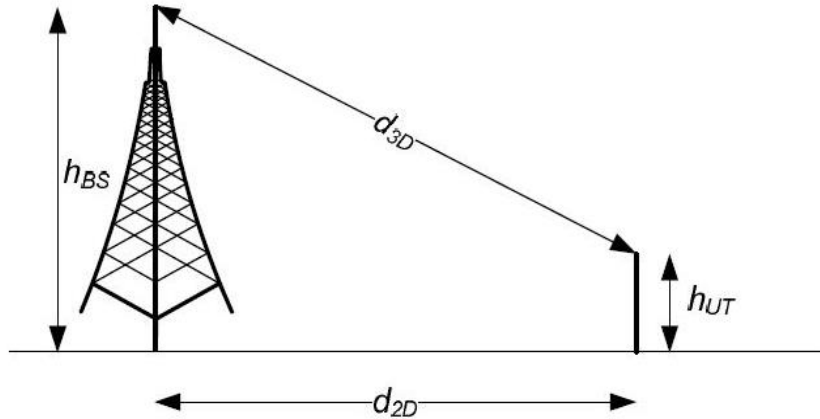


Figura 3.1 – Definição das distâncias d_{2D} e d_{3D} (extraído de [30]).

O parâmetro d_{3D} , apresentado na Figura 3.1, corresponde à distância tridimensional entre o RSU e o OBU, e encontra-se representado pela equação (3.1):

$$d_{3D} = \sqrt{(d_{2D})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2} \quad (3.1)$$

A distância d_{3D} é obtida através do cálculo da distância entre o RSU, que equivale à estação base ilustrada na Figura 3.1, e o OBU, que corresponde ao terminal do utilizador presente na mesma figura, denominada de d_{2D} , assim como da altura a que se encontram ambos os equipamentos.

Após se compreender o modo como a distância entre os diferentes equipamentos ITS se calcula, revela-se pertinente reconhecer os ambientes de propagação em que esta norma pode operar, uma vez que, o tipo de ambiente de propagação pode originar diferentes valores de *Path-Loss* em função da distância.

Ambiente Rural

A propagação do sinal em ambiente rural ocorre geralmente em ambiente aberto, com poucos obstáculos e em LOS. Estas características enquadram-se com as autoestradas, ambiente considerado relevante no que se refere ao projeto C-Streets.

As equações presentes no relatório técnico ETSI TR 138 901 para além do tipo de ambiente também têm em consideração se a antena do OBU se encontra ou não em linha de vista com a antena do RSU. Deste modo, foram utilizadas as seguintes equações, descritas nas Tabela 3.2 e 3.3:

- Para LOS:

Tabela 3.2 – Modelo de propagação do ambiente rural em LOS

Path-Loss	Shadow Fading std
$PL_{RMA-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10km \end{cases}$ <p>Nota: $d_{BP} = 2\pi h_{BS} h_{UT} f_c / c$</p> $PL_1 = 20 \log_{10}(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0.03h^{1.72}, 10) \log_{10}(d_{3D}) - \min(0.044h^{1.72}, 14.77) + 0.002 \log_{10}(h) d_{3D}$ $PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40 \log_{10}(d_{3D}/d_{BP})$	$\sigma_{SF} = 4$ $\sigma_{SF} = 6$

- Para NLOS:

Tabela 3.3 – Modelo de propagação do ambiente rural em NLOS

Path-Loss	Shadow Fading std
$PL_{RMA-NLOS} = \max(PL_{RMA-LOS}, PL'_{RMA-NLOS})$ <p>para $10m \leq d_{2D} \leq 5km$</p> $PL'_{RMA-NLOS} = 161.04 - 7.1 \log_{10}(W) + 7.5 \log_{10}(h) - (24.37 - 3.7(h/h_{BS})^2) \log_{10}(h_{BS}) + (43.42 - 3.1 \log_{10}(h_{BS})) (\log_{10}(d_{3D}) - 3) + 20 \log_{10}(f_c) - (3.2 (\log_{10}(11.75 h_{UT}))^2 - 4.97)$	$\sigma_{SF} = 8$

Ambiente Urbano

A propagação do sinal em ambiente urbano, mais concretamente num contexto de *Urban Street Canyon*, insere-se, tal como em ambiente rural, no âmbito do projeto C-Streets. As equações relativas a este tipo de ambiente, tanto em LOS como em NLOS, encontram-se descritas na norma ETSI, mencionada ao longo deste capítulo, estando contidas nas Tabela 3.4 e 3.5:

- Para LOS:

Tabela 3.4 – Modelo de propagação do ambiente urbano em LOS

<i>Path-Loss</i>	<i>Shadow Fading std</i>
$PL_{UMi-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10m \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5km \end{cases}$ <p>Nota: $d'_{BP} = 4 h'_{BS} h'_{UT} f_c / c$ $h'_{BS} = h_{BS} - h_E$ $h'_{UT} = h_{UT} - h_E$</p> $PL_1 = 32.4 + 21 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)$ $PL_2 = 32.4 + 40 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c) - 9.5 \log_{10}((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4$

- Para NLOS:

Tabela 3.5 - Modelo de propagação do ambiente urbano em NLOS

<i>Path-Loss</i>	<i>Shadow Fading std</i>
$PL_{UMi-NLOS} = \max(PL_{UMi-LOS}, PL'_{UMi-NLOS})$ <p>para $10m \leq d_{2D} \leq 5km$</p> $PL'_{UMi-NLOS} = 35.3 \log_{10}(d_{3D}) + 22.4 + 21.3 \log_{10}(f_c) - 0.3(h_{UT} - 1.5)$	$\sigma_{SF} = 7.82$

• Margens Adicionais

Com vista na obtenção de um valor aproximado das perdas totais existentes nas comunicações V2X serão consideradas as perdas resultantes da atenuação de propagação, mencionadas no subcapítulo anterior, e algumas margens de atenuação adicionais, nomeadamente:

- X_σ – Representa o *Shadow Fading Factor*, que corresponde a uma margem de desvanecimento adicional, acrescentada ao valor médio obtido de *Path-Loss*, sendo esta obtida através da equação (3.2):

$$X_{\sigma[\text{dB}]} = C(P\%) * \sigma_{[\text{dB}]} \quad (3.2)$$

Das variáveis presentes na fórmula, $C(P\%)$ corresponde a um fator indicativo da probabilidade com que se pretende calcular esta margem, sendo este obtido a partir do valor percentual considerado na Distribuição Normal. A componente σ , por sua vez, representa o desvio padrão e este difere consoante o tipo de ambiente e localização escolhido, como é possível verificar ao longo das Tabelas 3.2 a 3.5, de realçar que os valores de desvio padrão identificados resultam também da norma ETSI 138 901;

- I_M – Refere-se à margem de interferência presente nas comunicações V2X;
- L_{OLOS} – Diz respeito à obstrução do sinal em LOS causada pelos veículos, tanto de forma total como parcial.

As perdas totais existentes nas comunicações V2X, que incluem as perdas adicionais supracitadas, podem variar em função de certas características como, por exemplo, a localização da antena do OBU no veículo, podendo esta encontrar-se no topo ou no interior do mesmo.

A distinção das perdas totais existentes nestes dois casos encontra-se explicitada de seguida:

Caso 1: Posição da antena no topo do veículo

O cálculo das perdas totais existentes, L , tendo por base a colocação da antena do OBU no topo do veículo resulta do somatório da perda de atenuação de propagação, L_P , definida no ponto anterior, com as perdas adicionais mencionadas no decorrer deste ponto, sendo acrescentada, similarmente, a perda relativa à atenuação causada pelo cabo que liga a antena ao OBU, L_{Cabo} , perfazendo a equação (3.3):

$$L_{[dB]} = L_{P[dB]} + L_{OLOSV[dB]} + L_{Cabo[dB]} + X_{\sigma[dB]} + I_{M[dB]} \quad (3.3)$$

Caso 2: Posição da antena no interior do veículo

Neste caso, a única perda a adicionar ao cálculo das perdas totais do sinal, corresponde à perda causada pela penetração do sinal no veículo, L_{PP} . A equação (3.4), apresentada de seguida, contempla o total das perdas consideradas:

$$L_{[dB]} = L_{P[dB]} + L_{OLOSV[dB]} + L_{PP[dB]} + X_{\sigma[dB]} + I_{M[dB]} \quad (3.4)$$

• **Fórmula de Friis**

Após a previsão de um valor correspondente às perdas totais presentes no meio rodoviário, sucede-se o cálculo da potência recebida, podendo este ser determinado através da aplicação da Fórmula de Friis. Esta fórmula combina as diferentes perdas e ganhos do caminho rádio, entre o emissor e o recetor, como expresso na equação (3.5):

$$P_{R[dBm]} = P_{E[dBm]} + G_{E[dBi]} + G_{R[dBi]} - L_{[dB]} \quad (3.5)$$

As variáveis presentes na equação encontram-se definidas na Tabela 3.6, apresentada de seguida.

Tabela 3.6 - Variáveis relativas à Fórmula de Friis

Variáveis	Descrição
P_E	Potência de emissão do RSU
G_E	Ganho da antena de emissão
G_R	Ganho da antena de receção
L	Perdas do Sinal
P_R	Potência de receção do OBU

Conhecendo a potência recebida em função da distância e os limites mínimos de sinal associados às diferentes modulações ITS, definidos na norma ETSI 302 663 V1.3.0, torna-se possível estimar o raio de cobertura das diferentes modulações ITS, bem como o raio de cobertura do RSU, quando considerada a modulação BPSK.

• Relação Sinal - Ruído

No decorrer deste ponto proceder-se-á à explicação de como se determina o valor da relação Sinal-Ruído, também denominada por SNR, ao longo do espaço. Este pode ser obtido tendo em conta a potência de receção em função da distância e o ruído a que o sinal se encontra sujeito, aplicando a equação (3.6):

$$SNR_{[dB]} = P_{R[dBm]} - P_{Ruído[dBm]} \quad (3.6)$$

As variáveis que compõem a fórmula (3.6) encontram-se especificadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Variáveis relativas à SNR

Variáveis	Descrição
$P_{Ruído}$	Potência do ruído
P_R	Potência recebida
SNR	Relação Sinal-Ruído

Para obter o valor da potência do ruído, necessário para o cálculo da SNR, é fundamental conhecer a largura de banda dos canais ITS-G5 e aplicar a equação (3.7):

$$P_{Ruído_{[dBm]}} = -174 + 10 * \log_{10}(LB_c) \quad (3.7)$$

3.2 MODELO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO

3.2.1 Capacidade da Via

Com vista na obtenção de um valor aproximado do tráfego de dados gerado pelo conjunto de OBU, presentes numa determinada estrada, ou parte dela, revela-se necessário, em primeiro lugar, determinar a capacidade da mesma relativamente ao número máximo de veículos que nela podem circular. Para tal, é preciso ter em conta certos aspetos como o comprimento da estrada, a dimensão dos veículos, a distância de segurança entre veículos e o número de faixas de estrada, para que o valor resultante da capacidade da via seja o mais próximo possível da realidade.

A equação (3.8) apresenta as componentes referidas e a forma como estas se relacionam com o propósito de estimar o valor referente à capacidade da via. Estas componentes encontram-se descritas na Tabela 3.8.

$$C_{[n.º \text{ de veículos}]} = \frac{L_R_{[m]}}{(L_V_{[m]} + d_{EV_{[m]}})} * T \quad (3.8)$$

Tabela 3.8 - Variáveis relativas à Capacidade da Via

Variáveis	Descrição
L_R	Diâmetro de cobertura do RSU
L_V	Comprimento médio dos veículos
d_{EV}	Distância de segurança entre veículos
T	Número de faixas da estrada
C	Capacidade da via

3.2.2 Volume de Tráfego Automóvel

O volume de tráfego automóvel representa a quantidade de veículos que uma estrada pode conter para uma certa taxa de ocupação da capacidade da via, podendo ser determinado através da aplicação da equação (3.9). As variáveis presentes nesta equação encontram-se apresentadas na Tabela 3.9.

$$V_{[n.º \text{ de veículos}]} = C_{[n.º \text{ de veículos}]} * R \quad (3.9)$$

Tabela 3.9 - Variáveis associadas ao volume real do tráfego da via

Variáveis	Descrição
C	Capacidade da via
R	Taxa de ocupação da via
V	Volume Real de Tráfego da via

3.3 MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS DO OBU

3.3.1 Tráfego de Dados Gerado por Tipo de Mensagem

A norma ITS-G5 é composta por vários tipos de mensagens que suportam as comunicações V2X, sendo estas aplicadas a um conjunto de *use-cases* específico, como destacado no subcapítulo 2.3.2. Associado a cada tipo de mensagem encontra-se definida uma dimensão do pacote, assim como a periodicidade de transmissão do mesmo, características estas essenciais para que se consiga alcançar o valor do tráfego de dados gerado para um dado tipo de mensagem.

É, portanto, possível obter o valor do tráfego de dados gerado para determinado tipo de mensagem ITS-G5, através da implementação da equação (3.10):

$$M_{R[\text{bytes/s}]} = L_{MP[\text{bytes}]} * T_{X[\text{mensagens/s}]} \quad (3.10)$$

As variáveis constituintes da equação são exibidas na Tabela 3.10, tal como uma breve definição das mesmas.

Tabela 3.10 - Variáveis relativas ao tráfego de dados gerado por tipo de mensagem

Variáveis	Descrição
L_{MP}	Dimensão do pacote associada a determinado tipo de mensagem ITS-G5
T_X	Número de pacotes transmitidos, por segundo, para determinado tipo de mensagem ITS-G5
M_R	Tráfego de dados gerado, por segundo, para certo tipo de mensagem ITS-G5

3.3.2 Tráfego de dados gerado por veículos

Com o objetivo de quantificar o tráfego de dados total gerado pelo conjunto de veículos presentes na zona de cobertura do RSU é necessário conhecer os diferentes perfis de tráfego de dados existentes, ou seja, determinar quais os tipos de mensagens V2X utilizados, assim como perceber a percentagem de veículos, U_p , pertencentes ao volume real de tráfego automóvel, V , que os utiliza. A equação (3.11), descreve como se determina este valor.

$$T_{R[\text{Mbps}]} = \sum_{i=0}^n \left(M_{R[\text{Mbps}]}(i) * V_{[\text{n.º de veículos}]} * U_p(i) \right) \quad (3.11)$$

As diferentes variáveis pertencentes à equação (3.11), encontram-se apresentadas na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Variáveis pertencentes ao tráfego de dados gerado por veículos.

Variáveis	Descrição
M_R	Tráfego de dados gerado, por segundo, para certo tipo de mensagem ITS-G5
V	Volume Real de Tráfego da via
U_p	Percentagem de utilização de um tipo de mensagem
T_R	Tráfego de dados gerado por veículos

3.3.3 Tráfego de dados gerado por OBU

O tráfego de dados gerado por veículos, definido no ponto anterior, permite quantificar o volume de dados gerado pelo conjunto de veículos que se encontrem no interior da zona de cobertura do RSU.

Após a determinação deste valor e sabendo o volume real de tráfego automóvel é possível estimar um valor médio de tráfego de dados gerado por cada OBU, sendo o mesmo calculado a partir da equação (3.12):

$$T_{TOBU[\text{Mbps}]} = \frac{T_{R[\text{Mbps}]}}{V_{[\text{n.º de veículos}]}} \quad (3.12)$$

As variáveis que compõem a equação (3.12) encontram-se descritas, de seguida, na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 - Variáveis pertencentes ao tráfego de dados gerado por OBU

Variáveis	Descrição
T_R	Tráfego de dados gerado por veículos
V	Volume real de tráfego da via
T_{TOBU}	Tráfego de dados gerado por OBU

3.4 MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS DO RSU

3.4.1 Capacidade do canal

O modelo rádio, abordado no subcapítulo 3.1, teve como finalidade descrever como se obtém o raio e diâmetro de cobertura de um RSU, assim como possibilitar o conhecimento das distâncias de cobertura dos vários tipos de modulações da norma ITS-G5.

Tendo por base as distâncias que cada modulação consegue cobrir e o débito dessas mesmas modulações é possível determinar a capacidade média que cada canal do RSU possui, ou seja, obtém-se o ritmo médio de transmissão suportado por cada canal do RSU.

O ritmo de transmissão referido pode ser determinado matematicamente através da equação (3.13):

$$RSU_{AC[\text{Mbps}]} = \frac{\sum(M_{L[\text{m}]} * T_{R[\text{Mbps}]})}{\sum M_{L[\text{m}]}} \quad (3.13)$$

Na Tabela 3.13 encontram-se descritas as variáveis que compõem a equação (3.13).

Tabela 3.13 - Variáveis relativas à Capacidade do Canal

Variáveis	Descrição
M_L	Limites de distância das várias modulações ITS-G5
T_R	<i>Bit-Rate</i> associado a cada modulação ITS-G5
RSU_{AC}	Ritmo de transmissão médio suportado por cada canal do RSU

3.4.2 Eficiência Espectral do Canal

Através da obtenção do ritmo de transmissão médio suportado por cada canal do RSU é possível calcular o número de *bits*, por segundo, que se consegue transmitir por cada *hertz* pertencente à largura de banda de um canal ITS-G5, ou seja, é possível obter o valor médio da eficiência espectral para um canal ITS. Este valor pode determinar-se a partir da aplicação da equação (3.14):

$$S_E_{[\text{bps/Hz}]} = \frac{RSU_{AC}[\text{Mbps}]}{LB_C[\text{MHz}]} \quad (3.14)$$

A definição das variáveis presentes na equação encontra-se disposta na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Variáveis relativas à Eficiência Espectral do Canal

Variáveis	Descrição
RSU_{AC}	Ritmo de transmissão médio suportado por cada canal do RSU
LB_C	Largura de banda dos canais ITS-G5
S_E	Eficiência espectral média de um canal ITS-G5

3.4.3 Tráfego de dados suportado

O tráfego de dados médio suportado pelo RSU pode ser obtido a partir da relação entre a capacidade média do canal, calculada no subcapítulo 3.4.1, e o número de canais ITS associados à Segurança, Eficiência e Gestão do tráfego rodoviário, como é possível observar pela equação (3.15):

$$RSU_{ADT}[\text{Mbps}] = RSU_{AC}[\text{Mbps}] * N_C \quad (3.15)$$

A equação apresenta diversas variáveis que se encontram definidas na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Variáveis relativas ao tráfego de dados suportado pelo RSU

Variáveis	Descrição
RSU_{AC}	Ritmo de transmissão médio suportado por cada canal do RSU
N_C	Número de canais ITS
RSU_{ADT}	Tráfego médio de dados suportado pelo RSU

3.4.4 Tráfego de dados gerado pelo RSU

Um dispositivo como o RSU, dependendo da sua localização e propósito, pode transmitir certos tipos de mensagem em detrimento de outros.

Assim sendo, o cálculo do valor aproximado de tráfego de dados gerado pelo RSU (T_{TRSU}) pode ser estimado através do somatório dos diferentes tráfegos de dados gerados pelos tipos de mensagem que o mesmo transmite, como é possível observar pela equação (3.16):

$$T_{TRSU_{[Mbps]}} = \sum_{i=0}^n M_{R_{[Mbps]}}(i) \quad (3.16)$$

3.5 METODOLOGIA DE PLANEAMENTO

Os modelos apresentados previamente têm como propósito fornecer diferentes valores indicativos do tráfego de dados gerado e suportado pelos diferentes equipamentos ITS e do diâmetro de cobertura alcançado por um RSU, dados esses considerados relevantes para que se consiga determinar o número de RSU necessário a implementar por quilómetro. Este processo encontra-se definido nos seguintes pontos:

I. Cálculo do número de RSU tendo por base a vertente da cobertura da rede

Depois de calculada a potência recebida, em função da distância, e conhecido o diâmetro de cobertura, L_R , que corresponde a duas vezes o raio de cobertura, que um RSU consegue cobrir perante determinado cenário de teste é possível obter-se o número de RSU necessário por km, sendo o mesmo calculado a partir da equação (3.17):

$$N_{RSUs/km} = \frac{1000 \text{ m}}{L_{R[m]}} \quad (3.17)$$

II. Cálculo do número de RSU tendo por base a vertente da capacidade da rede

O cálculo do número de RSU associado à vertente da capacidade da rede é realizado do seguinte modo:

- Primeiramente, é identificado o tráfego de dados gerado e suportado nas bandas ITS-G5A e ITS-G5B, tendo em conta o diâmetro de cobertura calculado a partir do modelo rádio;
- De seguida, é realizada a comparação entre os tráfegos mencionados, nas diferentes bandas ITS, sendo estimado o número mínimo de RSU necessário por banda, através da aplicação da equação (3.18):

$$N_{RSUs} = \frac{T_{TRSU[\text{Mbps}]} + T_{R[\text{Mbps}]}}{N_C * RSU_{AC[\text{Mbps}]}} \quad (3.18)$$

- O próximo passo consiste em identificar, a partir dos resultados obtidos da aplicação da equação (3.18), qual das bandas apresenta um número de RSU mais elevado, sendo este considerado como o valor mínimo de RSU a implementar na região relativa ao diâmetro de cobertura do RSU;
- Por fim, é necessária a utilização de uma regra de três simples para que se consiga determinar por km, qual o número de RSU a aplicar na vertente relativa à capacidade da rede. Esta relação encontra-se espelhada na equação (3.19):

$$N_{RSUs/km} = \frac{1000 \text{ m} * N_{RSUs}}{L_{R[m]}} \quad (3.19)$$

III. Identificação do número de RSU mínimo a aplicar por km e qual a vertente delimitadora

Das vertentes apresentadas nos pontos anteriores aquela que irá definir o número mínimo de RSU a aplicar por km corresponde à vertente em que o valor obtido é maior.

3.6 ARQUITETURA DA FERRAMENTA

A arquitetura da ferramenta de *software* desenvolvida nesta dissertação assenta nos vários modelos apresentados ao longo dos subcapítulos anteriores, bem como nas relações existentes entre os mesmos.

Neste subcapítulo será apresentado um conjunto de diagramas de blocos, associados aos diferentes modelos criados para a obtenção do número de RSU a implementar por km.

- **Modelo Rádio**

O modelo rádio é composto pelas vertentes Modelo de Propagação, Margens Adicionais, Fórmula de Friis e SNR, como indicado no subcapítulo 3.1, que permitem a determinação do raio e conseqüente diâmetro de cobertura do RSU, L_R , bem como identificar a região de cobertura pertencente ao raio de cobertura do RSU em que cada modulação ITS é predominante em relação às restantes, M_L .

A Figura 3.2 ilustra o diagrama de blocos associado ao modelo rádio.

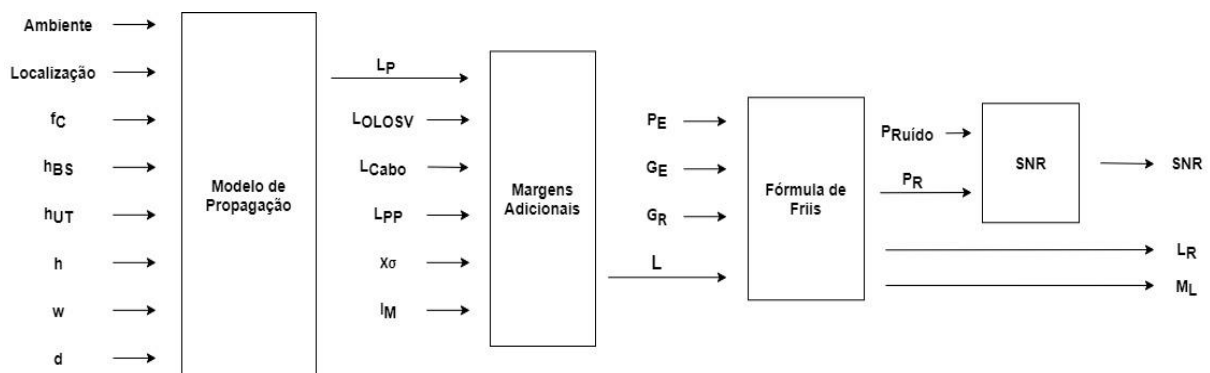


Figura 3.2 - Diagrama de blocos do modelo rádio

- **Modelo de Tráfego Rodoviário**

Depois de determinado o diâmetro de cobertura do RSU, L_R , a partir do modelo rádio, é possível estimar a capacidade da via, C , e o volume real de tráfego automóvel, V , necessários para o cálculo do tráfego de dados gerado pelo conjunto de veículos. A Figura 3.3 esboça de forma esquemática a relação entre as diferentes variáveis e componentes presentes no modelo.

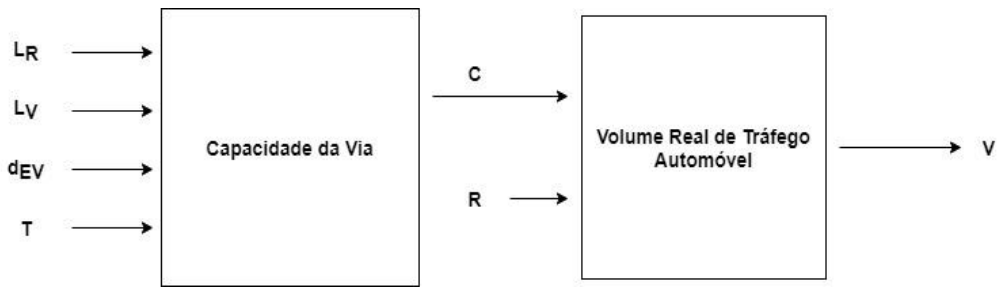


Figura 3.3 - Diagrama de blocos do modelo de tráfego rodoviário

- **Modelo de tráfego de dados do OBU**

O diagrama de blocos apresentado na Figura 3.4, ilustra como se obtém o tráfego de dados gerado por OBU, T_{OBU} , assim como o tráfego de dados gerado pelo conjunto de veículos numa estrada para uma certa taxa de ocupação, T_R .

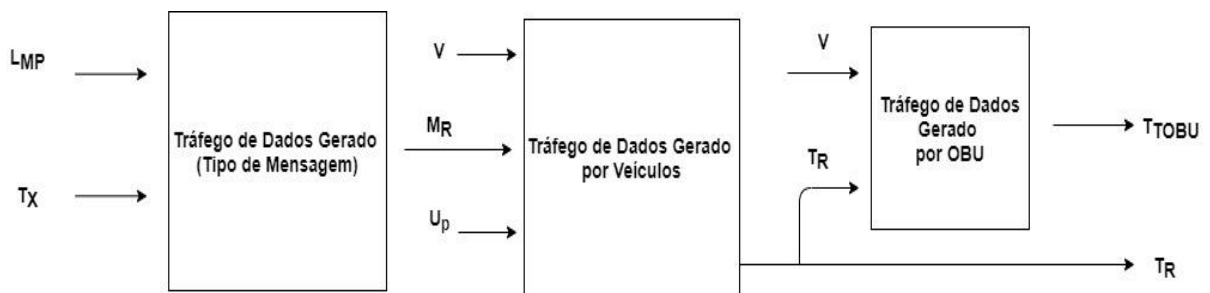


Figura 3.4 - Diagrama de blocos do modelo de tráfego de dados do OBU

- **Modelo de tráfego de dados do RSU**

Na Figura 3.5 encontram-se definidos os diferentes blocos associados ao modelo de tráfego de dados do RSU. Este modelo possibilita a obtenção do tráfego de dados suportado pelo RSU, RSU_{ADT} , na região de cobertura alcançada a partir do modelo rádio, assim como do tráfego de dados gerado pelo RSU nessa mesma região, T_{TRSU} .

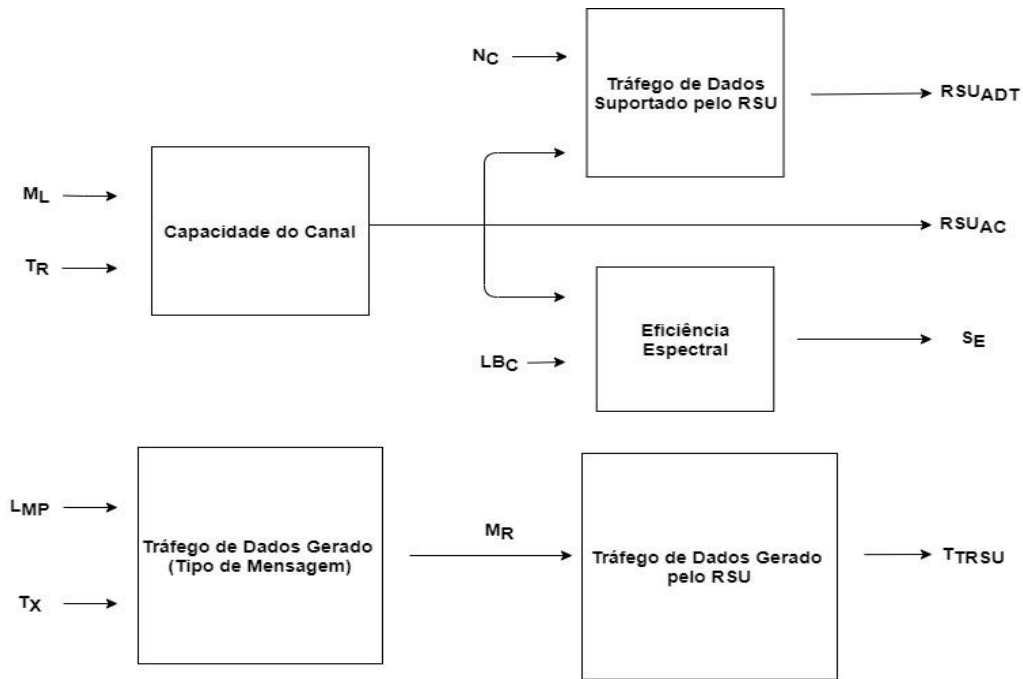


Figura 3.5 - Diagrama de blocos do modelo de tráfego de dados do RSU

- **Metodologia de Planeamento**

O bloco associado à metodologia de planeamento, presente na Figura 3.6, permite identificar, através dos resultados alcançados nos modelos referidos nos pontos anteriores, qual o número mínimo de RSU a aplicar por km para garantir o suporte das comunicações V2X.



Figura 3.6 - Bloco relativo à metodologia de planeamento

O conjunto de diagramas de blocos apresentados, no decorrer deste subcapítulo, encontra-se esquematizado no **Anexo A**.

3.7 FERRAMENTA DESENVOLVIDA

A ferramenta desenvolvida para esta dissertação inclui todas as componentes abordadas até ao presente subcapítulo, encontrando-se as mesmas implementadas em quatro interfaces gráficas pertencentes a uma aplicação Matlab.

A primeira interface, intitulada como *Variables*, apresenta as diversas variáveis de *input* necessárias às restantes interfaces, estando estas dispostas na Figura 3.7:

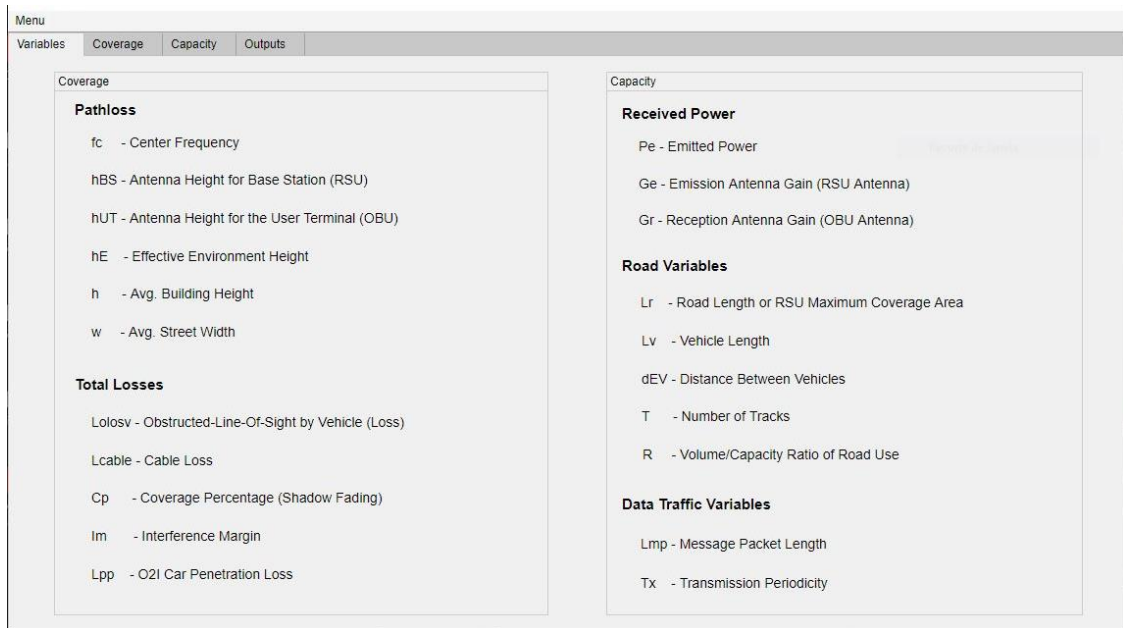


Figura 3.7 - Interface *Variables* da ferramenta desenvolvida

A segunda engloba as várias componentes necessárias para que se consiga determinar a cobertura máxima do RSU, nomeadamente, o *PathLoss*, o *Total Losses*, a *Received Power* e a SNR, como exemplificado na Figura 3.8.

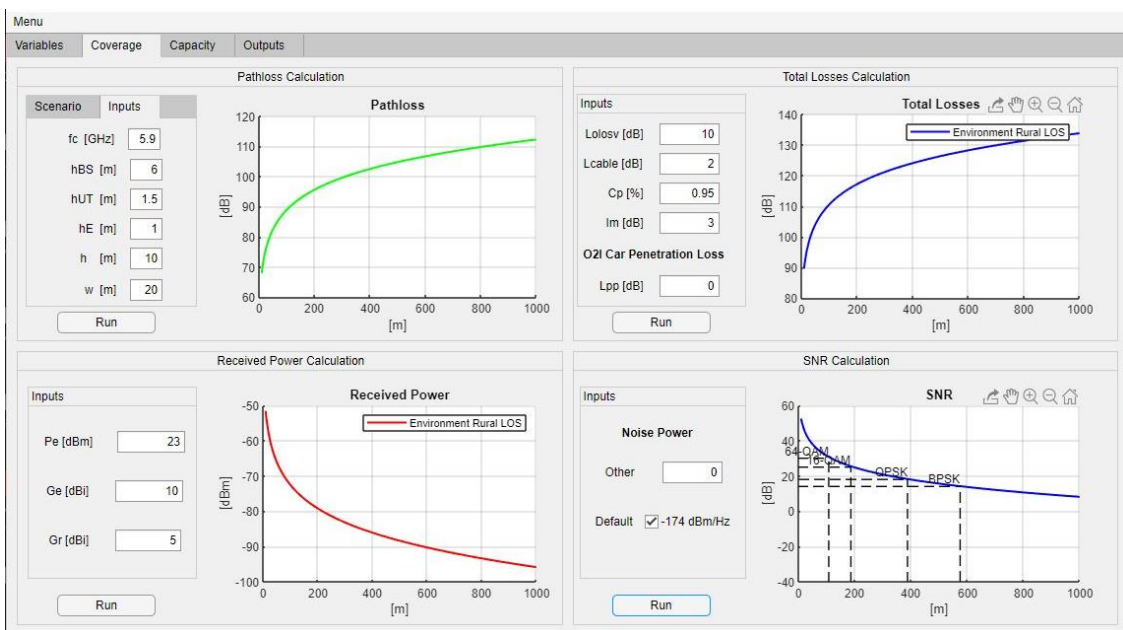


Figura 3.8 - Interface *Coverage* da ferramenta desenvolvida

Na interface seguinte encontram-se exibidas, como é possível observar na Figura 3.9, as diferentes variáveis de entrada que se relacionam com as características relativas: ao meio rodoviário; ao tráfego de dados gerado, tanto pelos RSU como pelos veículos dentro da zona de cobertura do RSU.

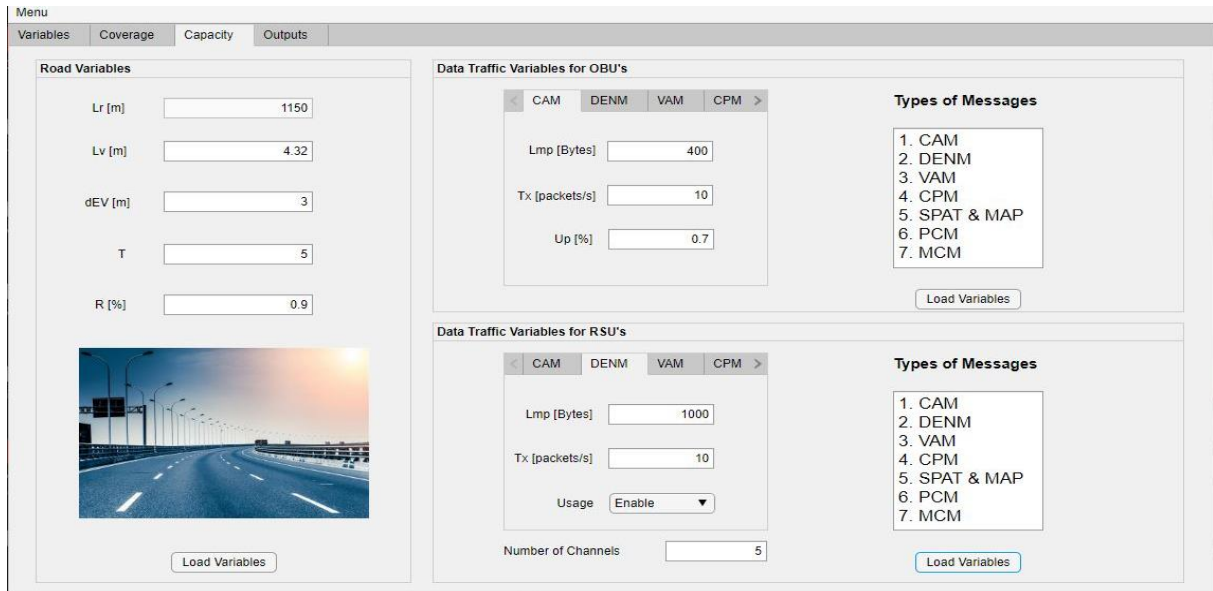


Figura 3.9 - Interface *Capacity* da ferramenta desenvolvida

Por fim, a última interface reúne os outputs necessários para que se possa determinar qual o número de RSU a implementar por quilómetro, estando esta exposta na Figura 3.10.

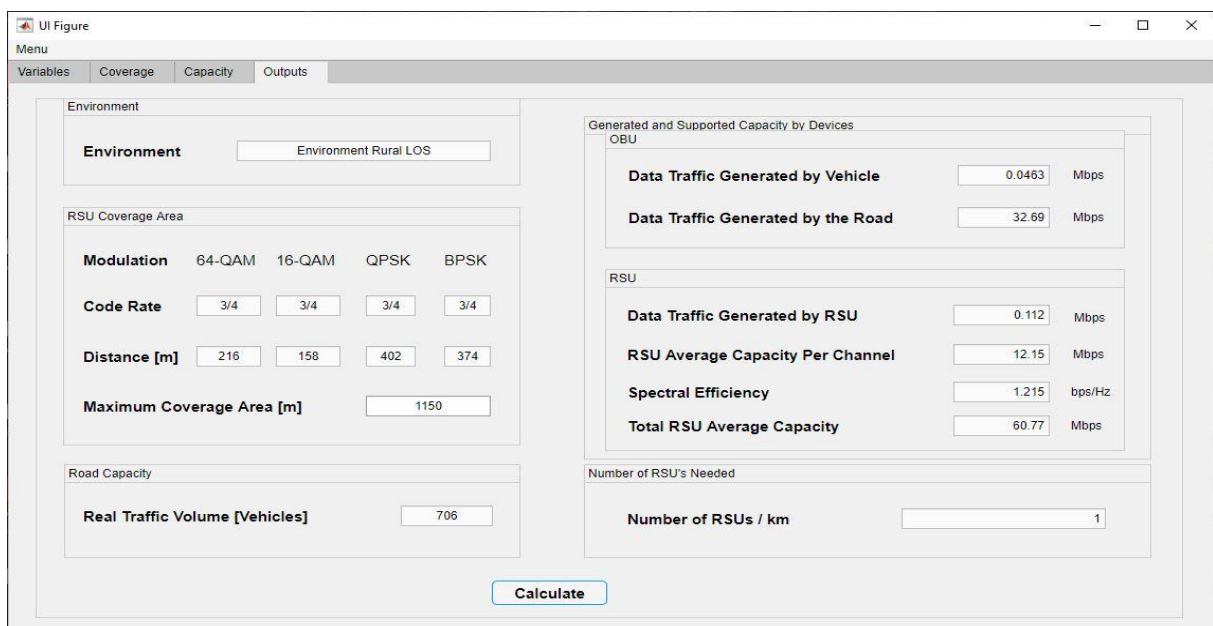


Figura 3.10 - Interface *Outputs* da ferramenta desenvolvida

Capítulo 4: Análise de Resultados

Ao longo do capítulo anterior foram apresentados os diferentes modelos teóricos desenvolvidos e implementados no âmbito desta dissertação. A análise da aplicação dos mesmos, explicitada no decorrer deste capítulo, considera diferentes ambientes de propagação e cenários distintos, com o propósito de identificar o número mínimo de RSU a implementar em cada situação.

Este capítulo encontra-se subdividido em quatro partes: na primeira, será apresentada uma análise da componente de cobertura, sendo identificado o raio e diâmetro de cobertura que um RSU consegue abranger; na segunda será analisada a componente da capacidade que se refere ao tráfego de dados gerado e suportado pelos equipamentos ITS; na terceira parte, será identificada, com base nos pontos anteriores, qual a componente limitadora, bem como o número de RSU adequado a aplicar por km, em cada situação; na última, será analisada a aplicação dos modelos desenvolvidos em cenários reais.

4.1 ANÁLISE DO MODELO RÁDIO

Com o propósito de compreender, mais facilmente, qual a cobertura que um RSU consegue abranger serão apresentados diferentes resultados relativos às seguintes vertentes, pertencentes ao Modelo Rádio, designadamente: Modelo de Propagação; Margens Adicionais; Fórmula de *Friis*; Relação Sinal-Ruído.

O estudo destas componentes será efetuado tendo em conta a variação de alguns parâmetros de entrada como, por exemplo, o tipo de propagação do sinal (em LOS e NLOS) e a posição da antena do OBU no veículo, com o objetivo de compreender as diferenças entre contextos/cenários distintos, como se observará ao longo deste subcapítulo.

4.1.1 Modelo de propagação

A norma ETSI TR 138 901 define o modelo de propagação utilizado, bem como os intervalos de valores recomendados para os *inputs* do modelo, podendo estes ser adaptados ao cenário que se pretende analisar.

Durante o estudo desta vertente será observada a variação da atenuação de propagação em função da distância, tanto para o ambiente rural como para o urbano, encontrando-se os valores das variáveis de entrada, selecionadas para o modelo, presentes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Variáveis de entrada do Modelo de Propagação do Sinal

Variáveis	Ambiente Rural [m]	Ambiente Urbano [m]
h_{BS}	6	6
h_{UT}	1,5	1,5
h	10	20
w	20	20

Ambiente Rural

Aplicando os valores das variáveis associadas ao ambiente rural, presentes na Tabela 4.1, à ferramenta desenvolvida para esta dissertação obtêm-se as seguintes curvas que se encontram apresentadas na Figura 4.1. Estas representam a atenuação de propagação do sinal em função da distância, tanto para a situação em que o RSU se encontra em LOS com o OBU como para a situação de NLOS entre os equipamentos, como é possível verificar na Figura 4.1.

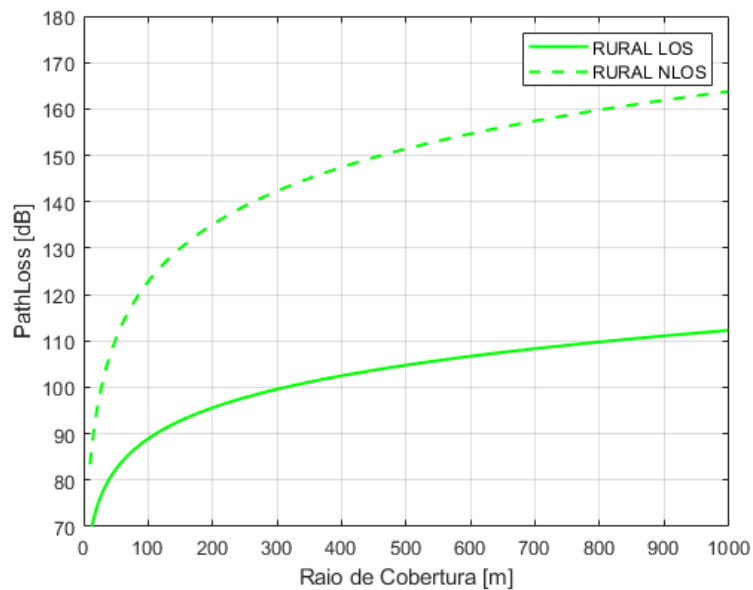


Figura 4.1 - Atenuação de propagação do sinal em ambiente rural LOS e NLOS

Através da observação da Figura 4.1, é possível constatar que a atenuação da propagação do sinal em ambiente rural aumenta em função da distância. Conclui-se, igualmente, que em situações em que os equipamentos, RSU e OBU, se encontrem em NLOS as perdas de percurso são superiores, uma vez que a propagação do sinal se encontra sujeita a outros fatores de atenuação adicionais.

Ambiente Urbano

Aplicando os valores das variáveis associadas ao ambiente urbano obtiveram-se as mesmas conclusões que foram verificadas no ambiente rural, como se denota através da análise da Figura 4.2.

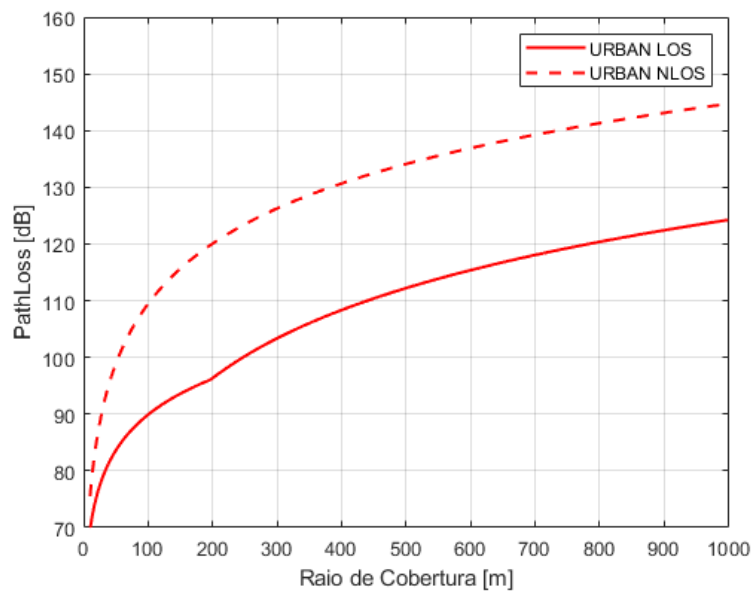


Figura 4.2 - Atenuação de propagação do sinal em ambiente urbano LOS e NLOS

Examinando os gráficos dos diferentes ambientes, rural e urbano, é possível denotar que as perdas de propagação de sinal são superiores quando os equipamentos não se encontram em LOS, visto que a propagação do sinal se encontra sujeita a um maior número de obstáculos.

4.1.2 Margens adicionais

Após a determinação do *Path-Loss*, para o conjunto de cenários anteriores, o próximo passo consiste em aliar a este tipo de perdas as restantes margens de atenuação do sinal, referidas no ponto Margens Adicionais presente no Capítulo 3, de forma a alcançar um valor total de perdas de sinal, sendo, para o efeito, considerados apenas os cenários em que os equipamentos ITS se encontrem em LOS.

O cálculo das perdas totais de sinal, para ambos os ambientes de propagação, varia conforme a posição da antena do OBU no veículo, podendo a mesma encontrar-se no seu interior ou no topo do veículo, sendo para cada posição considerados diferentes tipos de perdas de sinal. Os valores selecionados para as diferentes perdas de sinal, consoante a posição da antena do OBU no veículo, encontram-se representados nos pontos abaixo apresentados:

- Perdas de sinal com a antena do OBU no topo do veículo:

- Perdas causadas pela obstrução do sinal dos veículos, $L_{OLOS\ve}$ = 10 dB [31];
- Atenuação do cabo, L_{Cabo} = 2 dB [32];
- *Shadow Fading Factor*, X_{σ} = 6 dB;
- Margem de interferência, I_M = 3 dB [33];

- Perdas de sinal com a antena do OBU no interior do veículo:

- Perdas causadas pela obstrução do sinal dos veículos, $L_{OLOS\ve}$ = 10 dB [31];
- Perdas de penetração do sinal no veículo, L_{PP} = 9 dB [30];
- *Shadow Fading Factor*, X_{σ} = 6 dB;
- Margem de interferência, I_M = 3 dB [33];

Para que se consigam observar as diferenças existentes entre as perdas totais de sinal, tendo em conta os diferentes ambientes de propagação do sinal, assim como as diferentes posições da antena no veículo, foram realizados quatro testes, (I, II, III e IV), que serão apresentados de seguida na Figura 4.3.

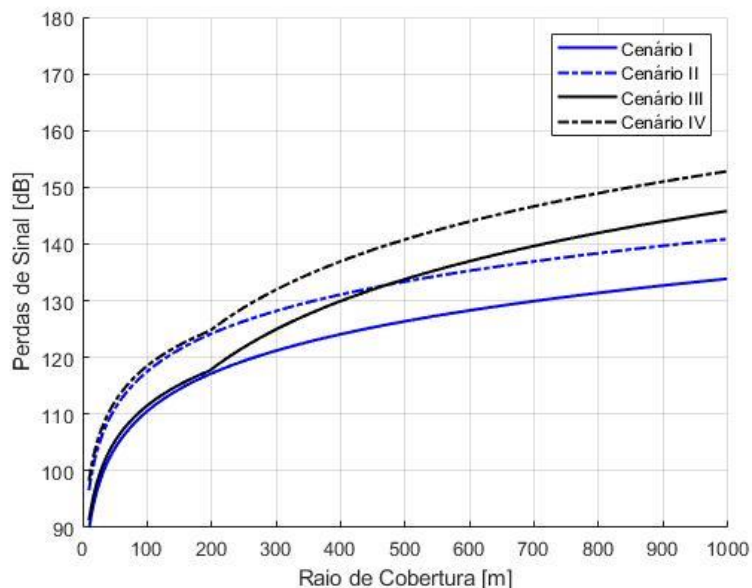


Figura 4.3 - Perdas totais de sinal para os cenários de teste I-IV

Analisando o cenário de teste I, apresentado na Figura 4.3, relativo à propagação do sinal em ambiente rural, em condições de LOS, com a antena do OBU no topo do veículo, foi possível verificar que a curva relativa à atenuação de propagação em ambiente rural em LOS, apresentada na Figura 4.1 do ponto 4.1.1, houve um acréscimo de 21 dB resultante das perdas consideradas para este cenário de teste. Deste acréscimo, 10 dB dizem respeito à obstrução do sinal em LOS causada pelos veículos, 3 dB resultam da margem de interferência considerada nas comunicações V2X, 2 dB correspondem à atenuação do cabo que interliga a antena ao OBU e 6 dB advém do fator de *Shadow Fading Factor* para uma percentagem de cobertura em torno dos 95%.

Realizando o mesmo processo para o cenário de teste II, no mesmo ambiente de propagação e nas mesmas condições de LOS entre equipamentos ITS, mas tendo por base as perdas de sinal com a antena do OBU no interior do veículo, é possível constatar, pela observação da Figura 4.3, que existe um aumento das perdas de sinal, em relação ao teste anterior, quando a antena do OBU se encontra no interior do veículo, isto porque, embora não sejam contabilizadas as perdas do cabo que interliga a antena ao OBU são, por sua vez, consideradas as perdas de penetração do sinal no interior do veículo, o que eleva este tipo de perdas em aproximadamente 7 dB em relação ao que foi verificado no teste I.

O cenário de teste III, presente na Figura 4.3, apresenta as perdas de sinal previstas para o ambiente urbano em condições de LOS entre equipamentos ITS, quando a antena do OBU se

encontra no topo do veículo. Analisando a curva relativa a este cenário de teste, verifica-se um aumento das perdas de sinal em torno dos 21 dB em relação ao valor obtido da atenuação de propagação, tal como constatado para o cenário de teste I, uma vez que as perdas de sinal associadas à colocação da antena do OBU no topo do veículo são as mesmas em ambos os cenários de teste. Porém, é importante realçar que a disparidade existente entre as perdas de sinal obtidas em ambos os testes mencionados se relaciona com a forma como os valores de *Path-Loss* se calculam em cada ambiente de propagação.

Realizando o teste com a antena do OBU no interior do veículo para o ambiente urbano em condições de LOS, cenário de teste IV, verifica-se, pela observação da Figura 4.3, que existe um aumento de 7 dB nas perdas totais do sinal em função da distância em relação aos valores obtidos no teste anterior, tal facto deve-se às perdas consideradas aquando da colocação da antena do OBU no interior do veículo, como supracitado no teste II.

4.1.3 Fórmula de Friis

Após se estimar os valores das perdas totais de sinal em função da distância para os ambientes de propagação seleccionados, tendo em conta fatores como a posição da antena do OBU no veículo, o passo que se segue consiste na determinação da potência recebida em função da distância entre equipamentos.

Para que se obtenham esses valores, através da aplicação da equação (3.5), é necessário primeiramente definir os valores a considerar para certas variáveis como apresentado pelos pontos que se seguem:

- Potência de emissão do RSU, $P_E = 23$ dBm [34];
- Ganho da antena de emissão, $G_E = 10$ dBi [35];
- Ganho da antena de receção, $G_R = 5$ dBi [36].

A potência recebida pelo OBU em função da distância encontra-se apresentada, de seguida, para os diferentes testes estudados, tendo sido a mesma calculada com base nos valores das perdas de sinal obtidos no ponto anterior.

Na Figura 4.4 encontram-se delineados os níveis mínimos de sinal necessários para que se consiga transmitir nas diferentes modulações ITS, presentes na norma ETSI EN 302 663

V.1.3.0 [37], sendo possível através destes estimar o raio de cobertura das diferentes modulações ITS.

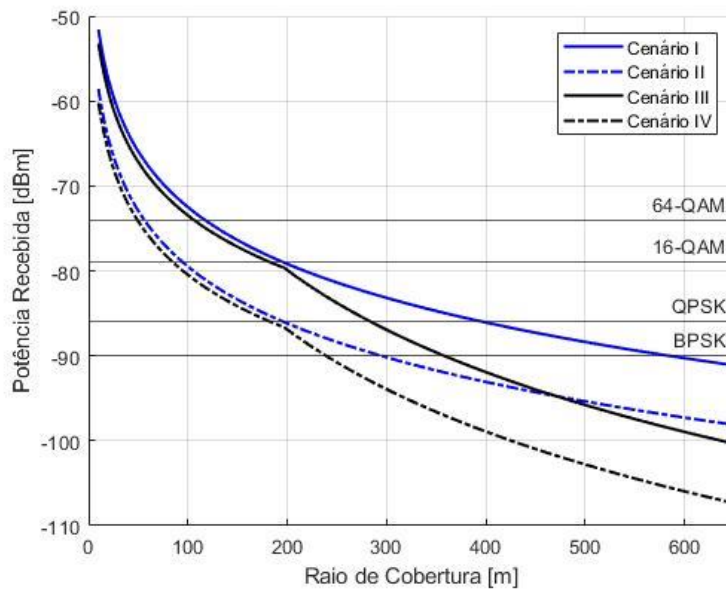


Figura 4.4 - Potência Recebida para os cenários de teste I-IV

O nível mínimo de sinal necessário para que se consiga transmitir as diferentes modulações num canal ITS de 10 MHz encontra-se definida na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Nível de sinal mínimo das diferentes modulações ITS

Modulações	Nível de Sinal Mínimo [dBm]
BPSK	-90
QPSK	-86
16-QAM	-79
64-QAM	-74

No que diz respeito à potência recebida para o cenário de teste I, é possível constatar, pela observação da Figura 4.4, que para o nível de sinal associado à modulação ITS mais baixa, modulação BPSK, se consegue atingir um raio de cobertura por parte do RSU de 575 metros, o que equivale a um diâmetro de cobertura de 1150 metros.

Para além do raio e diâmetro de cobertura resultante da aplicação do nível de sinal associado à modulação BPSK revela-se, também, necessário o conhecimento dos restantes raios de cobertura associados às restantes modulações.

Deste modo, torna-se possível identificar a região do raio de cobertura do RSU em que uma modulação se torna predominante em relação às restantes, conhecimento este que auxiliará na posterior identificação do tráfego de dados suportado pelo RSU.

A Tabela 4.3, identifica o raio de cobertura das diferentes modulações ITS, assim como a região em que cada uma é predominante em relação às restantes dentro do raio de cobertura do RSU.

Tabela 4.3 – Raio de cobertura e região de predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste I

Modulação	Raio de Cobertura [m]	Região Predominante da Modulação [m]
64-QAM	108	108
16-QAM	187	79
QPSK	388	201
BPSK	575	187

Relativamente ao cenário de teste II é possível verificar, na Figura 4.4, que para o mesmo ambiente de propagação utilizado no teste anterior, o raio de cobertura foi reduzido aproximadamente a metade, devido ao aumento das perdas de sinal resultantes da implementação da antena do OBU no interior do veículo.

O raio de cobertura das diferentes modulações e a região em que as mesmas são predominantes, apresentam, naturalmente, a mesma redução, como destacado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Raio de cobertura e região de predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste II

Modulação	Raio de Cobertura [m]	Região Predominante da Modulação [m]
64-QAM	47	47
16-QAM	86	39
QPSK	187	101
BPSK	286	99

O raio de cobertura verificado para o ambiente urbano, em condições de LOS, com a antena do OBU no topo do veículo, cenário de teste III, encontra-se em torno dos 349 metros, como evidenciado na Figura 4.4, sendo o diâmetro de cobertura de aproximadamente 698 metros.

É importante realçar que a diferença de resultados obtida entre este teste e o teste I advém da forma como se calcula o *Path-Loss* para cada ambiente.

A Tabela 4.5, apresenta os diferentes raios de cobertura de cada modulação, bem como a região em que as mesmas se sobrepõem às restantes.

Tabela 4.5 - Raio de cobertura e região predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste III

Modulação	Raio de Cobertura [m]	Região Predominante da Modulação [m]
64-QAM	97	97
16-QAM	174	77
QPSK	275	101
BPSK	349	74

No que diz respeito ao cenário de teste IV foi verificado, a partir da Figura 4.4, que o raio de cobertura que a antena do RSU consegue abranger, equivale a 230 m, o que perfaz um diâmetro alcançado pelo RSU em torno dos 460 m.

A razão, por detrás, desta redução significativa segue a mesma lógica mencionada no cenário de teste II.

Na Tabela 4.6, encontram-se apresentados, similarmente, os raios de cobertura das diferentes modulações, tal como a região em que as mesmas são dominantes.

Tabela 4.6 - Raio de cobertura e região de predominância das diferentes modulações ITS-G5 para o cenário de teste IV

Modulação	Raio de Cobertura [m]	Região Predominante da Modulação [m]
64-QAM	40	40
16-QAM	76	36
QPSK	174	98
BPSK	230	56

Através da observação dos raios de cobertura, patentes nos diferentes cenários de teste considerados, é possível compreender que a potência recebida em função da distância é mais baixa em ambiente urbano, assim como quando a antena do OBU se encontra no interior do veículo, como seria expectável, tendo em conta que a única componente que varia no cálculo deste valor corresponde às perdas totais de sinal, sendo as mesmas mais elevadas neste tipo de cenários de teste.

4.1.4 Relação Sinal-Ruído

Ao longo do ponto 4.1.3 foi possível estimar a potência recebida em função da distância para os diferentes testes analisados.

Sabendo que a largura de banda de um canal ITS equivale a 10 MHz, facilmente se percebe, através da aplicação da equação (3.7), que o valor da potência de ruído, a considerar para este tipo de comunicações, se encontra em torno dos -104 dBm [38].

Conhecendo, tanto os valores da potência recebida em função da distância como o valor da potência do ruído patente neste tipo de comunicações, torna-se possível estimar a SNR em função da distância para os testes analisados no decorrer deste capítulo, sendo aplicado para o efeito a equação (3.6).

A Figura 4.5, esboça as diferentes curvas da relação sinal-ruído relativas aos diferentes cenários de teste considerados até então.

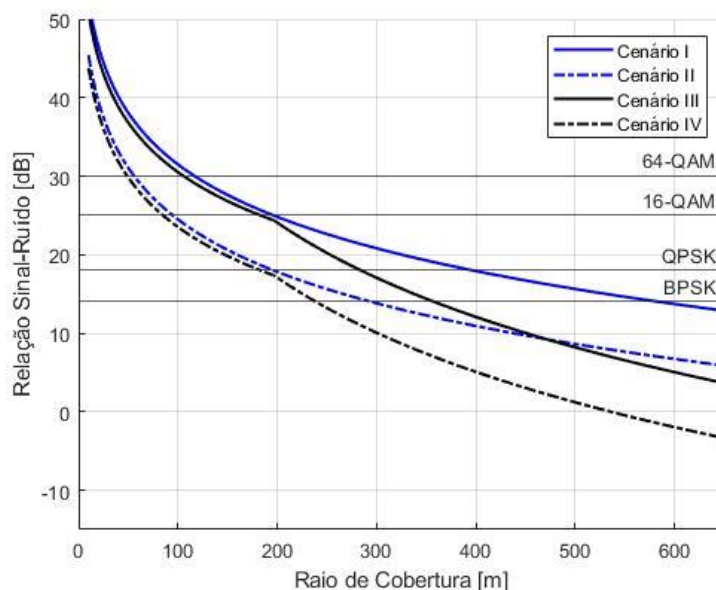


Figura 4.5 - Relação Sinal-Ruído verificada nos cenários de teste I-IV

A partir das curvas de SNR em função da distância, apresentadas para os diferentes testes, verifica-se que a SNR é superior para o ambiente rural, assim como para cenários de teste em que a antena do OBU se encontre no topo do veículo, resultados esses coerentes com aquilo que seria esperado, uma vez que a única componente variável na obtenção da SNR corresponde à potência recebida, calculada no ponto 4.1.3.

De seguida, proceder-se-á à análise das diferentes vertentes que compõem o subcapítulo 4.2, tendo em conta, apenas e só, os testes I e III em que a propagação do sinal é realizada em LOS para ambos os ambientes de propagação.

4.2 ANÁLISE DO MODELO DE TRÁFEGO DE DADOS

No decorrer do presente subcapítulo será analisada a componente da capacidade no que se refere ao tráfego de dados gerado e suportado pelos diferentes equipamentos ITS utilizados no âmbito das comunicações V2X.

Este subcapítulo encontra-se subdividido em dois pontos, sendo: no primeiro, identificado o tráfego de dados suportado pela rede ITS na zona de cobertura do RSU; no segundo, analisadas as características de tráfego rodoviário, definidos os diferentes perfis de tráfego de dados e obtidos os diferentes volumes de tráfegos de dados gerados pelos equipamentos RSU e OBU.

4.2.1 Tráfego de dados suportado

O conhecimento do tráfego de dados médio suportado na região relativa à zona de cobertura do RSU, cobertura essa obtida no subcapítulo 4.1, tem como objetivo identificar o volume de tráfego de dados, resultante das comunicações bidirecionais entre os diferentes equipamentos ITS, que é possível suportar antes de se atingir um estado de rutura.

Para se obter este valor é necessário primeiramente perceber qual a capacidade média de um canal ITS nessa mesma zona de cobertura. A obtenção da capacidade média é conseguida através da aplicação da equação descrita no ponto 3.4.1, sendo a variável M_L correspondente à região de cobertura predominante de cada modulação, calculada para os diferentes testes analisados ao longo do subcapítulo 4.1, e a T_R relativa ao tráfego de dados suportado por cada modulação. Os valores de tráfego de dados suportados pelas várias modulações encontram-se tabelados na norma ETSI EN 302 663 V1.3.0 [37], como ilustrado na Tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Débito suportado pelas diferentes modulações ITS-G5

Modulação	Débito Suportado [Mbps]
64-QAM	27
16-QAM	18
QPSK	9
BPSK	4,5

Através do conhecimento dos valores relativos às variáveis M_L e T_R torna-se possível prever um valor aproximado da capacidade média do canal, para os diferentes testes supracitados no subcapítulo 4.1.

Conhecendo o valor da capacidade média do canal e sabendo que cinco é o número de canais ITS reservado às aplicações de segurança e eficiência, é possível, através da aplicação da equação (3.15), presente no ponto 3.4.3, chegar a um valor aproximado do tráfego médio de dados suportado na zona de cobertura do RSU. A Tabela 4.8, apresenta os valores obtidos para as variáveis enunciadas:

Tabela 4.8 Tráfego de dados médio suportado por canal e pelo RSU na zona de cobertura

Teste	Tráfego de dados médio suportado por canal [Mbps]	Tráfego de dados médio suportado na zona de cobertura do RSU [Mbps]
I	12,15	60,75
III	15,03	75,15

A partir dos resultados obtidos é possível constatar que o cenário de teste III, relativo ao ambiente urbano, apresenta um tráfego de dados médio suportado por canal superior àquele constatado pelo cenário de teste I, isto porque, embora o diâmetro de cobertura do RSU seja inferior em relação ao outro cenário, a região em que as modulações que apresentam um *bit-rate* maior são predominantes é superior em proporção, quando comparadas com as do teste I.

4.2.2 Tráfego de dados gerado

Para se estimar os diferentes valores de tráfego de dados gerado pelos diferentes equipamentos ITS, num certo tipo de cenário, é necessário compreender o tráfego rodoviário existente na zona de cobertura do RSU e conhecer os perfis de tráfego de dados utilizados nessa região.

Nos pontos abaixo apresentados será descrito e definido como se determinam os valores mencionados, para os diferentes cenários de teste estudados, de forma a quantificar um valor de tráfego de dados gerado para os equipamentos referidos.

- **Modelo de tráfego rodoviário**

O modelo de tráfego rodoviário, definido no ponto 3.2, tem como propósito identificar, de forma aproximada, o número de veículos a circular no interior da zona de cobertura do RSU, sendo este valor obtido tendo por base o conhecimento da capacidade da via, assim como, da taxa de ocupação da mesma num determinado momento.

Considerando os diâmetros de cobertura, obtidos no ponto 4.1.3, para os testes I e III, e os valores definidos na Tabela 4.9, para as variáveis L_V , d_{EV} e T , torna-se possível estimar a capacidade da via, através da aplicação da equação presente no ponto 3.2.1.

Tabela 4.9 – Definição dos valores atribuídos às variáveis L_V , d_{EV} e T

Variáveis	Valores Atribuídos
L_V	4,320 m
d_{EV}	3 m
T	5

Conhecendo este valor e definindo um valor de taxa de ocupação da capacidade da via, R , igual a 90%, torna-se possível estimar o volume de tráfego rodoviário para os testes referidos, encontrando-se estes valores dispostos na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Volume de tráfego rodoviário para os cenários de teste I e III

Teste	Volume Real de Tráfego Rodoviário [n.º veículos]
I	706
III	429

O conhecimento do volume real de tráfego automóvel, tendo em conta as variáveis seleccionadas, visa auxiliar a determinação do volume de dados gerado pelo conjunto de OBU presentes na zona de cobertura do RSU, que será estimado posteriormente.

- **Perfis de tráfego de dados**

Para se quantificar o tráfego de dados gerado pelos diferentes equipamentos ITS foram definidos, nesta dissertação, três perfis de tráfego de dados, nomeadamente, perfil A, B e C, sendo, em cada perfil, identificada/o:

- o conjunto de mensagens a utilizar na zona de cobertura de determinado cenário de teste;
- a dimensão do pacote (L_{mp}) de cada tipo de mensagem;
- a taxa de transmissão (T_X) dos diferentes tipos de mensagens;
- a percentagem de utilização dos diferentes tipos de mensagem (U_p), considerando o volume real de tráfego rodoviário obtido para determinado cenário de teste.

Nos perfis de tráfego, abaixo apresentados, os valores das variáveis L_{mp} e T_X ponderados foram extraídos do [25].

- ❖ Perfil A

O perfil A, é o perfil com o menor volume de tráfego de dados gerado, sendo composto, unicamente pelas mensagens ITS, do tipo CAM e DENM, utilizadas pelas aplicações de segurança rodoviária.

A Tabela 4.11 apresenta, para os cenários de teste I e III os valores considerados para as variáveis L_{mp} , T_X e U_p necessárias para que se consiga estimar o volume de tráfego de dados gerado pelos diferentes equipamentos ITS.

Tabela 4.11 – Definição das mensagens inseridas no Perfil A

Tipo de Mensagem	L_{mp} [bytes]	Tx I [Hz]	Tx III [Hz]	U_p
CAM	400	1	3	0,7
DENM	1000	10	10	0,3

Como é possível observar pela Tabela 4.11, a taxa de transmissão dos diferentes tipos de mensagens varia mediante o ambiente de propagação selecionado, o que, por sua vez, se traduzirá num volume de tráfego de dados gerado distinto, situação que se verifica, igualmente, nos perfis B e C.

❖ Perfil B

O segundo perfil de tráfego de dados, perfil B, alia ao conjunto de mensagens presente no perfil A as mensagens do tipo VAM e SPATMAP.

A introdução deste tipo de mensagens visa aumentar o volume de tráfego de dados gerado na zona de cobertura do RSU, volume esse aplicado, tal como no perfil A, aos canais pertencentes ao intervalo de frequências ITS-G5A.

Na Tabela 4.12 encontram-se destacados os valores definidos para as diferentes variáveis necessárias para o cálculo do tráfego de dados gerado pelos equipamentos ITS.

Tabela 4.12 - Definição das mensagens inseridas no Perfil B

Tipo de Mensagem	Lmp [bytes]	Tx I [Hz]	Tx III [Hz]	Up
CAM	400	1	3	0,5
DENM	1000	10	10	0,3
VAM	350	10	1	0,05
SPATMAP	1200	50	10	0,15

❖ Perfil C

O perfil C adiciona ao conjunto de mensagens ITS, presentes no perfil anterior, as mensagens do tipo CPM, PCM e MCM, que visam melhorar a eficiência e gestão do tráfego rodoviário.

A inclusão deste tipo de mensagens aumentará o volume de dados gerado pelos diferentes equipamentos ITS na zona de cobertura do RSU, sendo o tráfego adicional aplicado aos canais pertencentes à banda de frequências ITS-G5B.

Tal como verificado nos perfis anteriores, a Tabela 4.13 identifica os valores das variáveis L_{mp} , T_X e U_P a ter em conta para os diferentes cenários de teste.

Tabela 4.13 - Definição das mensagens inseridas no Perfil C

Tipo de Mensagem	Lmp [bytes]	Tx I [Hz]	Tx III [Hz]	Up
CAM	400	1	3	0,5
DENM	1000	10	10	0,3
VAM	350	10	1	0,05
CPM	1000	1	3	0,3
SPATMAP	1200	50	10	0,15
PCM	400	50	50	0,03
MCM	1000	1	3	0,15

Com o conhecimento das mensagens utilizadas em cada perfil, bem como do número de veículos que as utiliza é possível prever um valor de tráfego de dados gerado pelos diferentes equipamentos, RSU e OBU, para os testes analisados até então.

No que se refere ao cenário de teste I foram obtidos os seguintes valores de tráfego de dados gerado, para os diferentes perfis definidos, como apresentado pela Tabela 4.14:

Tabela 4.14 – Tráfego de dados gerado pelo RSU, OBU e Veículos para o cenário de teste I

Perfil	Tráfego de Dados Gerado por RSU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por OBU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por Veículos [Mbps]	
	ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B
A	0,0832	0	0,02615	0	18,46	0
B	0,5912	0	0,09829	0	69,39	0
C	0,7672	0,176	0,1066	0,00831	75,28	5,89

Relativamente ao teste III, os resultados obtidos, tendo em conta os três perfis analisados, encontram-se explicitados na Tabela 4.15:

Tabela 4.15 Tráfego de dados gerado pelo RSU, OBU e Veículos para o cenário de teste III

Perfil	Tráfego de Dados Gerado por RSU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por OBU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por Veículos [Mbps]	
	ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B
A	0,0896	0	0,03058	0	13,12	0
B	0,1884	0	0,0434	0	18,62	0
C	0,3964	0,208	0,05861	0,01521	25,15	6,53

Em ambos os testes, independentemente do tipo de tráfego de dados gerado, verifica-se um aumento do volume de dados, desde o perfil A até ao C, resultante da aplicação de outros tipos de mensagens ao perfil inicial, ou seja, ao perfil A.

É notório, também, que o tráfego gerado pelo RSU, nos dois testes, difere do obtido pelo OBU, uma vez que, para o cálculo do tráfego de dados gerado pelo RSU é considerado apenas se certo tipo de mensagem é transmitido ou não, enquanto que no caso do OBU, esse valor é alcançado a partir da razão entre o tráfego de dados gerado pelo conjunto de veículos com o volume real de tráfego rodoviário, sendo para o cálculo do volume de tráfego de dados gerado pelo conjunto de veículos equacionada apenas uma percentagem de veículos, pertencente ao volume de tráfego rodoviário obtido, que transmite um determinado tipo de mensagem.

Passando à comparação dos dois testes analisados denota-se a existência de uma diferença entre os valores de tráfego de dados obtidos, resultante dos valores de taxa de transmissão dos diferentes tipos de mensagem que diferem em ambos os cenários de teste.

4.3 PLANEAMENTO

Ao longo do presente capítulo foi realizada uma análise do modelo rádio e do modelo de tráfego de dados com o objetivo de se determinar o diâmetro de cobertura do RSU e o tráfego de dados gerado e suportado pelos diferentes equipamentos ITS.

O conhecimento destes valores tem como propósito permitir a determinação do número de RSU a implementar por km, através da aplicação do raciocínio descrito no subcapítulo 3.5, tanto para a componente relativa à cobertura rádio como para a da capacidade de tráfego de dados.

Após a identificação do número de RSU necessário para cada componente, pertencente a certo cenário de teste, é possível indicar qual o número mínimo de RSU necessário para que as comunicações V2X sejam asseguradas dentro dessa região, sendo este igual à componente com maior número de RSU.

De seguida, será identificado para os diferentes cenários de teste estudados ao longo do subcapítulo anterior, qual o número mínimo de RSU a aplicar.

I. Propagação do sinal em Ambiente Rural em condições de LOS com a antena do OBU no topo do veículo

O presente cenário de teste, estudado ao longo do capítulo, teve como objetivo analisar a propagação do sinal em ambiente rural em condições de LOS com a antena do OBU no topo do veículo.

Considerando os resultados obtidos ao longo dos subcapítulos 4.1 e 4.2, para este cenário de teste, torna-se possível identificar qual o valor mínimo de RSU a aplicar em cada componente, sendo para tal aplicado o raciocínio descrito no ponto 3.5. Deste modo, a Tabela 4.16, esboça para os múltiplos perfis de tráfego de dados definidos, qual o número de RSU a implementar por km, em cada componente.

Tabela 4.16 – Número de RSU a colocar por km para o cenário de teste I considerando os diferentes perfis de tráfego de dados

Perfil	Cobertura [Nrsu/km]	Capacidade [Nrsu/km]	
		ITS-G5A	ITS-G5B
A	1	1	0
B		2	0
C		2	1

Analisando os dados presentes na Tabela 4.16 é possível verificar que:

- No perfil A, ambas as componentes conseguem suportar as comunicações V2X para um diâmetro de cobertura em torno de 1 km, sendo necessário apenas um único RSU;

- No perfil B e C, é preciso implementar pelo menos dois RSU, uma vez que o tráfego de dados gerado pelas aplicações de segurança rodoviária, por parte dos diferentes equipamentos ITS, é superior àquele que os canais ITS-G5A conseguem suportar, sendo esta a razão pela qual a capacidade é a componente limitadora em ambos os casos.

III. Propagação do sinal em Ambiente Urbano em condições de LOS com a antena do OBU no topo do veículo

Aplicando o raciocínio anterior neste cenário de teste, foram obtidos os seguintes resultados discriminados na Tabela 4.17:

Tabela 4.17 - Número de RSU a colocar por km para o cenário de teste III considerando os diferentes perfis de tráfego de dados

Perfil	Cobertura [Nrsu/km]	Capacidade [Nrsu/km]	
		ITS-G5A	ITS-G5B
A	2	1	0
B		1	0
C		1	1

Através da observação da Tabela 4.17, é possível constatar, para o presente cenário de teste, que a componente da cobertura é o seu fator limitador, independentemente do perfil de tráfego utilizado, sendo necessária sempre a implementação de dois RSU por km.

4.4 APLICAÇÃO EM CENÁRIOS REAIS

Ao longo deste subcapítulo a ferramenta desenvolvida será testada simulando dois ambientes rodoviários reais, sendo identificado, para cada um, o número de RSU necessário a aplicar de forma a assegurar as comunicações V2X.

- **Ambiente Rodoviário I:**

Para o ambiente rodoviário I, foi selecionada parte da estrada pertencente à Avenida Marechal Gomes da Costa, situada em Lisboa, mais especificamente o troço da via rápida

que interliga a Rotunda do Relógio (ponto A na Figura 4.6) à Rotunda Expo 98 (ponto B na Figura 4.6), perfazendo um total de 3 km. A Figura 4.6 [39], apresentada de seguida, identifica o cenário de teste considerado.



Figura 4.6 - Ambiente Rodoviário I (extraído de [38])

A Tabela 4.18, apresenta o conjunto de características diferenciadoras deste ambiente rodoviário.

Tabela 4.18 - Características do Ambiente Rodoviário I

Variáveis	Ambiente Rodoviário I
Ambiente	Rural
Localização	LOS
h_{BS}	6 m
h_{UT}	1,5 m
h	12 m
w	24 m
T	6

Considerando os valores definidos, na Tabela 4.18, para as diferentes variáveis, os perfis de tráfego definidos no subcapítulo 4.2.2 e assumindo que as restantes variáveis de entrada da ferramenta desenvolvida apresentam os valores destacados nos pontos 4.1.2 a 4.1.4, foram obtidos os seguintes resultados:

- i. Obteve-se um diâmetro de cobertura em torno dos 1064 m, por parte do RSU;
- ii. Obtiveram-se os valores de tráfego de dados dos diferentes equipamentos ITS presentes na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Tráfego de dados dos diferentes equipamentos ITS para o Ambiente Rodoviário I

Perfil	Volume de tráfego automóvel [nº de veículos]	Tráfego de Dados Gerado por RSU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por OBU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por veículos [Mbps]	
		ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B
A	784	0,0832	0	0,02622	0	20,55	0
B		0,5912	0	0,09861	0	77,31	0
C		0,5912	0,176	0,09861	0,00829	77,31	6,49

Com base nos valores obtidos das componentes de cobertura e capacidade é possível constatar pela observação da Tabela 4.20, que a capacidade é a vertente limitadora, sendo necessária a introdução de mais RSU à medida que o perfil de tráfego se torna mais exigente.

Tabela 4.20 - Número de RSU a considerar para os diferentes perfis de tráfego de dados do Ambiente Rodoviário I

Perfil	Cobertura [Nrsu/km]	Capacidade [Nrsu/km]	
		ITS-G5A	ITS-G5B
A	1	1	0
B		2	0
C		2	1

- **Ambiente Rodoviário II:**

Para o ambiente rodoviário II foi selecionada a estrada que interliga a Praça do Venturoso (ponto A Figura 4.7) à Estação Oriente (ponto B Figura 4.7), situada igualmente em Lisboa, como esboçado na Figura 4.7 [39], sendo a sua extensão de 1 km.

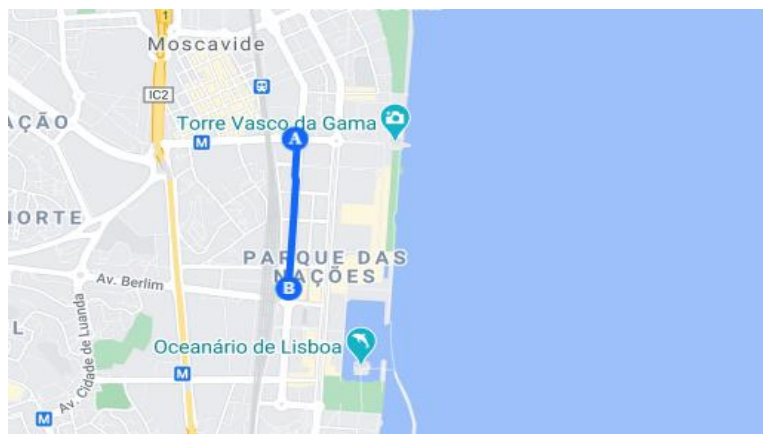


Figura 4.7 - Ambiente Rodoviário II (extraído de [38])

As características que descrevem o ambiente rodoviário em análise encontram-se presentes na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Características do Ambiente Rodoviário II

Variáveis	Ambiente Rodoviário II
Ambiente	Urbano
Localização	LOS
h_{BS}	6 m
h_{UT}	1,5 m
h	20 m
w	30 m
T	6

Os resultados obtidos para as componentes de cobertura e capacidade encontram-se abaixo apresentados:

- i. Este ambiente rodoviário permite atingir um diâmetro de cobertura na ordem dos 698 metros por parte do RSU;
- ii. Relativamente à vertente da capacidade foram obtidos os valores apresentados na Tabela 4.22:

Tabela 4.22 - Tráfego de dados dos diferentes equipamentos ITS para o Ambiente Rodoviário II

Perfil	Volume de tráfego automóvel [n° de veículos]	Tráfego de Dados Gerado por RSU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por OBU [Mbps]		Tráfego de Dados Gerado por veículos [Mbps]	
		ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B	ITS-G5A	ITS-G5B
A	514	0,0896	0	0,03067	0	15,77	0
B		0,1884	0	0,04329	0	22,25	0
C		0,1884	0,208	0,04329	0,01545	22,25	7,94

Considerando os resultados obtidos para ambas as componentes, foi possível determinar os diferentes números de RSU a aplicar para cada perfil de tráfego de dados, como destacado na Tabela 4.23.

Tabela 4.23 - Número de RSU a considerar para os diferentes perfis de tráfego de dados do Ambiente Rodoviário II

Perfil	Cobertura [Nrsu/km]	Capacidade [Nrsu/km]	
		ITS-G5A	ITS-G5B
A	2	1	0
B		1	0
C		1	1

A partir da análise da Tabela 4.23, verifica-se que a cobertura é a vertente limitadora neste ambiente rodoviário, para qualquer perfil de tráfego de dados aplicado, sendo neste cenário de teste necessários pelo menos dois RSU por km.

Capítulo 5: Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 CONCLUSÃO

A tecnologia ITS-G5 pretende modificar a forma como o meio rodoviário se processa, através das comunicações V2X, tornando-o mais seguro, eficiente e menos poluente. Revela-se, deste modo, necessário continuar a apostar na investigação e no desenvolvimento desta tecnologia para que a mesma se torne parte da nossa realidade.

Nesse sentido, a ferramenta desenvolvida nesta dissertação surge com o propósito de auxiliar o operador rodoviário na identificação do número de infraestruturas de comunicações ITS-G5, RSU, a aplicar em determinado cenário/ambiente de propagação, facilitando o processo de implementação deste tipo de redes no meio rodoviário.

A elaboração da mesma foi conseguida através do desenvolvimento do modelo rádio, que permite identificar a zona de cobertura do RSU, assim como do modelo de tráfego de dados, que permite a determinação do tráfego de dados suportado e gerado pelos diferentes equipamentos ITS.

Graças aos modelos mencionados foi possível obter os seguintes resultados:

- Relativamente ao modelo rádio, quando os equipamentos ITS se encontram em LOS, é possível atingir um diâmetro de cobertura por parte do RSU na ordem dos 1150 m para o ambiente rural e de aproximadamente 700 m para o ambiente urbano;
- O tráfego médio suportado por canal para a zona de cobertura do RSU correspondeu a um débito de 12.15 Mbps, em ambiente rural LOS, e de 15.03 Mbps em ambiente urbano LOS;
- No que se refere ao tráfego de dados gerado pelo conjunto de veículos, em ambiente rural LOS, foram obtidos os seguintes valores para os diferentes perfis de tráfego de dados definidos no ponto 4.2.2, 18.46, 69.39 e 75.28 Mbps; sendo para o ambiente urbano, em LOS, obtidos os valores de tráfego de dados de 13.12, 18.62 e 25.15 Mbps, para os mesmos perfis;
- Para o ambiente rural em LOS verificou-se que a capacidade da rede é a componente limitadora, à medida que os perfis de tráfego de dados utilizados se tornam mais

exigentes ao nível do tráfego de dados, enquanto que no ambiente urbano a cobertura rádio é a componente limitante.

Com base nos resultados obtidos é possível chegar a várias interpretações e recomendações, designadamente:

- A pertinência de perceber com rigor as perdas existentes num ambiente rodoviário, para que a obtenção do diâmetro de cobertura do RSU seja a mais aproximada possível da real;
- A identificação dos perfis de tráfego de dados mais adequados em cada cenário para que o dimensionamento da rede consiga suportar o volume de dados resultante das comunicações V2X;
- Da necessidade de atribuir os 7 canais ITS unicamente a aplicações de segurança e eficiência rodoviária para que se consiga suportar perfis de tráfego de dados mais exigentes.

5.2 PERSPETIVAS DE TRABALHO FUTURO

Futuramente, seria interessante, validar os resultados obtidos nesta dissertação com os resultados obtidos pela aplicação desta tecnologia no terreno, assim como aprimorar os modelos desenvolvidos nesta dissertação, com o propósito de aumentar o realismo e a fiabilidade da ferramenta construída.

Bibliografia

- [1] Department for Transport UK, “Road Traffic Forecasts 2018,” 2018.
- [2] European Road Safety Observatory, “Post-impact care 2018,” 2018.
- [3] M. Barradas, “Comunicação Veículo para Veículo,” 2017.
- [4] D. Ferreira, “Camada Protocolar de Aplicação para ITS-G5,” 2013.
- [5] Altran, “5G on the Highway to V2X.”
- [6] R. Weber, J. Misener, and V. Park, “C-V2X - A communication technology for cooperative, connected and automated mobility,” 2019.
- [7] G. Karagiannis *et al.*, “Vehicular Networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 584–616, 2011.
- [8] B. Carvalho, “Implementação da geração e detecção das sequências de treino 802.11p,” 2011.
- [9] A. Festag, “Standards for vehicular communication - from IEEE 802.11p to 5G,” *e i Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 132, no. 7, pp. 409–416, 2015.
- [10] R. Alves *et al.*, “Redes veiculares: princípios, aplicações e desafios,” in *27º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos - Livro Texto dos Minicursos*, 2009, pp. 199–254.
- [11] T. Cerqueira, “Simulação de comunicação inter-veicular sobre LTE e 802.11p,” 2015.
- [12] IEEE Std 1609.1., “IEEE Trial-use standard for wireless access in vehicular environments (WAVE) – Resource Manager,” 2006.
- [13] IEEE Std 1609.3., “IEEE trial-use standard for wireless access in vehicular environments (WAVE) – networking services. Intelligent transportation systems committee,” 2007.
- [14] IEEE Std 1609.4., “IEEE Trial-use standard for wireless access in vehicular environments (WAVE),” 2006.
- [15] SAE J2735, “Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary,” 2016.

- [16] S. H. Bouk, G. Kim, S. H. Ahmed, and D. Kim, "Hybrid Adaptive Beaconing in Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey," *Hindawi, Int. J. Distrib. Sens. Networks*, 2015.
- [17] D. Jiang and L. Delgrossi, "IEEE 802.11p: towards an international standard for wireless access in vehicular environments," *VTC Spring 2008 - IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 2036–2040, 2008.
- [18] ETSI, "ETSI EN 302 665 V1.1.1," 2010.
- [19] ETSI, "Final draft ETSI EN 302 637-2 V1.3.1," 2014.
- [20] ETSI, "Final draft ETSI EN 302 637-3 V1.2.1," 2014.
- [21] ETSI, "ETSI TR 103 300-1 V2.1.1," 2019.
- [22] ETSI, "ETSI TR 103 562 V2.1.1," 2019.
- [23] ETSI, "ETSI TS 103 301 V1.3.1," 2020.
- [24] ISO, "ISO/TS 19091:2017," 2017. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/69897.html>.
- [25] CAR 2 CAR Communication Consortium, "Road Safety and Road Efficiency Spectrum Needs in the 5.9 GHz for C-ITS and Cooperative Automated Driving," 2020.
- [26] 5GAA, "Path towards 5G for the automotive sector," 2018. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2018/2018_10_17_tokyo/presentations/2018_1017_3GPP_Summit_07_5GAA_FLAMENT.pdf.
- [27] QUALCOMM, "Accelerating C-V2X commercialization," 2017.
- [28] C-ROADS, "HARMONISATION OF C-ITS RELATED DEPLOYMENTS THROUGHOUT EUROPE." [Online]. Available: <https://www.c-roads.eu/platform/about/about.html?fbclid=IwAR0jxtQCAkob6USq2QWoOgiwInzUPNap-6FJRbMHaTFxohfY3NSRaofKrEQ>.
- [29] IMT, "Portugal assina Acordo de Subvenção no valor de 15.705.043€," 2019. [Online]. Available: <http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Noticias/Paginas/portugal-assina-acordo-subvencao-06062019.aspx?fbclid=IwAR1LriN8HXZHp8rE2t2NZHpYkwhN4cR9Sh3fp07dyXctiguMUC-6MZWI0pM>.
- [30] ETSI, "ETSI TR 138 901 V14.1.1," 2017.

- [31] T. Abbas, K. Sjöberg, J. Kareda, and F. Tufvesson, “A Measurement Based Shadow Fading Model for Vehicle-to-Vehicle Network Simulations,” *Hindawi, Int. J. Antennas Propag.*, pp. 1–13, 2015.
- [32] P. Vermaat, “UK CITE Communications Infrastructure,” 2019.
- [33] ETSI, “Final draft ETSI EN 302 663 V1.3.1 (2019-10): Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band,” 2019.
- [34] ETSI, “Final draft ETSI EN 302 663 V1.2.1 (2013-05): Intelligent Transport Systems (ITS); Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band,” 2013.
- [35] TAOGLAS, “OMB.5900 Barracuda 10dBi 5.9GHz C-V2X Omnidirectional Outdoor Antenna.” [Online]. Available: <https://www.taoglas.com/product/omb-5900-b10f21-barracuda-5-9ghz-10dbi-omnidirectional-outdoor-antenna/>.
- [36] TAOGLAS, “TD.10 Triton 5dBi 5.9GHz C-V2X Terminal Mount Dipole Antenna.” [Online]. Available: <https://www.taoglas.com/product/td-10-triton-5dbi-dsrc-5-9ghz-dipole-terminal-antenna/>.
- [37] ETSI, “ETSI EN 302 663 V.1.3.0,” 2019.
- [38] D. Layne, “Receiver Sensitivity and Equivalent Noise Bandwidth,” 2014.
- [39] “Google Maps.” [Online]. Available: <https://www.google.pt/maps/@41.1016826,-8.1666352,15z>.

Anexo A

