

## **Análise de desempenho dos protocolos de roteamento DSDV, AODV e OLSR, aplicados a uma rede de comunicação VANET**

**GUILHERME DOS SANTOS**

novembro de 2016

# ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DSDV, AODV E OLSR, APLICADOS A UMA REDE DE COMUNICAÇÃO VANET

Guilherme dos Santos



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2016**



Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de Tese/Dissertação do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Candidato: Guilherme dos Santos, Nº 1151480, 1151480@isep.ipp.pt

Orientação científica: Dr. Mário Alves, mjf@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Dr. Max Mauro Dias Santos, maxsantos@utfpr.edu.br



Departamento de Engenharia Electrotécnica

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Área de Especialização em Automação e Sistemas

**2016**



Dedico este trabalho ao meu primo e irmão, Vitor Anhaia dos Santos, *“In Memoriam”*, pelos grandes momentos de felicidade que partilhamos em nossa infância e juventude.

*“Eu vou guardar, vou lembrar pra sempre!”*



## *Agradecimentos*

Em primeiro lugar agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por estarem sempre iluminando meu caminho, me mantendo na fé e dando forças para realizar meus objetivos, sem me deixar abater nos momentos de dificuldade.

Agradeço imensamente a minha família, meu pai Luiz José e minha mãe Ana Maria, que sempre primaram pela minha educação e me ensinaram através da humildade, simplicidade e generosidade, a sempre buscar o meu melhor. As minhas lindas irmãs Kamila e Kelly, que sempre me apoiaram e são minha grande fonte de incentivo. E também a todos os meus familiares que me incentivaram, avôs e avós, tios e tias, primos e primas, que devido ao espaço limitado desta seção, não me permite agradecer, como devia, mas deixo meu agradecimento a todos que me apoiaram direta ou indiretamente.

Ao Professor Doutor Mário Alves, orientador desta dissertação, deixo meu grande agradecimento, pela atenção e disponibilidade dedicados ao longo deste trabalho. E também ao Professor Doutor Max Mauro, coorientador desta dissertação, pelo grande incentivo nesta área de pesquisa, assim como a atenção e disponibilidade dedicados.

Aos meus amigos, Luan, meu amigo de longa data com o qual compartilhei inúmeros momentos, aos meus amigos de graduação que levarei para vida inteira Lucas Bonfati, Thamiris e Felipe, grandes incentivadores para minha aventura em Portugal, assim como pelos diversos momentos de diversão e esforço que partilhamos durante os árduos 5 anos de estudo, e em especial à Denis e Diego, os quais se tornaram para mim grandes amigos, como eles aprendi muitas coisas compartilhando os momentos de alegria e dificuldade durante a realização deste mestrado aqui em Portugal. Agradeço e deixo meu mais sincero obrigado a todos.

E por fim agradeço as instituições de ensino que me permitiram a realização deste mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná e Instituto Superior de Engenharia do Porto, e aos demais envolvidos que auxiliaram direta ou indiretamente para a realização deste mestrado.





## *Resumo*

A quantidade de veículos terrestres tem aumentado consideravelmente a cada ano, este aumento tem feito outra estatística crescer gradualmente, que são as mortes por acidentes de trânsito. Além do acréscimo nos níveis de poluição. Contudo, o exponencial avanço tecnológico dos sistemas eletroeletrônicos tem proporcionado melhorias nos sistemas de trânsito ao nível de desempenho, segurança, conforto e economia.

O surgimento dos chamados Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS), que englobam um conjunto de aplicações envolvendo sensores, atuadores e controladores, tem como objetivo propiciar aos condutores, passageiros e ambiente, um maior nível de eficiência para o tráfego, mitigando e evitando a ocorrência de acidentes.

As diretrizes fundamentais para melhorar a segurança do sistema de trânsito nos próximos anos são as funcionalidades que proporcionem evitar acidentes e proteger pedestres (*crash avoidance* e *pedestrian protection*), sendo que as tecnologias de comunicação que servirão como infraestrutura de comunicação entre aplicações, irão desempenhar um papel fundamental para habilitar aplicações como *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), *Vehicle-to-Road Infrastructure* (V2R) e *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P). Proporcionando ao condutor estar mais consciente do ambiente ao seu redor, permitindo-lhe reagir a tempo e adequadamente a situações inesperadas, tais como uma parada brusca, pouca visibilidade, objeto repentino, etc. Mas, além disto, os sistemas de comunicação veicular irão permitir englobar os veículos no conceito de *Internet of Things*, permitindo compartilhar e recolher informações dos veículos, estradas e seus arredores a fim de proporcionar uma infinidade de serviços de valor acrescentado a passageiros e condutores.

Porém, estas redes de comunicação veicular (VANETs) ainda necessitam de avanços de forma a permitir tais aplicações. Uma vez que, as soluções de comunicação existentes não garantem suporte total das peculiaridades do ambiente veicular tais como mobilidade, escalabilidade, confiabilidade, qualidade de serviço, tempo de latência, etc.

Em tal contexto, esse trabalho apresenta uma revisão do estado da arte para as tecnologias habilitadoras dessas comunicações, e também uma revisão por parte das ferramentas utilizadas nesses estudos, os simuladores. Trazendo por fim a avaliação por meio do simulador NS-3, dos protocolos de roteamento DSDV, AODV e OLSR, quando aplicados a redes de comunicação veicular. Onde foram analisados os parâmetros de taxa de entrega de pacotes (PDR), *goodput*, *routing overhead* e atraso de entrega, em diferentes condições de densidade da rede e velocidade de deslocamento dos Nós (veículos).

Os resultados das simulações mostraram que tanto em condições de baixa densidade quanto em cenários com baixa velocidade de deslocamento, os protocolos DSDV e OLSR possuem um desempenho superior ao protocolo AODV. Porém com o aumento da quantidade de Nós e também em condições de aumento da velocidade os protocolos DSDV e AODV, são diretamente afetados e tem suas performances reduzidas. Sendo o protocolo OLSR o qual apresentou os melhores resultados, seja sob a influência do aumento densidade ou da velocidade, isto devido a sua boa característica de gerenciamento.

### ***Palavras-Chave***

Sistemas Inteligentes de Transporte, VANET, protocolos de roteamento, DSDV, AODV, OLSR, NS-3, BoonMotion.

## *Abstract*

The number of vehicles has increased considerably each year, this increase has made another statistic grow gradually, which are deaths from traffic accidents. In addition to causing the increase in pollution levels. However, the exponential technological advancement of electronic systems has provided improvements in transit systems in terms of performance, safety, comfort and economy.

The emergence of so-called Intelligent Transportation Systems (ITS), which include a set of applications involving sensors, actuators, and controllers, aims to provide for drivers, passengers and environment, a higher level of efficiency for traffic, mitigating and preventing the occurrence of accidents.

The basic guidelines to improve the safety of the transit system in the coming years are features that provide avoid accidents and protect pedestrians, and communication technologies that serve as communication infrastructure between applications, will play a key role to enable, applications such as Vehicle-to-Vehicle (V2V), Vehicle-to-Road Infrastructure (V2R) and Vehicle-to-Pedestrian (V2P). Providing the driver to be more aware of the environment around you, allowing you to react in time and appropriately to unexpected situations such as a sudden stop, poor visibility, sudden object, etc. But in addition, the vehicle communication systems will allow to involve vehicles on the concept of Internet of Things, enabling sharing and collecting information of vehicles, roads and their surroundings to provide a multitude of value-added services to passengers and drivers.

However, these Vehicular Communication Networks (VANETs), still need improvement in order to allow such applications. Since the existing communication solutions do not guarantee full support of the peculiarities of the car environment such as mobility, scalability, reliability, quality of service, latency, etc.

In this context, this study presents a review of the state of the art for enabling technologies such communications, and also a review by the tools used in these studies, the simulators.

Bringing an end to evaluation through the NS-3 simulator, routing protocols DSDV, AODV and OLSR, when applied to Vehicular Communication Networks. Where parameters like Package Delivery Rate (PDR), goodput, routing overhead and delivery delay were analysed, in different network conditions like density and travel speed of the nodes (vehicles).

The simulation results showed that both low-density conditions and in scenarios with low-speed, the protocols DSDV and OLSR have a better performance than AODV protocol. However, with increasing number of nodes and also increase the speed, the protocols DSDV and AODV are directly affected and has reduced their performance. Being the protocol OLSR which showed the best results, under the influence of increased density or speed, that due to its good feature management.

### ***Keywords***

Intelligent transportation systems, VANETs, routing protocols, DSDV, AODV, OLSR, NS-3, BoonMotion.

# Índice

|  |             |
|--|-------------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....  | <b>I</b>    |
| <b>RESUMO</b> .....  | <b>III</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>V</b>    |
| <b>ÍNDICE</b> .....  | <b>VII</b>  |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....   | <b>IX</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....   | <b>XI</b>   |
| <b>ACRÓNIMOS</b> .....   | <b>XIII</b> |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>1</b>    |
| 1.1.CONTEXTUALIZAÇÃO.....  | 1           |
| 1.2.IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....  | 7           |
| 1.3.OBJETIVOS .....  | 7           |
| 1.4.CONTRIBUIÇÕES .....  | 8           |
| 1.5.CALENDARIZAÇÃO.....  | 9           |
| 1.6.ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....   | 9           |
| <b>2. ESTADO DA ARTE: REDES VEICULARES</b> .....   | <b>11</b>   |
| 2.1.COMUNICAÇÃO INTER VEICULAR .....   | 13          |
| 2.2.APLICAÇÕES .....   | 16          |
| <b>3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM REDES VEICULARES</b> ..... | <b>19</b>   |
| 3.1.ARQUITETURAS DE LONGO ALCANCE.....   | 20          |
| 3.2.ARQUITETURAS DE MÉDIO ALCANCE.....   | 24          |
| 3.3.ARQUITETURAS DE CURTO ALCANCE .....  | 29          |
| 3.4.ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO .....                                   | 33          |
| <b>4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS SIMULADORES DE REDES VEICULARES</b> .....                        | <b>37</b>   |
| 4.1.SIMULADORES DE MOBILIDADE .....  | 38          |
| 4.2.COMPARAÇÃO DOS SIMULADORES DE MOBILIDADE .....   | 45          |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.3.SIMULADORES DE REDE .....  | 46        |
| 4.4.COMPARAÇÃO DOS SIMULADORES DE REDE .....                               | 49        |
| 4.5.SIMULADORES INTEGRADOS .....   | 50        |
| 4.6.COMPARAÇÃO DOS SIMULADORES INTEGRADOS.....                             | 52        |
| 4.7.ANÁLISE DOS SIMULADORES .....  | 52        |
| <b>5. AVALIAÇÃO DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE REDES VEICULARES .....</b> | <b>55</b> |
| 5.1.DESCRICÃO DO PROTOCOLO DSRC/WAVE.....                                  | 56        |
| 5.2.DESCRICÃO DO SIMULADOR NS-3 .....                                      | 63        |
| 5.3.PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO – DSDV, AODV E OLSR .....                     | 65        |
| 5.4.METODOLOGIA .....  | 68        |
| 5.5.SIMULAÇÃO.....   | 69        |
| 5.6.ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....                               | 76        |
| <b>6. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO .....</b>                                | <b>87</b> |
| 6.1.CONCLUSÃO .....  | 87        |
| 6.2.TRABALHO FUTURO.....   | 88        |
| <b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS.....</b>  | <b>89</b> |
| <b>ANEXO A. SCRIPT VANET-ROUTING-COMPARE.CC.....</b>                       | <b>99</b> |

## Índice de Figuras

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Figura 1  | Histórico e projeção do aumento de veículos terrestres no mundo. [4]                           | 2  |
| Figura 2  | Número de mortes por acidentes de trânsito. [5]  | 3  |
| Figura 3  | Tipos de colisões evitadas com Sistemas Inteligentes de Transportes. [11]                      | 6  |
| Figura 4  | Aplicações de uma rede de comunicação veicular, adaptada de [18].                              | 12 |
| Figura 5  | Taxonomia das aplicações de comunicação inter veicular.  | 13 |
| Figura 6  | Alerta de pedestre. [20]   | 15 |
| Figura 7  | Classificação das tecnologias de rede VANETs em função do alcance, baseado em [22].            | 20 |
| Figura 8  | Arquitetura CALM. [38]   | 27 |
| Figura 9  | Arquitetura do protocolo C2CNet. [42]  | 28 |
| Figura 10 | Ilustração da comunicação V2LC. [53]   | 32 |
| Figura 11 | Etapas de simulação de uma rede veicular.  | 38 |
| Figura 12 | Modelo de mobilidade <i>FreeWay</i> (a) e <i>Manhattan</i> (b), adaptada de [57].              | 40 |
| Figura 13 | Modelo de mobilidade de cenário real (imagem A) e cenário gerado (imagem B), adaptada de [58]. | 41 |
| Figura 14 | Comparação entre o modelo OSI e a arquitetura WAVE.  | 58 |
| Figura 15 | Pilha de protocolos WAVE. [83]   | 58 |
| Figura 16 | Taxa de transmissão, modulação e codificação da tecnologia WAVE. [84]                          | 59 |



|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 17 | Disposição dos canais na arquitetura WAVE. [85]   | 59 |
| Figura 18 | Arquitetura da camada MAC WAVE. [85]  | 61 |
| Figura 19 | Estrutura do <i>frame</i> de mensagens WSM. [85]  | 62 |
| Figura 20 | Estrutura do NS3. [67]  | 63 |
| Figura 21 | Fenômeno de <i>flooding</i> sofrido pelo protocolo AODV. [92]   | 66 |
| Figura 22 | Os Nós azuis são os eleitos como MPR e responsáveis pela transmissão de dados. [92]   | 67 |
| Figura 23 | Cenário simulado.   | 70 |
| Figura 24 | A imagem A apresenta a disposição dos nós e a imagem B mostra os <i>links</i> de comunicação, no cenário simulado com 30 Nós. | 75 |
| Figura 25 | Taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de veículos.   | 76 |
| Figura 26 | Taxa de <i>goodput</i> em função da quantidade de veículos.   | 77 |
| Figura 27 | Taxa de <i>routing overhead</i> em função da quantidade de veículos.  | 79 |
| Figura 28 | Tempo de atraso na entrega de pacotes em função da quantidade de veículos.  | 79 |
| Figura 29 | Taxa de PDR em função da velocidade de deslocamento dos veículos.   | 82 |
| Figura 30 | Taxa de <i>goodput</i> em função da velocidade de deslocamento dos veículos.  | 82 |
| Figura 31 | Taxa de <i>goodput</i> em função da área de simulação.  | 83 |
| Figura 32 | <i>Routing overhead</i> em função da velocidade de deslocamento dos veículos.   | 84 |
| Figura 33 | Tempo de atraso na entrega de pacotes em função da velocidade de deslocamento dos veículos.                                   | 84 |

## *Índice de Tabelas*

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabela 1  | Principais causas de acidentes com veículos terrestres. [6]          | 4  |
| Tabela 2  | Calendarização das atividades da dissertação.                        | 10 |
| Tabela 3  | Classificação do espectro conforme alguns países.                    | 25 |
| Tabela 4  | Comparação entre as tecnologias de comunicação sem fio. [22]         | 33 |
| Tabela 5  | Comparação entre os simuladores de mobilidade.                       | 45 |
| Tabela 6  | Comparação entre os simuladores de rede.                             | 49 |
| Tabela 7  | Comparação entre os simuladores integrados.                          | 52 |
| Tabela 8  | Parâmetros utilizados nos cenários de mobilidade gerados.            | 70 |
| Tabela 9  | Parâmetros configuráveis no <i>script vanet-routing-compare.cc</i> . | 72 |
| Tabela 10 | Parâmetros utilizados na simulação da rede veicular.                 | 74 |



## *Acrónimos*

|          |   |  |
|----------|---|--|
| ACEA     | – | European Automobile Manufacturers' Association                         |
| AdaptIVe | – | Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles |
| ADAS     | – | Advanced Driver Assistance Systems                                     |
| ADR      | – | Adaptive Data Rate   |
| AMC      | – | Adaptive modulation and coding   |
| AODV     | – | Ad Hoc On-Demand Distance Vector                                       |
| ARIB     | – | Association of Radio Industries and Businesses                         |
| ASTM     | – | American Society for Testing and Materials                             |
| BLE      | – | Bluetooth Low Energy   |
| CALM     | – | Communications Access for Land Mobiles                                 |
| CAN      | – | Controller Area Network  |
| CAP      | – | Carrierless Amplitude Phase  |
| CME      | – | CALM system Management Entity  |
| COOPERS  | – | Co-operative Networks for Intelligent Road Safety                      |
| COTS     | – | Commercial off-the-shelf   |
| CPS      | – | Cyber-physical systems   |
| CQICH    | – | Fast Channel Feedback  |
| CSS      | – | Chirp Spread Spectrum  |
| CVIS     | – | Cooperative Vehicle Infrastructure System                              |
| C2C-CC   | – | Car-to-Car Consortium  |
| DSDV     | – | Destination Sequenced Distance Vector Routing                          |
| DSRC     | – | Dedicated Short Range Communication                                    |
| DSSS     | – | Direct Sequency Spread Spectrum  |
| ECU      | – | Electronic Control Unit  |
| EDCA     | – | Enhanced Distributed Channel Access                                    |
| ETC      | – | Electronic Toll Collection   |
| ETSI     | – | European Telecommunications Standards Institute                        |
| FCC      | – | Federal Communications Commission                                      |

|          |   |  |
|----------|---|--|
| FHSS     | – | Frequency Hopping Spread Spectrum              |
| GloMoSim | – | Global Mobile information system Simulator     |
| GPS      | – | Global Positioning System                      |
| GSM      | – | Global System for Mobile Communications        |
| HARQ     | – | Hybrid Automatic Repeat Request                |
| HSDPA    | – | High Speed Downlink Packet Access              |
| IME      | – | Interface Manager Entity                       |
| IOT      | – | Internet of Things                             |
| IOV      | – | Internet of Vehicles                           |
| ISM      | – | Industrial, Scientific and Medical             |
| IrDa     | – | Infrared Data Association                      |
| IrLAN    | – | Infrared Lan Access                            |
| IrMC     | – | Infrared Mobile Communications                 |
| IR-UWB   | – | Impulse Radio Ultra WideBand                   |
| ISM      | – | Industrial, Scientific and Medical             |
| ITS      | – | Intelligent Transportation Systems             |
| JiST     | – | Java in Simulation time                        |
| LCC      | – | Logical Link Control                           |
| LoS      | – | Line of Sight                                  |
| LPWAN    | – | Low Power Wide Area Network                    |
| LTE      | – | Long Term Evolution                            |
| MANET    | – | Mobile Ad Hoc Networks                         |
| MBWA     | – | Mobile Broadband Wireless Access               |
| MIMO     | – | Multiple input Multiple output                 |
| MIB      | – | Management Information Base                    |
| MLME     | – | MAC Layer Management Entety                    |
| MOVE     | – | Mobility Model Generator for Vehicular Network |
| MPR      | – | Multiple Interface Declaration                 |
| M2M      | – | Machine-to-Machine                             |
| NAM      | – | Network Animator                               |
| NCTUns   | – | National Chaio University Network Simulator    |
| NED      | – | Network Description Language                   |

|        |  |
|--------|--|
| NHTSA  | – National Highway Traffic Safety Administration |
| NME    | – Network Manager Entity                         |
| OBU    | – On-board unit                                  |
| OFDM   | – Orthogonal frequency-division multiplexing     |
| OLSR   | – Optimized Link State Routing                   |
| OPNET  | – Optimized Network Engineering Tool             |
| OTCL   | – Object oriented Tool Command Language          |
| O-QPSK | – Offset Quadrature Phase Shift Keying           |
| PDR    | – Packet Delivery Ratio                          |
| PLME   | – Physical Layer Management Entity               |
| PSID   | – Provide Service Identifier                     |
| QoS    | – Quality of Service                             |
| RERR   | – Route Error                                    |
| RREP   | – Route Reply Packet                             |
| RREQ   | – Route Request                                  |
| RFID   | – Radio-Frequency Identification                 |
| RSU    | – Roadside unit                                  |
| SN     | – Sequence number                                |
| STRAW  | – Street Random Waypoint                         |
| SUMO   | – Simulation for Urban Mobility                  |
| SWANS  | – Scalable Wireless Ad Hoc Network Simulator     |
| TC     | – Topology Control                               |
| TCP    | – Transmission Control Protocol                  |
| TIGER  | – Topologically Integrated Geographic Encoding   |
| TraNs  | – Traffic and Network Simulation environment     |
| UDP    | – User Datagram Protocol                         |
| UNB    | – Ultra Narrow Band                              |
| UTC    | Coordinated Universal Time                       |
| UTMS   | – Universal Mobile Telecommunications System     |
| UWB    | – Ultra WideBand                                 |
| VANET  | – Vehicular Ad Hoc Network                       |
| VETRAC | – Vehicle tracking system                        |

|       |   |
|-------|---|
| VICS  | – Vehicle Information and Communication System    |
| VLC   | – Visible Light Communication                     |
| V2I   | – Vehicle-to-Internet                             |
| V2LC  | – Vehicular Visible Light Communication           |
| V2P   | – Vehicle-to-Pedestrian                           |
| V2R   | – Vehicle-to-Road Infrastructure                  |
| V2V   | – Vehicle-to-Vehicle                              |
| WAVE  | – Wireless Access in Vehicular Environment        |
| WDM   | – Wavelength Division Multiplexing                |
| WMAN  | – Wireless Metropolitan Area Network              |
| WME   | – WAVE Management Entity                          |
| WPAN  | – Wireless Personal Area Network                  |
| WSA   | – WAVE Service Advertisement                      |
| WSE   | – WAVE Security Entity                            |
| WSMP  | – WAVE Short Message Protocol                     |
| WiMAX | – Worldwide Interoperability for Microwave Access |
| Wi-Fi | – Wireless fidelity                               |

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

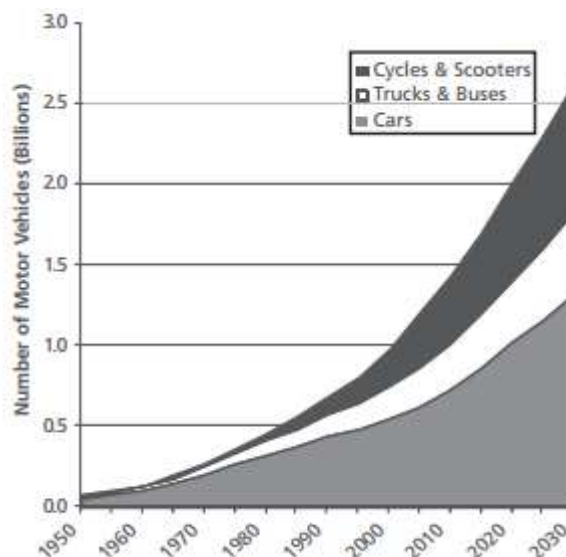
Os veículos de mobilidade terrestre começaram a surgir a partir do século XIX, com o objetivo de transportar pessoas e cargas. Inicialmente eram caracterizados por componentes puramente mecânicos, hidráulicos e pneumáticos, sendo estas as tecnologias predominantes por muitos anos até o advento de componentes elétricos como motores de partida, sistemas de iluminação, chaves entre outros e posteriormente os componentes eletrônicos através de semicondutores, microprocessadores e microcontroladores que tem a capacidade de processamento de informação, caracterizavam-se por sistemas eletroeletrônicos. E através destes sistemas, avanços significativos no setor automotivo ao nível de desempenho, segurança, conforto e economia, foram obtidos [1].

E desde então a quantidade de veículos terrestres tem aumentado consideravelmente a cada ano com a inserção de novas funcionalidades sendo requisitos funcionais de fato. De acordo com a revista de automóveis *Wards Auto* [2] no ano de 2010 se superou a marca de 1 bilhão de veículos em operação em todo o mundo, considerando os 5 continentes que possuem características distintas e assim demandam requisitos diferenciados de operação e regulamentação. Em conformidade aos dados mais atuais da Associação de Montadoras



Europeias (ACEA), apenas no ano de 2015 foram produzidos e comercializados mundialmente cerca de 91,5 milhões de unidades de veículos terrestres [3] e, como demonstra o gráfico na Figura 1, com este crescimento é esperado que nas próximas duas décadas a quantidade de veículos mundial seja duplicada.

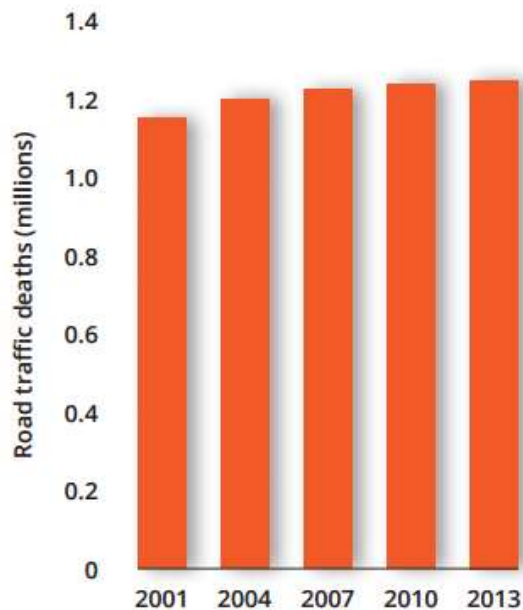
Considera-se como veículos terrestres de acordo com uma classificação como sendo de passageiros, transporte de pessoas, comerciais, construção, agrícolas, esportivos, militares e para fins específicos como os veículos eletrificados usados em campos de golfe. Além disto, deve-se considerar que os sistemas de propulsão de veículos terrestres podem ser por motores de combustão interna, eletrificados e outras formas que podem ser combinados entre si.



**Figura 1 Histórico e projeção do aumento de veículos terrestres no mundo [4].**

Esse aumento da quantidade de veículos tem induzido o aumento de tráfego em ambientes, urbanos, rodoviários e fora de estrada, que conseqüentemente com o aumento da população no mundo tem gerado uma concorrência por acesso a um determinado espaço físico, levando a conflitos. Estas declarações filosóficas e mensuráveis têm levado ao aumento crescente de acidentes entre veículos-pessoas, veículos-veículos e veículos-ambiente. Sendo que, estes cenários de acidentes causadores de danos físicos e materiais aos condutores e demais usuários, têm aumentado anualmente causando o conseqüente acréscimo no número de ferimentos e mortes por acidentes relacionados ao tráfego de

veículos, como pode ser visto na Figura 2, apesar de todo o avanço tecnológico na área de segurança automóvel.



**Figura 2** Número de mortes por acidentes de trânsito [5].

Logo a atenção em ações de segurança no contexto de sistemas veiculares se torna de extrema importância, visto que atuais ações não são suficientes em face da crescente frota de veículos e população na terra.

Segundo a Organização Mundial de Saúde no Relatório Mundial da Segurança Rodoviária de 2015 [5], cerca de 1,25 milhões de pessoas morrem a cada ano vitimadas em função de acidentes veiculares, sendo que a grande maioria são jovens na faixa de 15 a 29 anos de idade. Caso não seja realizada nenhuma medida para a redução desses números, estima-se que os acidentes de trânsito se tornem o 7º principal causador de mortes até 2030 [7].

A principal causa de acidentes é devido a erros humanos tais como distração, como mostra a Tabela 1 (a distração corresponde apenas a uma fração das possíveis causas de falha). Tecnologias capazes de detectar, alertar e realizar ações corretivas para estes estados de distração são assim bem elegíveis como solução a reduzir este cenário indesejável.

**Tabela 1 Principais causas de acidentes com veículos terrestres [6].**

| <b>Causa de acidentes</b> | <b>Porcentagem</b> |
|---------------------------|--------------------|
| Erros humanos             | 94 %               |
| Defeitos técnicos         | 2 %                |
| Condições do ambiente     | 2 %                |
| Outras causas             | 2 %                |

Um relatório técnico da *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) do Departamento de Transporte dos Estados Unidos de 2010 mostra que as mais frequentes causas de acidentes em cruzamentos são provenientes da fiscalização inadequada (44,1%), equívoco de ação de outros (8,4%), vista obstruída (7,8%), manobra ilegal (6,8%), distração interna (5,7%), e mau julgamento do espaço ou velocidade excessiva de outros veículos (5,5%) [8].

Além do aumento na taxa de ferimentos e mortes, a grande quantidade de veículos tem causado um acréscimo nos níveis de poluição do ar através de gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), entre outros causadores do efeito estufa. Essas emissões são causadas principalmente devido aos grandes congestionamentos, que acabam por drenar somente da economia norte americana 87,2 bilhões de dólares anualmente, sendo cerca de aproximadamente 10 bilhões de litros de combustível desperdiçados com o trânsito parado, segundo dados do Departamento de Transportes dos Estados Unidos [9].

Qualquer tecnologia ou ação que venha a reduzir os ferimentos e mortes, assim como as taxas de poluição ocasionadas pelo alto nível de tráfego é bem vinda para os diversos níveis de uma nação. Desta maneira, as novas tecnologias de comunicação são assim motivadoras para a melhoria destes parâmetros.

O exponencial avanço tecnológico dos sistemas eletroeletrônicos tem proporcionado melhorias no sistema de tráfego em ambientes urbanos, rodoviários e fora de estrada. Entretanto, a necessidade por ter veículos terrestres com capacidade de se adaptar a condições externas, induz que os veículos tenham um determinado nível de inteligência adaptativa. Sendo assim, o surgimento dos chamados Sistemas Inteligente de Transportes (ITS), que englobam um conjunto de aplicações envolvendo sensores, atuadores e

controladores, com objetivo proporcionar aos condutores, passageiros e ambiente, um maior nível de eficiência para o tráfego de forma global coordenada com significativa melhoria no desempenho, segurança, conforto e economia para todos envolvidos, veículo, condutor e ambiente.

Os benefícios apresentados por esses sistemas não envolvem somente questões de segurança, mas também oferecem melhorias na eficiência do sistema de transporte por meio de um melhor gerenciamento do fluxo do tráfego, afetando diretamente na economia de tempo, dinheiro e prevenção do ambiente, caracterizando-se assim um cenário de mobilidade urbana, rodoviária e fora de estrada mais eficiente.

Considera-se como incluso no grupo de Sistemas Inteligentes de Transporte os chamados Sistemas Avançados de Assistência ao Conductor (*Advanced Driver Assistance Systems – ADAS*), que nos últimos anos começaram a estar cada vez mais presente nos veículos, envolvendo diversos tipos de aplicações, e com uma importância cada vez mais crescente. Segundo o programa de segurança automóvel europeu Euro NCAP [10], as diretrizes fundamentais para melhorar a segurança do sistema de trânsito nos próximos anos são as funcionalidades que proporcionem evitar acidentes e proteger pedestres (*crash avoidance e pedestrian protection*), sendo que as tecnologias de comunicação que servirão como infraestrutura de comunicação entre aplicações, irão desempenhar um papel fundamental para habilitar, aplicações tais como *Vehicle-to-Vehicle (V2V)*, *Vehicle-to-Road Infrastructure (V2R)*, *Vehicle-to-Internet (V2I)* e *Vehicle-to-Pedestrian (V2P)*, que possibilitariam assim evitar diversos tipos de acidentes como é demonstrado na Figura 3, a qual apresenta quais tipos de acidentes podem ser evitados quando se tem aplicação de mecanismos de ITS.

A comunicação entre veículos torna a condução mais segura, permitindo aos condutores compartilhar informações uns com os outros, de forma a fornecer alertas e/ou ações corretivas, de modo a evitar colisões [12]. Estas aplicações propiciariam ao condutor estar mais consciente do ambiente ao seu redor, permitindo-lhe reagir a tempo e adequadamente a situações inesperadas, tais como uma parada brusca, pouca visibilidade, objeto repentino, etc.

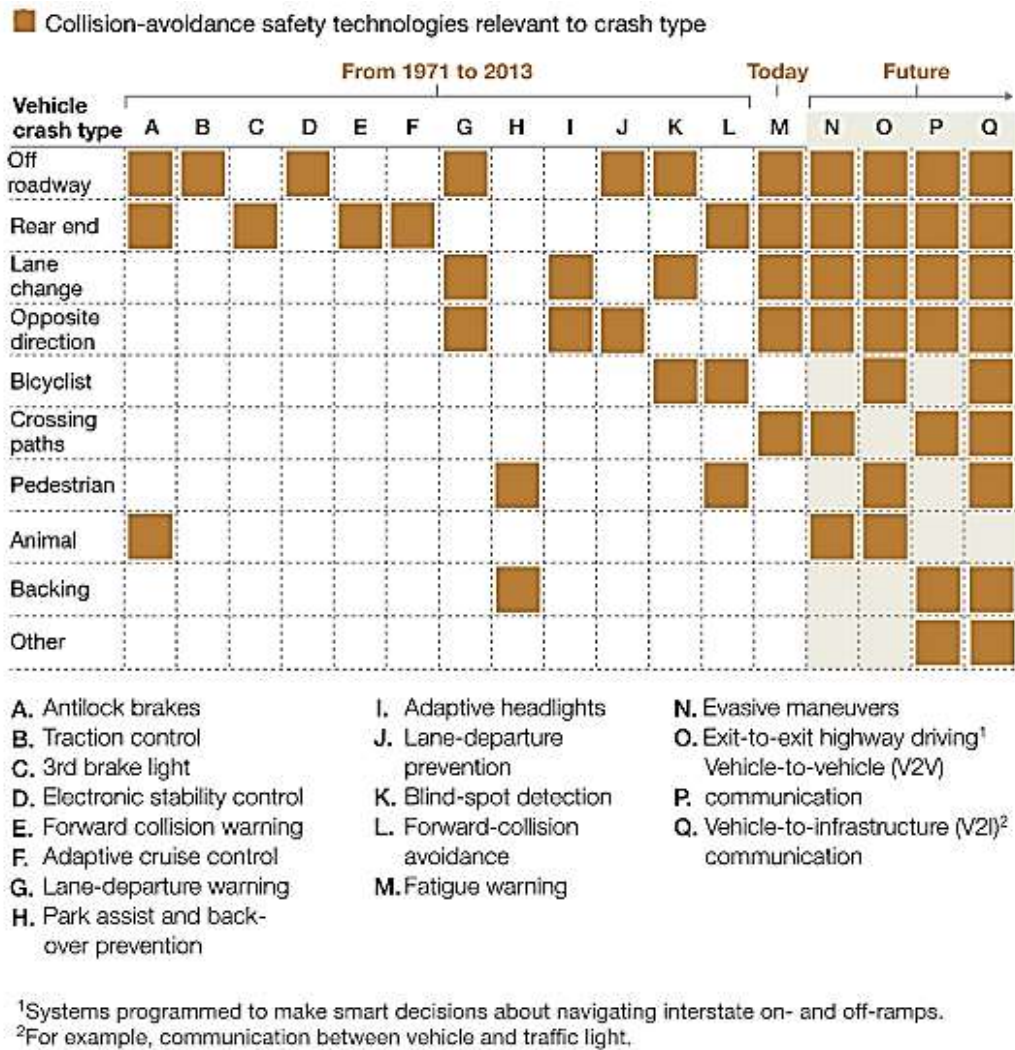


Figura 3 Tipos de colisões evitadas com Sistemas Inteligentes de Transportes [11].

Grande atenção é devotada às aplicações de segurança, mas, além disto, os sistemas de comunicação veicular irão permitir englobar os veículos no conceito de *Internet of Things* (IoT), permitindo compartilhar e recolher de informações dos veículos, estradas e seus arredores a fim de proporcionar uma infinidade de serviços de valor acrescentado a passageiros e condutores. Devem-se considerar ainda tecnologias como *Big Data* e *Cloud Computing* [13].

Porém ainda são necessários muitos estudos que permitam habilitar essas redes de comunicação veicular, as chamadas *Vehicle Ad hoc networks* (VANETs). Uma vez que, as soluções de comunicação existentes não garantem suporte total das peculiaridades do ambiente veicular tais como mobilidade, escalabilidade, confiabilidade, qualidade de

serviço, tempo de latência, etc. Isto se deve ao fato que os requisitos de veículos inteligentes da próxima geração, demandam características adicionais que os atuais sistemas de comunicação não proporcionam. Além disto, estipula-se que o acréscimo de dados a serem trocados, tanto no suporte das aplicações funcionais de tempo-real e segurança, como para aplicações entretenimento e o aumento da quantidade de dados exigida cada vez mais pelos usuários, irá sobrecarregar a rede.

Em tal contexto, salienta-se a importância dos estudos sobre as topologias, arquiteturas e tecnologias que habilitam os sistemas de comunicação, que suportem as aplicações mencionadas na Figura 3, atendendo aos requisitos de segurança. Por fim, tende-se a estimular a análise e desenvolvimento dos diversos protocolos que regulamentam estes padrões de comunicação, como é o caso dos protocolos de roteamento responsáveis por garantir a fiabilidade e confiabilidade na entrega de pacotes aos destinos. Isto é um caso característico de sistemas de comunicação sem fio na forma de redes *ad-hoc*.

## **1.2. IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

Considerando o exposto atrás, a pergunta fundamental a que nos propomos responder nesta dissertação é:

*Se os protocolos de comunicação disponíveis atualmente (COTS/standard) são adequados (QoS) para redes veiculares ?*

## **1.3. OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise do desempenho dos protocolos de roteamento das *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs), que são caracterizadas como dois ou mais Nós equipados com comunicação sem fio e capacidade de rede, na qual as redes VANETs então englobadas. Os principais protocolos de roteamento das redes *ad hoc* são: *Destination Sequenced Distance Vector* (DSDV), *Ad-hoc On Demand Routing* (AODV) e *Optimized Link State Routing* (OLSR). Tais protocolos serão avaliados quando aplicados sobre as redes de comunicação veicular, que envolvem as comunicações *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), *Vehicle-to-Road infrastructure* (V2R), *Vehicle-to-Internet* (V2I) e *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P).

Para atingir tal objetivo foram realizadas as seguintes etapas:

- Identificação do estado da arte das redes de comunicação veicular, assim como a capacidades em suportar aplicações de ITS;
- Estudo e análise comparativa das tecnologias habilitadoras da comunicação entre os veículos e a infraestrutura (V2V, V2R, V2I e V2P);
- Estudo e análise comparativa das ferramentas utilizadas em estudos de redes veiculares;
- Compreensão e aplicação do simulador NS-3 para uma rede VANET;
- Estudo dos protocolos de roteamento;
- Modelagem e simulação de diferentes cenários de comunicação veicular, baseado em estudos já realizados sobre o desempenho dos protocolos de roteamento em redes VANETs. Como [14], no qual os protocolos DSDV, AODV e OLSR são simulados e avaliados em ambiente NS-3. Além do apoio de outros estudos, como [15] e [16] que investigam a performance desses protocolos em redes de comunicação veicular;
- Aquisição e análise dos dados obtidos.

#### **1.4. CONTRIBUIÇÕES**

As contribuições deste trabalho são caracterizadas por:

1. Análise comparativa das tecnologias de comunicação sem fio (COTS/*Standard*) para redes de comunicação inter veicular.
2. Análise comparativa dos diversos simuladores aplicados nos estudos de redes de comunicação veicular.
3. Avaliação e comparação da QoS do protocolo DSRC/WAVE quando aplicado os protocolos de roteamento DSDV, AODV e OLSR em um cenário de mobilidade simplificado, criado por meio da ferramenta BonnMotion.

## **1.5. CALENDARIZAÇÃO**

De forma a cumprir o conjunto de objetivos estipulados para essa dissertação a Tabela 2 apresenta a calendarização das atividades realizadas. Nela as linhas de grade principais se separam em períodos de 30 dias e as secundárias em 7 dias.

## **1.6. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO**

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma. O capítulo 2 apresenta uma revisão com respeito ao estado da arte das tecnologias de comunicação veicular, abordando os principais tipos de conectividade *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), *Vehicle-to-Road infrastructure* (V2R), *Vehicle-to-Internet* (V2I) e *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P), considerando-se ainda a exposição das suas principais aplicações suportadas.

O capítulo 3 apresenta uma análise comparativa das diversas tecnologias de comunicação sem fio, categorizadas em longo, médio e curto alcance, expondo-lhes seus pontos positivos e negativos.

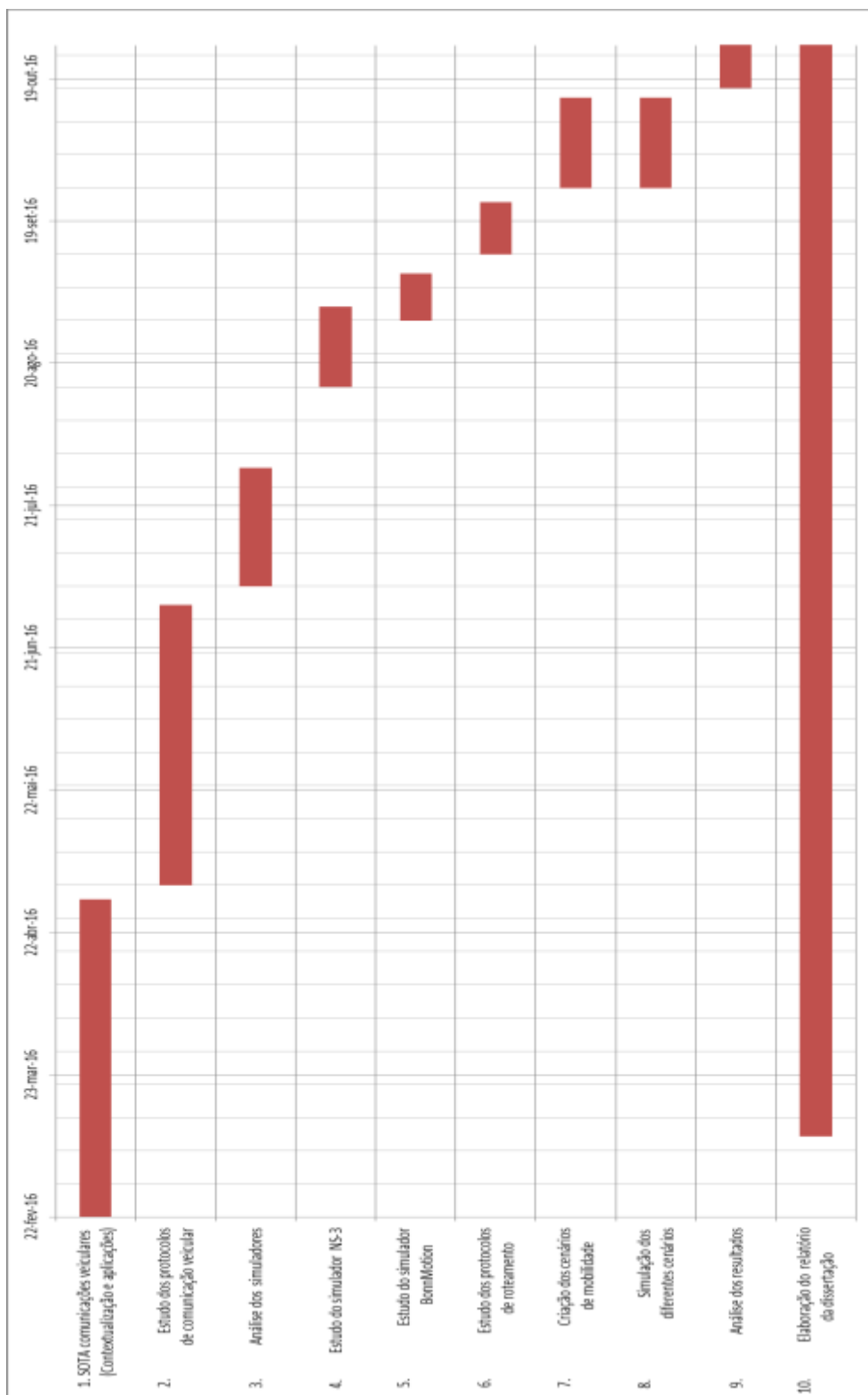
O capítulo 4 apresenta como deve se estruturar um cenário de redes veiculares, de forma que possa ser migrado aos simuladores utilizados para estes estudos e análises, além apresentar e comparar alguns simuladores utilizados no estudo de redes VANETs. Dividos em simuladores acoplados, que fazem uso de simuladores de mobilidade e simuladores de rede separados, e os simuladores integrados.

O capítulo 5 é responsável por apresentar o detalhamento do protocolo DSRC/WAVE e do simulador NS-3, assim como os protocolos de roteamento estudados. Nessa seção também é demonstrada a forma com que as simulações foram realizadas, finalizando com a análise sobre os resultados obtidos.

Esta dissertação se encerra com o capítulo 6, no qual são expostas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho, junto com a identificação de possíveis tópicos para atividades futuras.



**Tabela 2 Calendarização das atividades da dissertação.**



## 2. ESTADO DA ARTE: REDES VEICULARES

O avanço das tecnologias de microprocessadores e de comunicação sem fio tem permitido o surgimento de um novo conceito de segurança veicular, o qual consiste na comunicação entre os próprios veículos e com a infraestrutura a fim de permitir a troca de informações proporcionando assim melhor desempenho, segurança, conforto, economia e tráfego seguro.

Este tipo de infraestrutura de comunicação é denotado por *Vehicular Ad-hoc Network* (VANET) e engloba várias formas de conectividade visando o aumento da segurança tanto do condutor, como dos demais usuários da via, sejam eles pedestres, ciclistas, etc. Proporcionando assim maior conforto e eficiência dos sistemas de transporte, bem como as características apresentadas no parágrafo anterior.

Em uma rede VANET os veículos e a infraestrutura são caracterizados cada um como um nodo computacional da rede (com capacidade de processamento), também chamados Nós apresentam funcionalidades e poder computacional com estratégias e algoritmos que auxiliam os condutores nas tomadas de decisão. Além disto, as VANETs proporcionam um

suporte aos chamados *cyber-physical systems* (CPS) [17], que visam integração da computação, redes de comunicação e componentes físicos, sendo um grande exemplo, os veículos autônomos.

As aplicações de uma rede VANET são inúmeras, como comunicação cooperativa entre veículos, alertas de risco de acidente, aplicações de entretenimento, entre outras. Através da Figura 4 podemos observar de forma ilustrativa as comunicações presentes neste cenário de dispositivos conectados que formam uma rede. As flechas de diferentes cores indicam as diferentes formas de comunicação V2V, V2R, V2P, V2I. E através delas os veículos estão a trocar informações sobre sua velocidade, localização, sentido, etc. Com o intuito de evitar e reduzir acidentes, assim como auxiliar no próprio fluxo do tráfego. Além das aplicações de segurança, estas tecnologias podem possibilitar o fornecimento de serviços de multimídia e dados, como áudio/vídeo ou serviços de localização, voltados ao entretenimento do usuário.

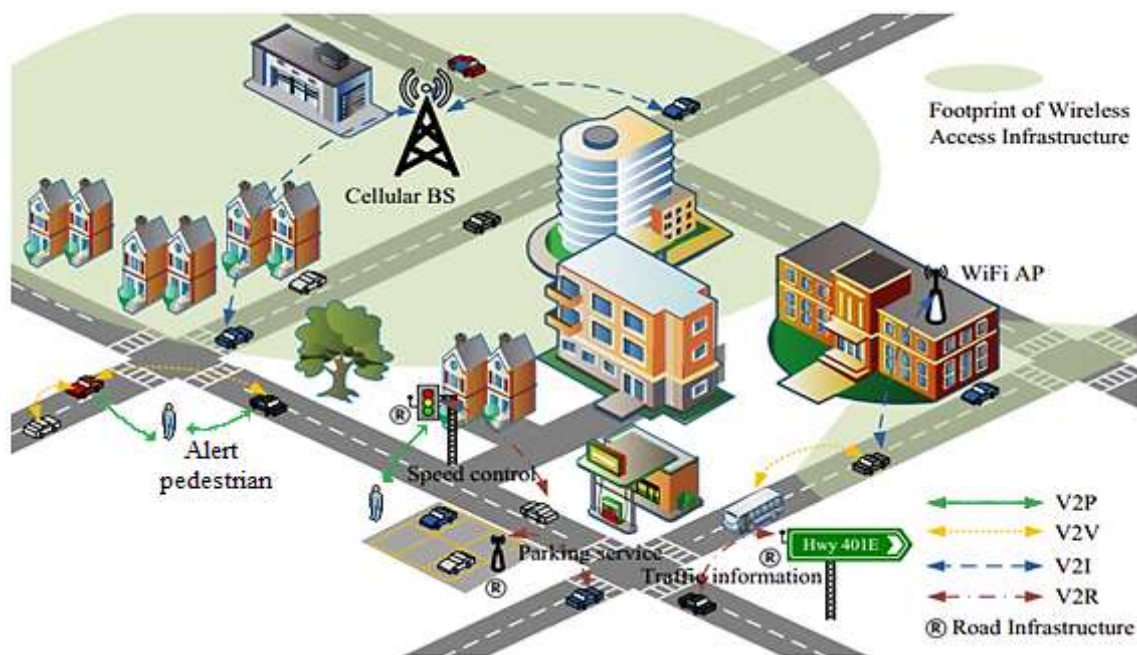


Figura 4 Aplicações de uma rede de comunicação veicular, adaptada de [18].

Uma breve taxonomia mostrando as diferentes conectividades presentes em uma rede interveicular é apresentada na Figura 5.

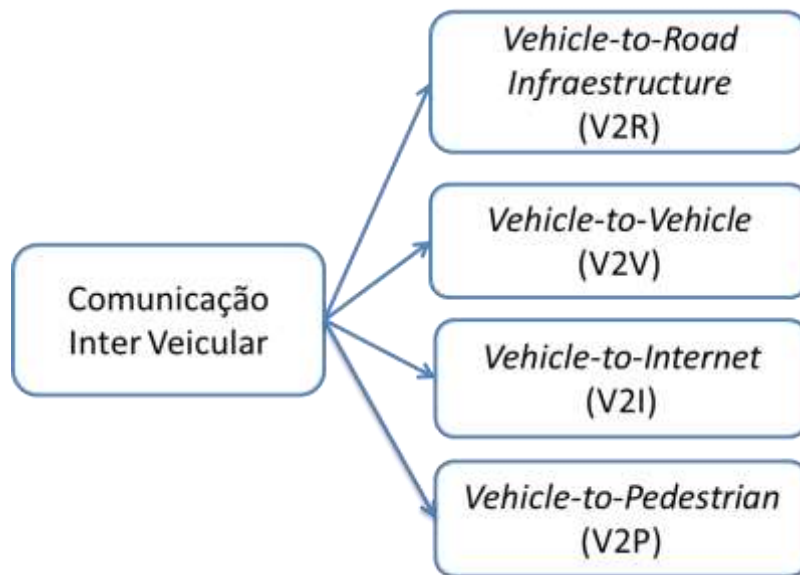


Figura 5 Taxonomia das aplicações de comunicação inter veicular.

## 2.1. COMUNICAÇÃO INTER VEICULAR

A comunicação inter veicular é caracterizada pelas aplicações onde ocorre a troca de informações do veículo com seu exterior, seja outros veículos, pedestres ou a infraestrutura viária. Diferente da comunicação intra veicular que através de soluções via cabeamento tais como o protocolo CAN (*Controller Area Network*), é responsável pela comunicação interna do veículo, ligando sensores e atuadores às unidades de controle (ECUs).

A seguir são detalhados as principais comunicações presentes em uma rede inter veicular.

A comunicação entre os veículos e a comunicação do veículo com a infraestrutura são denominadas respectivamente *Vehicle-to-Vehicle (V2V)* e *Vehicle-to-Road Infrastructure (V2R)* e estão ligadas à área de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). Estas duas formas de comunicação realizam a troca de informações, tais como noções de tráfego, controle de velocidade, alerta de colisão etc.

Com a conectividade V2V, os veículos estão em condições de trocarem informações entre si de forma a proporcionar aos motoristas uma condução mais segura e confortável, tendo conseqüentemente uma melhoria de desempenho do tráfego. Esta transmissão de dados tem como objetivo informar a posição, velocidade, desaceleração, mudança de trajeto, etc ou até mesmo em caso do veículo detectar algum buraco ou objeto na estrada, repassar esta

informação aos demais veículos, garantido assim que outros motoristas estejam alertas a situação.

Por sua vez, a conectividade do tipo *Vehicle-to-Road Infrastructure* (V2R) visa proporcionar um mecanismo de comunicação entre o veículo e a infraestrutura ambiente, seja ela urbana ou rodoviária, a fim de auxiliar principalmente no controle do tráfego. Nesta forma de comunicação os veículos estão a enviar e receber dados do sistema de tráfego, tais como, placas, semáforos, postes de iluminação, toda a infraestrutura viária em geral. Informações como destino, velocidade de deslocamento, etc, enviadas pelos veículos podem auxiliar na gestão das vias, possibilitando alertar aos condutores das condições de tráfego do trajeto que irão percorrer, permitindo-lhes evitar congestionamentos, calcular rotas mais rápidas, entre outras coisas.

Essa interação entre veículos e infraestrutura torna possível reduzir consideravelmente o número de acidentes tal como a aumentar a gestão dos sistemas de transporte, diminuindo o número de congestionamentos, o que afeta diretamente na redução das emissões de gases poluentes e tempo de deslocamentos. É uma situação do tipo ganha-ganha. Todos saem ganhando e se beneficiando deste sistema.

Com a proposta de melhorar a segurança dos ambientes, urbanos, rodoviários e fora de estrada, os veículos não devem somente estar a comunicar entre si e a infraestrutura, mas também com seus usuários vulneráveis (ex. pedestres, ciclistas) os quais interagirão através de seus dispositivos móveis (ex. *smartphones, tablets*) permitindo assim a cobertura completa de toda a via pelas redes VANETs, Figura 6, esta forma de comunicação é caracterizada como *Vehicle-to-Pedestrian* (V2P) e tem como função a emissão de alertas sobre os usuários da via [19], auxiliando em casos onde o pedestre pode estar fora do campo de visão do condutor.



**Figura 6** Alerta de pedestre [20].

Por fim apresenta-se a conectividade *Vehicle-to-Internet* (V2I), a qual visa englobar o automóvel no contexto da *Internet of Things* (IoT). Alguns autores utilizam o termo *Internet of Vehicles* (IoV) [13], e é através desta forma de conectividade que se deseja entregar aos usuários, sejam eles condutores, passageiros ou pedestres, serviços que lhe tragam maior conforto, tais como *infotainment*.

IoV é definido como um sistema de rede aberta e integrada com alta capacidade de gerenciamento, controlabilidade, operacionalização e credibilidade, e é composto por vários usuários, veículos e diversos dispositivos “inteligentes”, assim como diversas redes de comunicação. Com base na cooperação entre computação e comunicação, busca-se uma consciência colaborativa de seres humanos e veículos, a fim de permitir uma integração profunda entre homem-veículo-dispositivos-ambiente, reduzindo o custo social, promovendo a eficiência dos transportes, melhorando os níveis de serviço, e garantindo que os usuários estejam satisfeitos e possam desfrutar de seus veículos [13].

As tecnologias de comunicação estão a evoluir cada dia mais, e hoje em dia não são somente os *smartphones* que estão conectados, mas já começam a surgir casas inteligentes e muitos outros dispositivos que permitem a sua conectividade para a troca de informações.

Através do V2I o veículo poderá compartilhar dados de forma inteligente, como por exemplo, se o motorista estiver dirigindo para sua casa o veículo poderá enviar uma informação de quanto tempo demorará a chegar e assim a mesma se ajusta às definições estipuladas anteriormente pelo usuário como temperatura, luz ambiente, entre outras. É

possível também que através da lista de compras que o condutor fez em seu *smartphone* o carro possa informar em seu painel multimídia a rota do supermercado mais próximo.

O termo V2I em alguns casos é confundido com *Vehicle-to-Infrastructure*, porém para aplicações de comunicação com a infraestrutura se utiliza o acrônimo V2R (*Vehicle-to-Road Infrastructure*), ficando o V2I exclusivo para aplicações de comunicação do veículo com a *Internet*.

## **2.2. APLICAÇÕES**

Conforme elucidado nas seções anteriores, são inúmeras as possibilidades de emprego das redes VANETs, sendo estas classificadas como aplicações de segurança e aplicações não relacionadas com segurança. Desta forma, tem-se além dos requisitos funcionais para as aplicações, os requisitos de segurança ou dependabilidade.

### **2.2.1. APLICAÇÕES DE SEGURANÇA**

Essas aplicações visam mitigar ou prevenir que acidentes ocorram, auxiliando aos condutores na tomada de decisão de forma segura e em conformidade com as regras de trânsito. Abaixo são listados alguns exemplos de aplicações de segurança:

- **Alerta de violação de sinal de tráfego;**

Através desta aplicação o condutor é alertado caso algum outro veículo viole o sinal de tráfego de forma a evitar que uma possível colisão ocorra, além de informar ao próprio condutor o risco de cometer alguma infração de trânsito.

- **Alerta de mudança de direção/faixa;**

Esta aplicação tem como função alertar o condutor da situação dos demais veículos presentes no ambiente, enviando aviso caso o veículo a frente faça alguma mudança de direção ou parada brusca.

- **Alerta de ponto cego;**

É comum em algumas situações o condutor ter sua visibilidade reduzida devido a pontos cegos que não são cobertos pelos espelhos do veículo. Esta é uma situação de

risco durante ultrapassagens e conversões, e até mesmo com pedestres. Por meio da aplicação de alerta de ponto cego, estas situações podem ser amenizadas e evitadas.

- **Alerta de aproximação de veículos de emergência;**

Através desta aplicação os condutores podem ser alertados sobre a presença de veículos de emergências, tais como ambulâncias, caminhões de bombeiro e carros de polícia, antes mesmo que eles estejam em seu campo de visão, de forma a desobstruir a estrada e esses veículos tenham sua passagem facilitada em função de sua maior prioridade no tráfego.

- **Solicitação de serviços de ajuda;**

Em caso de algum acidente ou avaria do veículo, é possível que o condutor solicite ajuda através desta aplicação. Similar ao recurso *OnStar* [21] disponível pela montadora *General Motors* (GM).

- **Alerta de região**

Uma cidade pode ser mapeada na forma de zonas de tráfego, em que dependendo do perímetro de abrangência, têm-se restrições a serem atendidas. Por meio desta aplicação o condutor recebe alertas sobre as restrições da zona que está a transitar (zona escolar, zona de cruzamento de animais, etc.) e também condições da via, de forma a aumentar sua atenção.

- **Alerta de velocidade apropriada;**

Esta aplicação visa alertar o condutor sobre a velocidade permitida da via, e condução inapropriada de forma mitigar possíveis acidentes.

## **2.2.2. APLICAÇÕES NÃO RELACIONADAS COM SEGURANÇA**

Essas aplicações estão voltadas a proporcionarem ao condutor e demais passageiros maior conforto e interatividade, assim como permitir que a infraestrutura da via esteja a coletar informações para melhor gestão do tráfego. Abaixo segue alguns exemplos:



- **Alerta de vagas de estacionamento;**

Por meio desta aplicação o condutor é alertado onde há uma vaga de estacionamento disponível, evitando com que o mesmo perca tempo à procura e acabe assim atrapalhando o trânsito.

- **Coleta de informações da condição do tráfego;**

Uma vez que veículos e infraestrutura estão a trocar informações em tempo-real, a quantidade e a confiabilidade destas informações aumentam de modo a permitir que de forma cooperativa se proporcione uma melhoraria na gestão do sistema de tráfego.

- **Notificação de pontos de interesse;**

A comunicação veicular também pode ser utilizada em aplicações comerciais como anúncios de serviços regionais, restaurantes, bares, mercados, etc. Assim como possíveis pontos de interesse particular.

- **Informações de navegação;**

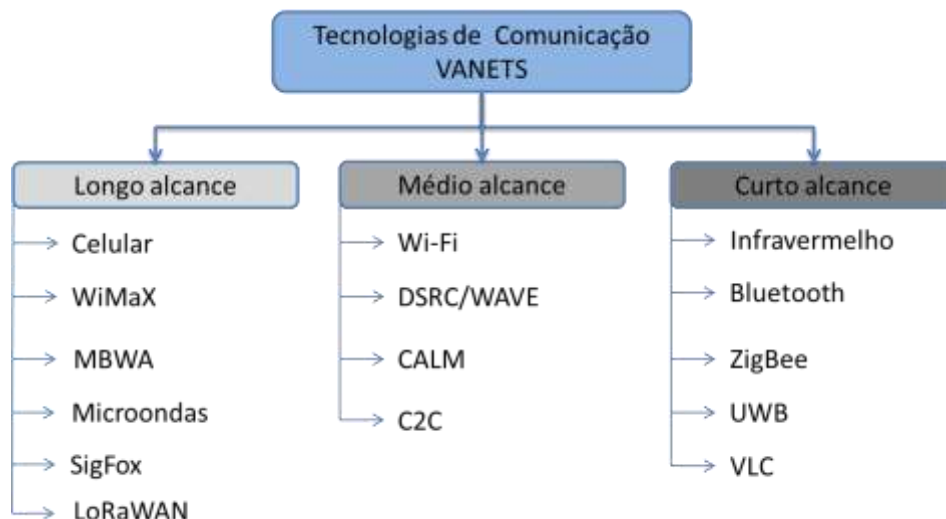
Uma aplicação de navegação visa auxiliar o condutor a chegar a um determinado destino, o que através de uma rede veicular se torna muito mais preciso uma vez que a infraestrutura está a se comunicar com o veículo a todo o momento permitindo correções ao sistema de localização via GPS e em tempo-real.

- **Dados de áudio e mídia;**

Este tipo de aplicação visa o entretenimento do condutor e demais passageiros, fornecendo acesso à *internet* para *download* de mídias de áudio e vídeo, ou busca de informações.

### 3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM REDES VEICULARES

Este capítulo se dedica a apresentar as características das tecnologias de comunicação sem fio que dão suporte as redes VANETs, sendo possível agrupá-las em três categorias em função do seu alcance, como é mostrado na Figura 7.



**Figura 7** Classificação das tecnologias de rede VANETs em função do alcance, baseado em [22].

Segue-se uma breve descrição de todas estas tecnologias possíveis em uma rede VANET.

### **3.1. ARQUITETURAS DE LONGO ALCANCE**

#### **3.1.1. REDE DE TELEFONIA CELULAR**

As redes de telefonia celular utilizam as ondas de rádio para transmissão de dados a longo alcance, no fornecimento de serviços móveis aos usuários.

A tecnologia 2G tem sua chegada por volta de 1990 e se caracteriza por ser completamente digital, garantindo segurança, robustez/fiabilidade, utilização eficiente do espectro e suporte a serviços de transmissão de dados, como acesso a *internet* a baixa velocidade. O protocolo mais popular desta tecnologia é o *Global System for Mobile Communications* (GSM), com uma taxa de transferência de 9,6 kbit/s.

A terceira geração, o 3G/UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), tem como ênfase o tráfego de dados, provendo uma taxa de transmissão com velocidade de até 2 Mbit/s. Em protocolos mais avançados como o 3G HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) são suportadas taxas de transmissão de até 14,4 Mbit/s, ideal para aplicações de tempo real devido à baixa latência (na ordem de 70 a 100 ms) [22].

A quarta geração 4G/LTE (*Long Term Evolution*) é uma evolução do sistema 3G, e tem como prioridade o tráfego de dados com uma taxa de transmissão de até 129 Mbit/s reduzindo ainda mais a latência da rede, para ordem de 50 ms.

Apesar da tecnologia 4G ainda não ter sido implementada em algumas regiões, trabalhos já são desenvolvidos em uma tecnologia sucessora, o 5G. A quinta geração ainda não tem uma definição oficial, mas promete trazer um aumento na quantidade de dados transmitidos, redução nos tempos de latência, assim como maior eficiência e redução nos custos. É esperado que os padrões do 5G sejam finalizados até 2018 ou 2019, e sua implementação se inicie a partir de 2020 [23].

A tecnologia 5G tem chamado também atenção de grandes montadoras como Audi, BMW e Daimler, que criaram uma aliança inter industrial, chamada *Automotive Association 5G*, que juntamente com fornecedores de equipamento de telecomunicações Ericsson, Huawei e Nokia, e fornecedores de semicondutores Intel e Qualcomm, com o objetivo de agrupar os recursos de P&D no desenvolvimento de tecnologias móveis 5G, de forma a acelerar a disponibilidade comercial de tal solução, aumentando assim a gama de produtos e serviços oferecidos para sistemas veiculares [24].

Alguns estudos utilizando redes de telefonia celular em redes de comunicação veicular já foram desenvolvidos, analisando o suporte a aplicações como a prevenção de acidentes e evitar congestionamentos. Por exemplo, [25] onde se realizou a avaliação do desempenho de tecnologias de redes celulares, como 3G (HSUPA) e 4G (LTE), sobre uma rede VANET. O resultado de tal estudo concluiu que o padrão (LTE) é o mais adequado por apresentar um baixo tempo de *delay* na ordem de 45,9 ms, satisfazendo as exigências de uma rede VANET. Entretanto, ressalta-se que a previsão de aumento futuro da quantidade de dados das comunicações veiculares pode vir sobrecarregar as redes celulares [26].

### **3.1.2. WiMAX**

A *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) é uma tecnologia regulamentada pelo IEEE e tem em seu objetivo fornecer comunicação sem fio a longas distâncias com altas velocidades de dados. Um protocolo mais recente chamado *WiMAX Mobile* (IEEE 802.16m) é o padrão de acesso sem fio de banda larga móvel do WiMAX, e utiliza-se de diversas técnicas de modulação avançadas como *Adaptive modulation and*

*coding* (AMC), *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) e *Fast Channel Feedback* (CQICH), habilitando taxas de transmissão de *downlink* de 63 Mbit/s e *uplink* de 28 Mbit/s [27].

Devido as suas características são diversas as aplicações suportadas pelo WiMAX móvel, tais como jogos interativos, videoconferência, *streaming*, *web* e mensagens instantâneas, *download* de mídias.

Apesar das boas características presentes na rede WiMAX, sua utilização esbarra na penetração de mercado que chegar a ser pouco significativa, isso se deve ao fato de disputar mercado com as redes de telefonia celular que já apresentam uma grande maturidade e estabilidade. O WiMAX começou como uma tecnologia de comunicação sem fio fixa e levou tempo para fornecer a funcionalidade que era esperado por usuários móveis, perdendo assim mercado [28].

A aplicação do WiMAX em redes VANETs é relatada em [29] onde é desenvolvida uma plataforma de simulação para teste da performance do envio de vídeo em tempo real para requisitos de segurança.

### **3.1.3. MBWA**

*A Mobile Broadband Wireless Access* (MBWA) ou IEEE 802.20 é uma rede desenvolvida para operar em bandas licenciadas abaixo de 3,5 GHz, sendo um sistema otimizado para transporte de dados IP (*Internet Protocol*), com alta taxa de dados por usuário acima de 1 Mbit/s e suporte de mobilidade veicular de até 250 Km/h.

O MBWA, junto com os padrões WiMAX e 4G, está classificado como uma rede *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN) e disputa com essas tecnologias o mercado. E assim como o WiMAX, apesar das boas características perde espaço devido ao fato de as tecnologias celulares dominarem o mercado com uma grande quantidade de redes operando mundialmente e sua maturidade já falado anteriormente [28].

### **3.1.4. MICROONDAS**

É a tecnologia de comunicação encontrada em sistemas de comunicação via satélites, RADAR, etc. Tipicamente utilizada nas transmissões de sinal de TV, devido ao longo

alcance. Porém é limitado por necessitar estar no campo de visão, *Line of Sight* (LoS). Pode ser utilizado como suporte a aplicações de segurança e *infotainment*, levando em consideração suas restrições [22].

### **3.1.5. SIGFOX**

O sistema de comunicação sem fio SigFox [31] é caracterizado por ser uma rede de longo alcance e de baixo consumo (LPWAN), emprega em sua camada física a modulação sem fios *Ultra Narrow Band* (UNB) e tem sua operação na faixa de frequência não licenciada ISM, 868 MHz na Europa e 915 MHz nos EUA.

Apresenta como característica principal seu custo/eficiência devido ao baixo consumo. Sendo seu enfoque em aplicações de *Internet of Things* (IoT) e *Machine-to-Machine* (M2M).

### **3.1.6. LORAWAN**

Também classificado como uma rede de longo alcance e de baixo consumo (LPWAN) o LoRaWAN [32], desenvolvido pela LoRa Alliance, utiliza-se da técnica de espalhamento espectral *Chirp Spread Spectrum* (CSS) para a transmissão de dados.

O espalhamento dos dados em diversos canais reduz o sinal de ruído e a interferência sem alterar a largura de banda, o que permite aumentar a capacidade do *gateway*. As taxas de transmissão em uma rede LoRa podem variar de 0,3 kbit/s até 50 kbit/s.

A sua largura de banda de operação é a faixa de frequência não licenciada ISM, 868 MHz na Europa e 915 MHz nos EUA.

De forma a maximizar a vida útil das baterias dos dispositivos utiliza um esquema de gerenciamento da taxa de dados e da saída RF chamado *Adaptive Data Rate* (ADR). A tecnologia LoRa foi concebida para casos de comunicação em que a quantidade de dados é pequena, como sensores remotos, máquinas inteligentes, etc.

## 3.2. ARQUITETURAS DE MÉDIO ALCANCE

### 3.2.1. WI-FI

O *Wireless fidelity* (Wi-Fi) estabelecido pela norma IEEE 802.11 é um dos padrões mais utilizados mundialmente na criação de redes locais sem fio (WLAN), devido ao seu baixo custo, alta taxa de transferência e fácil construção. Existem diversas versões nomeadamente:

- IEEE 802.11a: Este padrão Wi-Fi opera na faixa de frequência licenciada de 5 GHz com capacidade de transmissão de até 54 Mbit/s.
- IEEE 802.11b: Este padrão Wi-Fi opera na frequência não licenciada de 2,4 GHz e atinge taxas de transmissão com capacidade de até 11 Mbit/s, utilizando da técnica DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) para diminuição de interferência.
- IEEE 802.11g: Opera na mesma faixa de frequência do padrão 802.11b, porém usa da técnica de modulação *Orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM) e atinge taxas de transmissão de até 54 Mbit/s.
- IEEE 802.11n: Este padrão opera nas frequências de 2,4 GHz e/ou 5 GHz com capacidade de transmissão superior ao demais de até 100 Mbit/s. E utiliza como método de transmissão *Multiple Input Multiple Output - Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (MIMO-OFDM).

Infelizmente a maioria das redes Wi-Fi opera na faixa de frequência de 2,4 GHz, que é uma banda não licenciada, o que a torna uma rede com alta taxa de interferência. Consequentemente, não são adequados a aplicações de segurança. Embora os padrões com operação na faixa de frequência de 5 GHz possam dar suporte.

Alguns projetos de comunicação veicular fazem uso desta tecnologia. Como o projeto *Vehicle tracking system* (VETRAC) que se baseia na utilização dos padrões IEEE 802.11 b/g para o rastreamento e localização de um veículo em movimento [22].

### 3.2.2. DEDICATED SHORT RANGE COMMUNICATION (DSRC)

O DSRC é uma faixa do espectro eletromagnético designado para uso de aplicações automóveis e Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS). É uma tecnologia bastante promissora e que vem recebendo bastante investimento por parte das montadoras e governos, por apresentar uma característica de tempo de latência extremamente curto (aproximadamente de 100  $\mu$ s até 50 ms), atributo esse essencial para aplicações de segurança e controle, além de suporte à alta mobilidade, através de uma topologia dinâmica, e bom alcance de comunicação [33].

Porém é uma tecnologia não regularizada mundialmente e o espectro DSRC alocado para as aplicações de ITS sofre pequenas alterações entre alguns países, como é demonstrado na Tabela 3.

**Tabela 3 Classificação do espectro conforme alguns países.**

| <b>País</b> | <b>Espectro Alocado</b> | <b>Órgão/Documento regularizador</b>  |
|-------------|-------------------------|---|
| EUA         | 5,85 – 5,925 GHz        | <i>Federal Communications Commission</i><br>FCC 47 CFR [34]                             |
| EUROPA      | 5,855 – 5,925 GHz       | <i>European Telecommunications Standards Institute</i><br>ETSI - EN 302 571 V1.1.1 [35] |
| JAPÃO       | 5,775 – 5,845 GHz       | <i>Association of Radio Industries and Businesses</i><br>ARIB STD—T75 [36]              |

As redes de comunicação DSRC, são desenvolvidas sobre duas unidades: RSU (*roadside unit*) e OBU (*on-board unit*). Os RSUs se caracterizam por serem as unidades de infraestrutura viária, tais como semáforos, placas, entre outros, capacitados com a tecnologia DSRC permitindo a comunicação *Vehicle-to-Road Infrastructure* (V2R), a qual auxilia na gestão do tráfego. Por sua vez os OBUs são os próprios veículos capacitados com a tecnologia DSRC, permitindo que os mesmos estejam a trocar informações com os veículos ao seu redor, que se caracteriza pela comunicação *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), empregada principalmente na busca de evitar ou minimizar a ocorrência de acidentes.

Alguns protocolos padrões foram desenvolvidos para permitir a implementação do DSRC em aplicações de ITS. Segue uma breve descrição de dois deles o ASTM-DSRC e o WAVE.



### ▪ **Protocolo ASTM-DSRC**

É um dos primeiros padrões a serem desenvolvidos para as redes de comunicação veicular. Foi aprovado pela *Federal Communications Commission* (FCC) em junho de 2003, tendo por base a camada física da norma IEEE 802.11a e a camada de controle de acesso ao meio (MAC) da norma 802.11. Este padrão determina as especificações para as telecomunicações e intercâmbio de informações entre sistemas de beira de estrada (RSU) e veículos, na banda DSRC de 5,9 GHz [37].

O padrão ASTM foi utilizado como base para o desenvolvimento do padrão WAVE, apresentado ambos grandes similaridades. Sendo que o padrão mais adotado pela indústria é o WAVE, por contemplar outras camadas como, por exemplo, a camada de rede.

### ▪ **Protocolo WAVE**

O padrão WAVE (*Wireless access in vehicular environments*) foi desenvolvido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) a fim de regulamentar e padronizar a comunicação sem fio e ambiente veicular. Este padrão é a união da família de normas IEEE 1609 e a IEEE 802.11p.

A norma IEEE 802.11p [30] é uma alteração do padrão 802.11 para permitir a inclusão do ambiente veicular. Trata-se de um protocolo característico para a definição da camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC). O seu desenvolvimento é baseado na norma ASTM DSRC, sendo as demais camadas regulamentadas pelo padrão IEEE 1609. Na seção 5.1 é apresentado um melhor detalhamento do protocolo WAVE.

### **3.2.3. CALM**

Proposto pela *International Standard Organization* (ISO) o *Communications Access for Land Mobiles* (CALM) [38] baseia-se em uma estrutura cooperativa heterogênea a fim de fornecer uma comunicação contínua entre veículos e infraestruturas, e é desenvolvido pelo grupo de trabalho TC2014 WG16.

O CALM tem como característica suportar diferentes tecnologias de comunicação como: Infravermelho, GSM (2G, 3G), DSRC, WiMAX, *MM-wave*, Satélite, Bluetooth e Identificador de rádio frequência (RFID). Sendo capaz de selecionar a forma de transmissão em função da distância do veículo ao ponto de transmissão, seja uma RSU ou OBU. Para curtas e médias distâncias, recomenda o uso de comunicação infravermelho, *MM-wave*, enquanto que para longas distâncias baseia-se seu uso em sistemas de celular e comunicação via satélite [22].

A arquitetura deste padrão é demonstrada na Figura 8, a qual consiste em 6 partes: Aplicação, Gerenciamento, Acesso, Rede e Transporte, Suporte e Segurança.

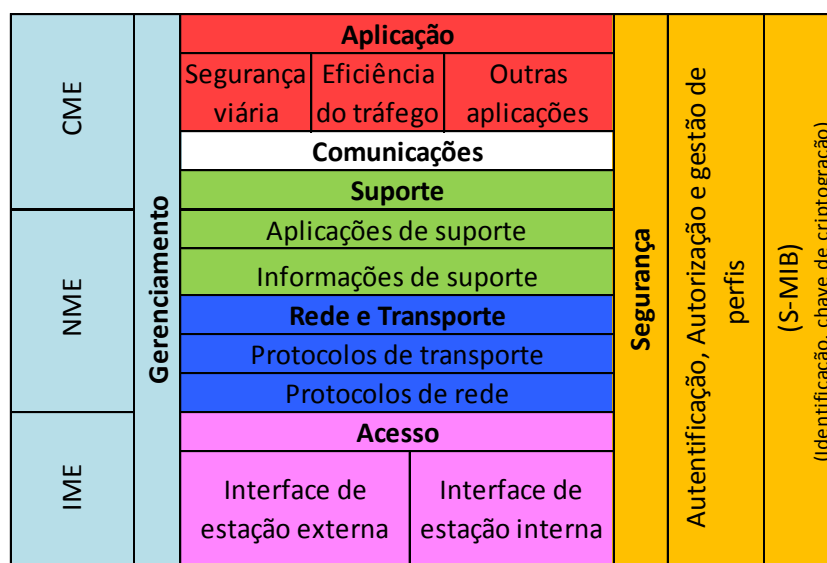


Figura 8 Arquitetura CALM [38].

O protocolo CALM possui três unidades de gerenciamento principais, a fim de prover características de flexibilidade e adaptação, que são:

- i. Unidade de gerenciamento de interface (IME) - Monitora e armazena o estado de cada interface de comunicação, junto com a qualidade do canal auxiliando na tomada de decisão.
- ii. Unidade de gerenciamento de rede (NME) - Organiza o processo de transferência de dados.

- iii. Unidade de gerenciamento CALM (CME) - Gerencia as exigências de transmissão para cada aplicação ITS. Além de interagir com a IME para executar a mídia seleciona e instruir a unidade NME para estabelecer a conexão.

O conceito de combinação de diferentes tecnologias proposto pelo protocolo CALM é o que o torna o mais flexível dos protocolos, por outro lado isto dificulta e muito sua implementação. Necessitando ainda um maior desenvolvimento para garantir a interoperabilidade entre as diversas formas de comunicação.

Existem alguns projetos como *Co-operative Networks for Intelligent Road Safety* (COOPERS) [39], *Cooperative Vehicle Infrastructure System* (CVIS) [40], SAFESPOT [41] que utilizam o protocolo CALM para a implementação de aplicações de segurança.

### 3.2.4. C2CNET

Proposto pelo *Car-to-Car Consortium* (C2C-CC) [42] a arquitetura C2CNet tem seu foco em aplicações de segurança e é apoiado pela indústria automobilística Europeia a fim de desenvolver um padrão aberto.

Esta arquitetura suporta três tecnologias de comunicação sem fio: o DSRC, as convencionais tecnologias de rede sem fio baseadas em IEEE 802.11a/b/g/n, e as tecnologias de telefonia celular como o 3G/UMTS. A Figura 9 abaixo demonstra a estrutura deste padrão.

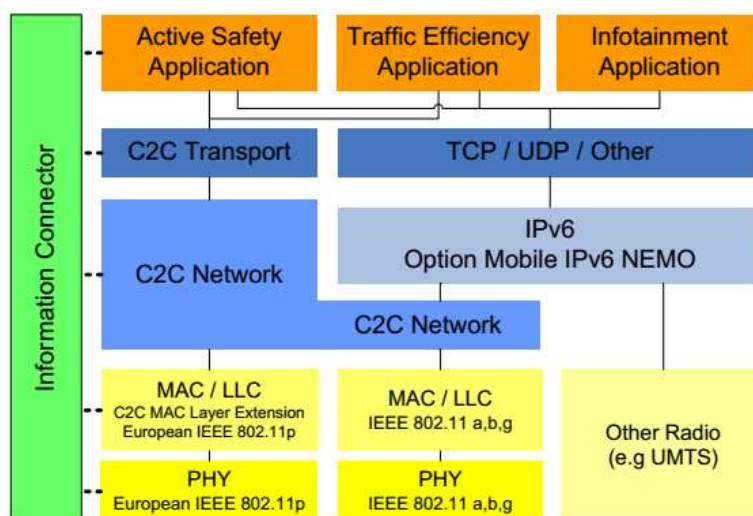


Figura 9 Arquitetura do protocolo C2CNet [42].

As camadas física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) são responsáveis por especificar a tecnologia de comunicação. A camada de rede fornece comunicações *multi-hop* sem fio com base na abordagem geográfica e de roteamento, e executa funções específicas para comunicações veiculares como controle de congestionamento.

Dois tipos de aplicações são suportados por essa arquitetura, aplicações não relacionadas com segurança as quais utilizando os tradicionais protocolos de comunicação como TCP, UDP e até mesmo o IPv6 na transmissão de dados para outros veículos e estações de estrada. Por outro lado para aplicações de segurança a camada de transporte fornece vários serviços para a segurança, como a multiplexação de dados e demultiplexação de acordo com os requisitos da aplicação.

O projeto europeu *Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles* (AdaptIVE) [43] tem como base a utilização do protocolo C2C, a fim de ampliar a interação entre o condutor e automóvel.

### **3.3. ARQUITETURAS DE CURTO ALCANCE**

#### **3.3.1. BLUETOOTH**

A tecnologia Bluetooth é um padrão de comunicação sem fio para comunicações de curto alcance, utilizado predominantemente em *Wireless Personal Area Network* (WPAN), operando na banda de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4 GHz.

Padrozinado pela norma IEEE 802.15.1, o Bluetooth emprega o uso da técnica de *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS), a fim de proporcionar a geração de um sinal robusto resistente a interferências. Sua taxa de transmissão varia de 1 Mbit/s até 4 Mbit/s. E tem sua operação em três diferentes classes de dispositivos: classe 1, classe 2 e classe 3, as quais tem seu raio de alcance em 100 metros, 10 metros e 1 metro respectivamente.

Na literatura é possível encontrar alguns trabalhos que utilizam o Bluetooth como alternativa a rede VANET, como por exemplo, [44] que apresenta a proposta da utilização da tecnologia Bluetooth *Low Energy* (BLE) na troca de dados entre veículos numa área de alcance de até 100 metros, possibilitando algumas aplicações veiculares. As aplicações

possíveis incluem todos os cenários onde a transmissão de dados não seja sensível a atrasos como, por exemplo, gestão do tráfego, alertas de região, etc.

### **3.3.2. ZIGBEE**

É uma tecnologia de comunicação que foi desenvolvida para redes WPANs com baixa potência de operação, baixa taxa de transmissão e baixo custo de implementação. Estabelecido pelo padrão IEEE 802.15.4, opera nas frequências de 868 MHz na Europa, 902-928 MHz nos Estados Unidos e 2,4 GHz mundialmente, dispondo de um alcance de até 100 metros usando da técnica de modulação *Offset Quadrature Phase Shift Keying* (O-QPSK) [45].

É aplicado principalmente em áreas como a domótica, redes de sensores sem fio, etc. devido a sua característica de baixo consumo, e em alguns casos aplicações V2V e V2I, como por exemplo, [46] que baseia seu estudo na utilização da tecnologia Zigbee para rastrear as coordenadas de posição veicular durante missões de resgate em acidentes veiculares.

### **3.3.3. INFRAVERMELHO**

Esta tecnologia se baseia na transmissão de dados através do espectro de luz invisível na faixa de 300 GHz a 400 THz, e é padronizada pela *Infrared Data Association* (IrDA). Existe uma variedade de protocolos utilizados em redes móveis que se baseiam na tecnologia infravermelho, os mais utilizados em redes locais são o *Infrared Mobile Communications* (IrMC) e o *Infrared Lan Access* (IrLAN).

Através da tecnologia infravermelho as taxas de transmissão podem variar de 115 kbit/s até 4 Mbit/s, e com um alcance de aproximadamente 100 metros.

A transmissão de dados via infravermelho sofre restrição devido a obstáculos, sendo necessário que o receptor esteja em seu campo de visão para que a transmissão ocorra, obrigando sua utilização a comunicações de curto alcance. Porém, apresenta a habilidade de suporte a redes com alto tráfego e grande largura de banda [22], o que leva a sua aplicação em alguns projetos de ITS como o *Vehicle Information and Communication System* (VICS), o qual visa habilitar a transmissão de informações de condições de tráfego

em tempo-real aos veículos através de duas soluções *beacons*. A primeira por meio de ondas de rádio, e outra utilizando da tecnologia de comunicação infravermelho [47].

### **3.3.4. ULTRA WIDEBAND (UWB)**

O *Ultra WideBand* é definido pelo padrão IEEE 802.15.3, e opera na faixa de frequência não licenciada de 3,1 GHz à 10,6 GHz, sendo aplicado comumente em aparelhos eletrodomésticos e dispositivos móveis. Possui como características principais baixo consumo, robustez e uma alta taxa de transmissão de até 480 Mbit/s, sobre um alcance de até 10 metros.

Em [48] é relatado um estudo utilizando a tecnologia *Impulse Radio Ultra wideband* (IR-UWB), uma pequena variação do UWB, como uma nova forma de comunicação inter veicular.

### **3.3.5. VISIBLE LIGHT COMMUNICATION (VLC)**

O VLC é uma tecnologia de comunicação que visa a transmissão de dados através do espectro de luz visível, sendo uma área de pesquisa nova e com grande expansão nos últimos anos. Devido ao potencial de permitir agregar a infraestrutura de iluminação existente uma segunda função, a de comunicação. Com isto tem seu baixo custo de implementação, além de possuir uma imensa faixa de espectro disponível.

Tem como princípio de funcionamento a modulação da fonte de luz através da intensidade ou frequência, desta maneira os dados transmitidos ao serem recebidos por um receptor, que detecta as variações sofridas pela luz, os traduzem na informação desejada.

Padronizado pela norma IEEE 802.15.7 [49], esta tecnologia de comunicação está se desenvolvendo graças a grande evolução envolvendo a iluminação de estado sólido, diodos emissores de luz (LEDs), que teve um crescimento em larga escala na área de iluminação devido as suas características como longo tempo de vida e alta eficiência energética. Mas, além disso, tais dispositivos apresentam uma segunda possibilidade de aplicação na área de comunicação, devido a sua característica de suportar altas taxas de comutação. O que permite que dados binários sejam enviados em altas frequências de 400 THz (750 nm) a

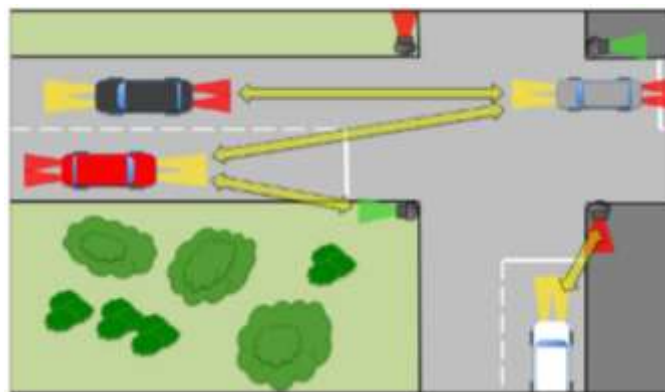
800 THz (375 nm), através da modulação da intensidade do sinal, sendo imperceptível ao olho humano.

O atual estado da arte que esta tecnologia apresenta já possibilitou taxas de comunicação de até 3 Gbit/s para ambientes internos [50] e 1,8 Gbit/s para ambientes externos com um alcance de até 50 metros [51], em transmissões com topologia fixa e através de técnicas avançadas como a *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) e a modulação *Carrierless Amplitude Phase* (CAP).

A tecnologia dos diodos emissores de luz chegou rapidamente ao setor automotivo, podemos encontra-lá presente em luzes de freio, sinalização e faróis de iluminação de veículos novos, devido as suas excelentes características como, baixo consumo, vida útil e resistência a vibração.

Esses avanços auxiliaram para o surgimento do conceito de *Vehicular Visible Light Communication* (V2LC), o qual traz a proposta de tornar as luzes automotivas inteligentes, combinando as funções de iluminação e sinalização, com comunicação e posição [52]. Além das luzes dos automóveis, esta tecnologia se aplica a infraestrutura de tráfego, como sinaleiros, placas de sinalização, que na maioria dos casos já utilizam da iluminação via LED, habilitando assim transmissão de informações como, situação do tráfego, acidentes, etc.

A Figura 10 busca ilustrar o sistema de comunicação veicular através do VLC, nela observamos que os faróis e lanternas dos veículos além de iluminar e sinalizar, estão a transmitir informações, assim como o sistema de sinalização da infraestrutura de tráfego.



**Figura 10** Ilustração da comunicação V2LC [53].

### 3.4. ANÁLISE COMPARATIVA DAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO

A escolha da tecnologia a ser utilizada na elaboração de uma rede VANET é de suma importância, uma vez que a mesma deve dar suporte necessário para as aplicações, sejam de segurança ou não relacionadas com segurança.

Na Tabela 4, é apresentada uma comparação entre as tecnologias de comunicação sem fio classificadas em curto, médio e longo alcance, sendo destacadas na tabela através de tons de cinza claro, médio e escuro, respectivamente. Os parâmetros avaliados foram: taxa de transmissão que tem grande importância em aplicações de *infotainment* que necessitam de altas taxas, o alcance que a tecnologia atinge determina a área de serviço, o parâmetro de interferência do sinal afeta diretamente no alcance e na taxa de entrega sendo um fato decisivo para aplicações de segurança, o custo é um fator que se deve levar em consideração em uma rede VANET, e por fim o parâmetro de segurança avalia qual é o nível com que os dados transmitidos estão protegidos.

**Tabela 4** Comparação entre as tecnologias de comunicação sem fio [22].

| Tecnologia de Comunicação sem fio | Frequência          | Taxa de transmissão   | Alcance | Interferência | Custo    | Segurança |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|---------|---------------|----------|-----------|
| Rede celular (2G/3G/4G)           | Depende do operador | 384 Kbps - 129 Mbit/s | 50 km   | Baixa         | Alto     | Alta      |
| WiMAX (802.16m)                   | 2,3/2,5/3,5 GHz     | 75 - 300 Mbit/s       | 50 km   | Alta          | Alto     | Alta      |
| MBWA (802.20)                     | 3,5 GHz             | 4.5 Mbit/s            | 15 km   | Alta          | Alto     | Alta      |
| Microondas                        | 1 - 3 GHz           | 16 Gbit/s             | 30 km   | Alta          | Alto     | Baixa     |
| SigFox                            | 868 MHz<br>915 MHz  | 100 bit/s             | 10 km   | Baixa         | Baixo    | --        |
| LoRa                              | 868 MHz<br>915 MHz  | 50 kbit/s             | 8 km    | Baixa         | Baixo    | Alta      |
| Wi-Fi (802.11a)                   | 5,1/5,8 GHz         | 54 Mbit/s             | 100 m   | Baixa         | Alto     | Baixa     |
| Wi-Fi (802.11b)                   | 2,4 GHz             | 11 Mbit/s             | 100 m   | Alta          | Moderado | Baixa     |
| Wi-Fi (802.11g)                   | 2,4 GHz             | 54 Mbit/s             | 140 m   | Alta          | Moderado | Baixa     |
| Wi-Fi (802.11n)                   | 2,4/5 GHz           | 100 Mbit/s            | 250 m   | Alta          | Alto     | Alta      |



| Tecnologia de Comunicação sem fio | Frequência                    | Taxa de transmissão        | Alcance | Interferência | Custo | Segurança |
|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------|---------------|-------|-----------|
| DSRC (WAVE)                       | 5,9 GHz                       | 27 Mbit/s (*)<br>54 Mbit/s | 1 km    | Baixa         | Alto  | Alta      |
| CALM                              | 5 GHz                         | 6 Mbit/s                   | 10 km   | Alta          | Alto  | Alta      |
| C2C                               | 5,855 – 5,925 GHz             | 3 - 27 Mbit/s              | 1 km    | Moderada      | Alto  | Alta      |
| Bluetooth (802.15.1)              | 2,4 GHz                       | 1 - 24 Mbit/s              | 100 m   | Alta          | Baixo | Baixa     |
| ZigBee (802.15.2)                 | 2,4 GHz<br>868 MHz<br>915 MHz | 250 kbit/s                 | 100 m   | Alta          | Baixo | Alta      |
| UWB (802.15.3)                    | 3,1 – 10,6 GHz                | < 100 Mbit/s               | 10 m    | Baixa         | Baixo | Alta      |
| Infravermelho                     | 300 GHz - 400 THz             | 115 kbit/s - 4 Mbit/s      | 100 m   | Baixa         | Baixo | Alta      |
| VLC (802.15.7)                    | 400 - 800 THz                 | 11.67 - 266.6 kbit/s       | 100 m   | Alta          | Baixo | Alta      |

(\*) 27Mbit/s para a canal de 10 MHz / 54 Mbit/s para o canal de 20 MHz

Ao avaliar as tecnologias de comunicação sem fio notamos que os padrões Wi-Fi (802.11a/b/g/n) não apresentam boa viabilidade para aplicações em redes VANET uma vez que possuem altas taxas de interferência e baixos níveis de segurança.

As redes de celular, WiMAX e MBWA apresentam boas características para o fornecimento de aplicações de *infotainment*, como acesso a *internet* e *streaming* de vídeo, devido ao bom alcance, suportar altas taxas de mobilidade e boa taxa de transmissão.

O SigFox e o LoRa tratam-se de redes com baixa taxa de transmissão de dados, o que acaba por limitar sua utilização em aplicações de comunicação veicular.

Os padrões DSRC, CALM e C2C foram padrões desenvolvidos especificamente para a comunicação veicular, apresentando excelentes características como um alcance razoável, boa taxa de transmissão e alto nível de segurança. Sendo a principal característica destes padrões o baixo tempo de latência. Contudo, CALM e C2C são padrões em desenvolvimento que englobam outras formas de comunicação, como abordados nas seções anteriores, e devido a isto não apresentam uma boa interoperabilidade.

As tecnologias de curto alcance Bluetooth, ZigBee, Infravermelho e UWB, são utilizadas principalmente em redes WPAN, devido ao curto alcance e alta taxa de transmissão, principalmente em aplicações de conforto como por exemplo *electronic tool collection* (ETC), que auxiliam na redução de filas e congestionamento em pedágios, através do débito automático das taxas.

Por fim o VLC também categorizado nas tecnologias de curto alcance, apresenta grande potencial devido às suas características, como boa taxa de transmissão e alto nível de segurança. Porém se trata de uma tecnologia recente que ainda necessita de um maior amadurecimento através de estudos e pesquisas.

Concluído o estudo e avaliação de todas as tecnologias de comunicação possíveis em uma rede veicular chega-se a conclusão que a tecnologia habilitadora que possui as melhores características para uma rede VANET é a DSRC junto ao protocolo WAVE, devido ao fato de serem exclusivamente desenvolvidas para esta aplicação, com características de boa mobilidade, topologia dinâmica, bom alcance, boas taxa de transmissão com baixa latência e alto nível de segurança. E, além disso, é possível encontrar na bibliografia inúmeros estudos que suportam sua validade.

Portanto, motivado pelos fatos apresentados anteriormente à tecnologia de comunicação que será utilizada neste estudo é o DSRC/WAVE, sendo apresentado na seção 5.1 um detalhamento mais aprofundado.

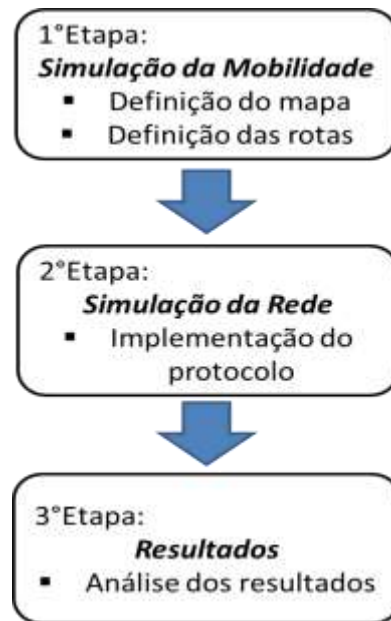


## 4. ANÁLISE COMPARATIVA DOS SIMULADORES DE REDES VEICULARES

Neste trabalho, será realizado um estudo sobre os protocolos de roteamento de uma rede de comunicação veicular em um ambiente de simulação. Uma vez que através da simulação é possível fazer a alteração de variáveis de forma mais simples, além de permitir a repetição da análise, contrariamente ao desenvolvimento de um protótipo que na maioria dos casos apresenta elevada complexidade e alto custo.

A simulação de uma rede VANET contém duas componentes que são a simulação da mobilidade dos veículos e a simulação da rede de comunicação. O simulador de mobilidade é responsável por produzir as rotas pelas quais os Nós móveis (veículos) irão se deslocar e o simulador de rede trata de gerar e gerenciar o tráfego de dados entre os Nós.

Para a realização da simulação são seguidas três etapas, como demonstra o fluxograma presente na Figura 11.



**Figura 11** Etapas de simulação de uma rede veicular.

A primeira etapa da simulação se inicia com a definição do mapa, que é responsável por definir as vias que limitam o movimento do veículo, assim como a rota que o veículo irá percorrer. Ao fim dessa parte são geradas as entradas necessárias para a segunda etapa responsável pela simulação da rede.

No simulador de rede é especificado o protocolo sobre o qual os dados serão transmitidos, sendo essencial para avaliação do desempenho dentro do cenário criado.

Por fim a última etapa da simulação de uma rede veicular é a avaliação dos resultados gerados pela união das etapas anteriores.

#### **4.1. SIMULADORES DE MOBILIDADE**

Para que um simulador de mobilidade represente de forma mais fiel possível o mundo real, são utilizados os chamados modelos de mobilidade os quais são responsáveis por definir o conjunto de regras que cadenciam o movimento dos veículos utilizados pelos simuladores de rede, baseado nas características que restringem o cenário como as delimitações das ruas, intersecções, edifícios e os movimentos dos veículos.

Segundo [54] os modelos de mobilidade são classificados em macroscópico e microscópico, de acordo com o nível de detalhes que eles fornecem.

- Modelo Microscópico - Se concentra nas características de comportamento do veículo, como por exemplo, a sua aceleração e desaceleração.
- Modelo Macroscópico - Tem uma abordagem mais geral, tratando características relacionadas ao fluxo, tais como velocidade da via e densidade.

Analiticamente a definição de mobilidade foi proposta por Larsson et al em [54] e expressa à mudança topológica da rede, em função da velocidade, padrão de movimento e distância entre os Nós, sendo chamado de fator de mobilidade (mob). Para a obtenção deste fator calcula-se primeiramente a distância média de cada nó para todos os outros Nós, como mostra a equação (1) para o nó x no tempo t. Onde,  $dist(n_x, n_i)$  é a distância entre os Nós x e y e a variável n é a quantidade de Nós.

$$A_x(t) = \frac{\sum_{i=1}^n dist(n_x - n_i)}{n - 1} \quad (1)$$

A mobilidade para o nó x é dada pela equação (2), sendo T o tempo de simulação e  $\Delta t$  o período de tempo usado na computação.

$$M_x = \frac{\sum_{t=0}^{T-\Delta t} |A_x(t) - A_x(t + \Delta t)|}{T - \Delta t} \quad (2)$$

E finalmente se calcula o fator de mobilidade, equação (3), que é a soma da mobilidade de todos os Nós divididos pelo número de Nós (n).

$$Mob = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{n} \quad (3)$$

A unidade para o fator de mobilidade é m/s. Por conseguinte, o fator de mobilidade dá uma imagem da velocidade média da mudança de distância entre os Nós.

A seguir são apresentados os principais modelos de mobilidade utilizados para a simulação de redes veiculares.

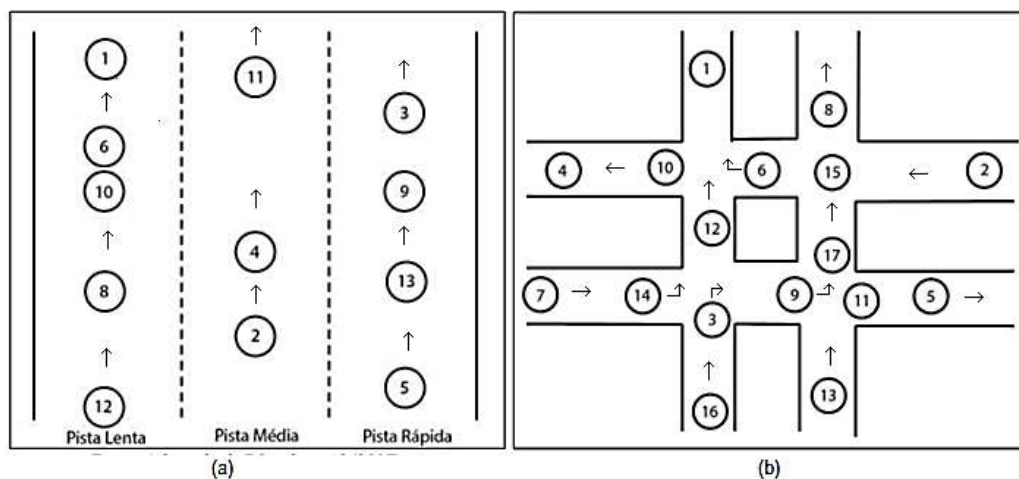
▪ **Modelos de Mobilidade em redes VANET**

São modelos especificamente desenvolvidos para redes VANET, os quais possuem restrições geográficas que melhor simulam o comportamento de um veículo [55]. Na literatura os principais modelos abordados são *Freeway*, *Manhattan* e mapas de cenário real.

O modelo de mobilidade *Freeway* é definido por mapas que simulam ambientes de autoestrada, as quais possuem diversas vias em ambas as direções. Neste modelo o veículo tem seu movimento limitado, pois mobilidade dos veículos esta restrita somente a mudanças de faixa, o que o torna um cenário pouco realista.

Diferente do *Freeway* o modelo de mobilidade *Manhattan* simula um ambiente urbano, caracterizado por ruas verticais e horizontais que permite o deslocamento livre dos veículos de norte-sul e leste-oeste, e ao atingirem um cruzamento o veículo pode decidir se irá virar à direita, à esquerda ou continuar reto na mesma direção. [56] Ao contrário do modelo *Freeway* este modelo permite que os veículos mudem de rota durante o trajeto [57].

A Figura 12 demonstra a estrutura dos modelos *Freeway* e *Manhattan*, onde os círculos numerados representam os veículos se deslocando pelo mapa, e as flechas indicam os sentidos de deslocamento.

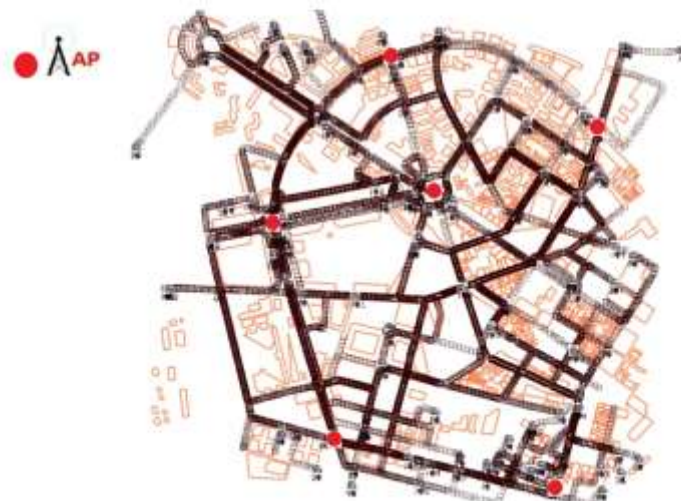


**Figura 12** Modelo de mobilidade *FreeWay* (a) e *Manhattan* (b), adaptada de [57].

Além dos modelos apresentados alguns simuladores de mobilidade permitem a importação de mapas reais de forma a tornar a simulação mais real. Como demonstra a Figura 13, na qual as informações das ruas da cidade de Tarragona na Catalunha, Espanha são extraídas de um mapa real para geração de um modelo.



(A) Mapa real



(B) Mapa gerado

**Figura 13** Modelo de mobilidade de cenário real (imagem A) e cenário gerado (imagem B), adaptada de [58].



A geração de modelos realísticos é feita através da importação de arquivos em bases de dados como *Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing* (TIGER) [59] e Google Earth [60]. A utilização de modelos de mobilidade baseado em cenários reais permite uma melhor compreensão do sistema, por representar um deslocamento mais fiel dos veículos. Isto permite que os resultados obtidos em simulação tenham maior proximidade ao mundo real.

A seguir são apresentados alguns simuladores de mobilidade bem como os principais simuladores utilizados nos estudos de redes VANET. Nesse estudo foram consideradas somente ferramentas gratuitas e que possuem seu código fonte aberto, ou possuem versões acadêmicas.

#### **4.1.1. SIMULATION FOR URBAN MOBILITY (SUMO)**

SUMO é um simulador de mobilidade desenvolvido pelo Centro Aeroespacial da Alemanha (DLR) em 2001 [61], bastante utilizado em estudos de sistemas de transporte por se de código aberto, o que lhe permite uma constante evolução, tanto pela comunidade que o utiliza como pelos desenvolvedores.

Tem como característica ser um simulador microscópico que engloba um pacote de aplicações, o que permite a individualização de cada veículo, coletando informações como posição, velocidade, tipo de veículo, faixa que irá usar, e até mesmo criar a rede de estrada para a simulação através do aplicativo “netgen” ou importar mapas digitais disponíveis na *internet* por meio do “netconvert” [57].

Isto permite que através do SUMO possa-se simular desde simples redes de tráfego até ambientes mais complexos.

#### **4.1.2. MOBILITY MODEL GENERATOR FOR VEHICULAR NETWORKS (MOVE)**

MOVE [61] é um simulador de mobilidade de código aberto rodado em JAVA que tem como base a plataforma do simulador SUMO, com o objetivo de simplificar a criação de um modelo de mobilidade.

Através do MOVE é possível gerar dois tipos de modelos, um é o modelo de mobilidade e o outro é o modelo de tráfego. Além de permitir que o usuário crie uma topologia customizada ou realize a importação de um mapa.

A aplicação MOVE fornece uma interface gráfica que permite ao usuário gerar rapidamente cenários de simulação realista, sem o incômodo de escrever *scripts* de simulação, bem como aprender sobre detalhes internos do simulador. Porém o MOVE tem dependência do simulador SUMO.

#### 4.1.3. CITYMOB

CityMob [62] é um gerador de padrão de mobilidade desenvolvido especificamente para o estudo de diferentes modelos de mobilidade em redes VANET. Nele são propostos diferentes modelos de mobilidade que combinam certos níveis de aleatoriedade, para tentar representar ambientes realistas. Os modelos são:

- Modelo Simples (SM): Modelos padrões de mobilidade vertical e horizontal, sem mudanças de direção, e semáforos não são suportados.
- Modelo de *Manhattan* (MM): Modela a cidade como uma grade estilo *Manhattan*, com um tamanho de bloco uniforme em toda a área da simulação. Todas as ruas são de mão dupla, com uma faixa em cada sentido. Os movimentos dos carros são limitados por vias. A direção de cada veículo em cada momento é aleatória. Além disso, este modelo simula semáforos em posições aleatórias (não apenas na passagem), e com diferentes atrasos. Quando um veículo chega a um semáforo, ele permanecerá parado até a virada do semáforo para verde.
- Modelo *Downtown* (DM): Este modelo apresenta as mesmas características do modelo *Manhattan*, como semáforos e limitação pelas vias, porém adiciona densidade de tráfego. Em uma cidade real, o tráfego não é uniformemente distribuído e há zonas com maior densidade de veículo. Estas zonas são geralmente no centro, e os veículos devem mover-se mais lentamente do que na periferia. Com isso consegue-se a simulação de um ambiente mais realístico.

#### **4.1.4. VANETMOBISIM**

O VanetMobiSim [63] é um simulador *open source* baseado na tecnologia JAVA que permite gerar modelos de mobilidade tanto para níveis macroscópicos como microscópicos. Ao nível macroscópico permite a importação de mapas da base de dados *Topologically Integrated Geographic Encoding* (TIGER) ou gerá-los aleatoriamente. A nível microscópico, o VanetMobiSim suporta modelos de mobilidade, tais como Modelo de Condução Inteligente com Gestão de Intersecção (IDM/IM), Modelo de Condução Inteligente com Mudança de Faixa (IDM/LC) e um Modelo de Ultrapassagens (MOBIL), que interage com o modelo IDM/IM para gerenciar mudanças de faixa, acelerações e desacelerações do veículo, proporcionando uma interação realista.

O VanetMobiSim pode gerar diferentes formatos de arquivos de saída, permitindo que diversos simuladores de redes suportem como NS2 e GloMoSim, entre outros.

#### **4.1.5. STREET RANDOM WAYPOINT (STRAW)**

O simulador de mobilidade STRAW [64] é parte do projeto C3 (*Car-to-car Cooperation*) e baseia-se no modelo *Random Waypoint* (RWP), modelo bastante utilizado em redes MANETs, contudo ao contrário do modelo RWP tradicional, este modelo determina a trajetória de um veículo em cada intersecção.

O STRAW caracteriza-se por ser um modelo de tráfego realístico por utilizar mapas reais que fornecem bons resultados de simulação. Porém os arquivos de saída gerados são somente lidos pelo simulador JiST/SWANS.

#### **4.1.6. BOONMOTION**

O BoonMotion [65] é um *software* JAVA que permite a criação e análise de cenários de mobilidade, comumente utilizados na investigação de redes *ad hoc* móveis (MANETs).

Tem como características principais suportar diversos modelos de mobilidade, entre eles *Random Waypoint*, *Gauss-Markov*, *Manhattan Grid*, *Reference Point Group Mobility*, etc. A criação destes modelos pelo *software* é bastante simplificada, permitindo a configuração de diversos parâmetros, como velocidade de deslocamento, probabilidade de pausa, etc.

Os cenários criados pelo BonnMotion podem ser exportados para diversos simuladores de rede, tais como NS-2, NS-3, GloMoSim/QualNet, etc.

## 4.2. COMPARAÇÃO DOS SIMULADORES DE MOBILIDADE

A Tabela 5 a seguir traz um resumo comparativo das principais características entres os simuladores de mobilidade apresentados.

**Tabela 5 Comparação entre os simuladores de mobilidade.**

|                                | SUMO     | MOVE                                | CityMob      | VanetMobiSim                        | STRAW    | BoonMotion               |
|--------------------------------|----------|-------------------------------------|--------------|-------------------------------------|----------|--------------------------|
| <b>Software</b>                |          |                                     |              |                                     |          |                          |
| Gratuito                       | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✓                        |
| Linguagem                      | C++      | JAVA                                | C            | JAVA                                | JAVA     | Java                     |
| Código aberto                  | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✓                        |
| Interface Gráfica              | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✗                        |
| Desenvolvimento Contínuo       | ✓        | ✗                                   | ✓            | ✗                                   | ✗        | ✓                        |
| Configuração                   | Moderado | Fácil                               | Fácil        | Moderado                            | Moderado | Fácil                    |
| Uso                            | Difícil  | Moderado                            | Fácil        | Moderado                            | Moderado | Fácil                    |
| Exemplos Disponíveis           | ✓        | ✓                                   | ✗            | ✓                                   | ✗        | ✓                        |
| Simuladores de rede suportados | OMNet++  | NS-2<br>NS-3<br>GloMoSim<br>OMNet++ | NS-2<br>NS-3 | NS-2<br>NS-3<br>GloMoSim<br>OMNet++ | SWANS    | NS-2<br>NS-3<br>GloMoSim |
| Importa outros Formatos        | ✓        | ✓                                   | ✗            | ✓                                   | ✗        | ✓                        |
| <b>Mobilidade</b>              |          |                                     |              |                                     |          |                          |
| Macroscópico                   | ✓        | ✓                                   | ✗            | ✓                                   | ✗        | ✓                        |
| Microscópico                   | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✗                        |
| Múltiplas vias                 | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✗                        |
| Mudança de faixa               | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✓                        |
| Restrição de velocidade        | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✓                        |
| Sinais de tráfego              | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✓                                   | ✓        | ✗                        |
| Gerenciamento de interseção    | ✓        | ✓                                   | ✗            | ✓                                   | --       | ✗                        |
| Diferentes tipos de veículos   | ✓        | ✓                                   | ✓            | ✗                                   | --       | ✗                        |
| Cálculo de rota                | ✓        | ✓                                   | ✗            | ✓                                   | ✓        | ✗                        |

|                | SUMO | MOVE | CityMob | VanetMobiSim | STRAW | BoonMotion |
|----------------|------|------|---------|--------------|-------|------------|
| <b>Mapas</b>   |      |      |         |              |       |            |
| Cenário Real   | ✓    | ✓    | ✗       | ✓            | ✓     | ✗          |
| Usuário define | ✓    | ✓    | ✗       | ✓            | ✗     | ✓          |
| Manhattan      | ✗    | ✗    | ✓       | ✗            | ✗     | ✓          |
| Aleatório      | ✓    | ✓    | ✓       | ✓            | ✗     | ✓          |

### 4.3. SIMULADORES DE REDE

Os simuladores de rede são utilizados na análise do comportamento da rede sobre diferentes condições, desta forma é possível identificar e estudar possíveis pontos de melhoria.

Apresentam também grande importância no desenvolvimento de novos padrões em redes VANET, uma vez que permitem simular de maneira rápida e barata os diversos ambientes e protocolos.

#### 4.3.1. NS-2

O NS-2 [66] é um simulador gratuito de código aberto desenvolvido especificamente para estudos na área de redes de comunicação, com diversos módulos integrados que incluem os mais variados componentes de rede, como: roteamento, protocolos de transporte, aplicações, entre outros.

A programação do NS-2 é feita sobre duas linguagens de programação: C++ para a estrutura básica (protocolos, agentes, etc) e o OTCL (*Object oriented Tool Command Language*) para uso como *frontend*. A utilização de duas linguagens é devido ao fato que a simulação exige uma linguagem rápida e eficaz para manipulação de grandes quantidades de dados, que é obtida com a linguagem C++. Porém durante a simulação inúmeras modificações são necessárias, exigindo um tempo de interação pequeno sendo isto obtido através da linguagem OTCL que permite uma maior agilidade.

Os resultados gerados através da simulação no NS-2 são armazenados em um arquivo de texto que pode ser visualizado graficamente por meio da ferramenta NAM (*Network Animator*) já inclusa no simulador.

#### 4.3.2. NS-3

O NS-3 [67] não é uma extensão do NS-2 e sim um novo simulador, mas também é gratuito e tem código aberto. Diferente do NS-2 o NS-3 tem sua programação inteiramente em C++ ou opcionalmente em Python.

O NS-3 não apresenta todos os modelos do NS-2, contudo possui novas funcionalidades, tais como: trabalhar corretamente com Nós de rede com múltiplas interfaces de rede (por exemplo, computadores com várias placas de rede), usa endereçamento IP, é mais consistente com arquiteturas e protocolos da *Internet*, detalhando mais o modelo 802.11. Em todo o caso, os modelos do NS-2 podem ser portados para o NS-3.

Os resultados das simulações também podem ser visualizados pela ferramenta NAM, mas, além disto, o NS-3 permite gerar arquivos de rastreamento de pacotes (*packet trace*) no formato pcap, assim, é possível utilizar outras ferramentas para a análise de pacotes.

#### 4.3.3. GLOBAL MOBILE INFORMATION SYSTEM SIMULATOR (GLOMOSIM)

O GloMoSim [68] é um simulador escrito em PARSEC, uma linguagem baseada em C, e desenvolvido especificamente para redes MANET. Caracteriza-se por ser um simulador de código aberto e utilizar técnicas de paralelismo, que permitem suportar a simulação de um grande número de Nós, além de ter a capacidade para agregação de camadas.

Este simulador possui uma interface gráfica escrita em JAVA e permite a utilização de três modelos de mobilidade *Random Waypoint*, *Random Drunken*, e *Traced-based*. Contudo, o GloMoSim não apresenta suporte ao padrão IEEE 802.11p, mas pode ser adicionado através de programação.

O simulador de rede GloMoSim foi descontinuado em 2000, depois que a PARSEC parou de trabalhar com *software* livre e lançou a versão comercial do GloMoSim chamada QualNET.

#### 4.3.4. OMNET++

O simulador de rede OMNET++ [69] de código aberto, baseado na linguagem de programação C++, tem sua aplicação em modelagem de redes de comunicação com e sem fio.

Sua principal característica é a abordagem por meio de componentes, denominados módulos, os quais permitem a interligação em conjuntos formando módulos compostos. Esta ligação e configuração da rede de simulação ocorrem no NED (*Network Description Language*) linguagem de descrição da rede do OMNET++.

As simulações podem ser executadas de forma interativa em um ambiente gráfico ou através de linha de comando. Atualmente OMNET ++ tem duas principais estruturas de modelo de simulação de rede: o *framework* de mobilidade e *framework* INET. O primeiro foi desenvolvido na TU Berlin e permite a criação de redes sem fio e móveis, fornecendo modelos detalhados de comunicação sem fio e MAC incluindo o padrão IEEE 802.11a, porém não inclui o padrão IEEE 802.11p das redes VANETs. Já o quadro INET concebido na Universidade de Karlsruhe oferece um conjunto de módulos OMNET++ que representam diferentes camadas da pilha de protocolos da *Internet*. Porém em ficheiros de mobilidade externos o *framework* INET necessita modificação, diferente dos simuladores NS-2 e GloMoSim, que não obrigam nenhuma modificação. [69]

O OMNET++ também possui uma versão comercial chamada OMNEST.

#### 4.3.5. JIST/SWANS

O *Java in Simulation Time* (JiST) [70] trata-se de uma plataforma de código aberto que simula eventos discreto em alto desempenho, obtendo resultados superiores aos simuladores NS-2 e GloMoSim na simulação de redes densas.

E o *Scalable Wireless Ad Hoc Network Simulator* (SWANS) [71] nada mais é que uma biblioteca completa para a simulação de redes MANET, construída sobre o JiST, que permite a configuração do modelo de mobilidade, forma de propagação, camadas de protocolos, etc.

O JiST/SWANS tem como vantagem permitir a instalação e execução em diversas plataformas como Windows, Linux e Solaris.

#### 4.3.6. OPNET

O simulador *Optimized Network Engineering Tool* (OPNET) [72] embora seja um simulador pago, possui uma versão *free* para uso acadêmico, conhecida como *OPNET IT Guru Academic Edition*, a qual é capaz de simular o comportamento e os dispositivos de uma rede inteira, incluindo os seus roteadores, *switches*, protocolos, servidores e aplicações individuais.

Este simulador permite projetar e estudar diversos aspectos de uma rede comunicação, como: dispositivos de comunicação, tipos de aplicação e o desempenho do protocolo de roteamento. Além de suportar diversos padrões de tecnologia de comunicação sem fio, por exemplo: IEEE 802.11, IEEE 802.15.1, IEEE802.16, IEEE 802.20 e redes de satélite.

Porém a versão acadêmica possui algumas limitações, quando comparado com a versão comercial, como, por exemplo, o tempo de simulação e o limite de dispositivos em determinadas topologias.

#### 4.4. COMPARAÇÃO DOS SIMULADORES DE REDE

A Tabela 6 a seguir traz um resumo comparativo das principais características entres os simuladores de redes apresentados.

**Tabela 6** Comparação entre os simuladores de rede.

|                   | NS-2      | NS-3          | GloMoSim | OMNET    | JiST /SWANS | OPNET            |
|-------------------|-----------|---------------|----------|----------|-------------|------------------|
| <b>Software</b>   |           |               |          |          |             |                  |
| Gratuito          | ✓         | ✓             | ✓        | ✓        | ✓           | Versão acadêmica |
| Linguagem         | C++/ OTCL | C++ ou Pythom | PARSEC/C | C++      | Java        | C/ C++           |
| Código aberto     | ✓         | ✓             | ✓        | ✓        | ✓           | ✗                |
| Interface         | ✓         | ✓             | ✓        | ✓        | ✓           | ✓                |
| Configuração/ Uso | Moderado  | Moderado      | Fácil    | Moderado | Difícil     | Moderado         |
| Exemplos          | ✓         | ✓             | ✓        | ✓        | ✓           | ✓                |



|                 | NS-2  | NS-3     | GloMoSim      | OMNET          | JiST /SWANS              | OPNET   |
|-----------------|-------|----------|---------------|----------------|--------------------------|---------|
| <b>Software</b> |       |          |               |                |                          |         |
| Plataforma      | Linux | Linux    | Windows, Unix | Windows, Linux | Windows, Linux e Solaris | Windows |
| Escalabilidade  | Baixa | Moderada | Alta          | Moderada       | Alta                     | Baixa   |
| <b>VANET</b>    |       |          |               |                |                          |         |
| IEEE 802.11p    | ✓     | ✓        | ✓             | ✓              | ✓                        | ✓       |

#### 4.5. SIMULADORES INTEGRADOS

Na abordagem de simulação de redes VANET utilizando os simuladores de rede e mobilidade é necessário carregar o arquivo *trace* gerado pelo simulador de mobilidade no simulador de rede, para então realizar a simulação. Porém desta forma o cenário de mobilidade não pode ser alterado após sua importação.

Com isso surgiu os simuladores integrados que possuem a simulação de rede em conjunto com a de mobilidade de forma integrada, permitindo que o utilizador possa editar os cenários sem que seja necessária a importação do arquivo *trace*.

A seguir são apresentados os principais utilizados pelos pesquisadores.

##### 4.5.1. NATIONAL CHIAO UNIVERSITY NETWORK SIMULATOR (NCTUNS)

O simulador NCTUns [73] foi inicialmente desenvolvido para a simulação de redes de comunicação, mas partir da sua versão 5.0 começou a fornecer a implementação do protocolo IEEE 802.11p, através de um ambiente fortemente integrado entre o simulador de tráfego e o simulador de rede, o que lhe garante uma rápido *feedback* de comunicação entre eles.

Escrito na linguagem C++ o NCTUns possui uma boa interface gráfica que permite ao usuário implementar de maneira fácil veículos e protocolos, e visualizar os resultados por meio de gráficos e animações. Tem como vantagens suportar diversos protocolos de redes tanto de comunicação sem fio como para redes cabeadas, tais como IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.16d, IEEE 802.11p, dentre outros.

O simulador NCTUns tem como limitações, funcionar somente na plataforma Linux, sendo que a última versão antes de ser descontinuado para o lançamento de uma versão comercial EstiNet, a NCTUns 6.0 é suportada somente sistema operativo Red Hat Fedora 11. Além disto, este simulador apresenta uma limitação com relação a capacidade máxima de Nós suportados da rede de 4096. Porém apresenta alto grau de fidelidade em seus resultados, proporcionado pela utilização da camada de protocolos TCP/IP do Linux.

#### **4.5.2. TRAFFIC AND NETWORK SIMULATOR ENVIRONMENT (TRANS)**

Desenvolvido pela Escola Politécnica Federal de Lausana na Suíça, o simulador TraNs [74] foi o primeiro a realizar a integração entre um simulador de tráfego e de rede (SUMO e NS-2) para a geração de ambientes realísticos em redes VANET.

Tem por característica ser um *software* livre baseado nas linguagens de programação C++ e Java, possuir suporte ao padrão IEEE 802.11p e permitir a geração de mapas através da base de dados TIGER.

Dentre suas aplicações se destacam a simulação de eventos nas estradas, como por exemplo: acidentes, interdições de trechos, entre outros. Além de ser um simulador altamente escalável e com suporte das plataformas Windows e Linux.

Contudo este simulador tem como desvantagem a obrigatoriedade de utilizar o SUMO e o NS-2 para ter a geração de mobilidade e a comunicação entre os Nós.

#### **4.5.3. GROOVENET**

O simulador GrooveNet [75] é também um simulador integrado que permite a análise e o estudo de redes de comunicação entre veículos e veículos-infraestrutura. Tem como característica de destaque permitir a comunicação de veículos simulados e veículos reais, além de permitir a importação de mapas da base de dados TIGER os quais são disponíveis livremente.

O GrooveNet suporta a três formas de comunicação: (1) comunicação por múltiplos saltos entre veículos por meio de um ou mais canais DSRC, (2) comunicação com Nós fixos (infraestruturas), e (3) comunicações móveis em aplicações V2V e V2R. Além de ser um simulador com boa escalabilidade suportando milhares de veículos.

Mas apesar das vantagens do GrooveNet a quantidade de material de apoio é pequena, o que dificulta o desenvolvimento de estudos com este simulador.

#### 4.6. COMPARAÇÃO DOS SIMULADORES INTEGRADOS

A Tabela 7 a seguir traz um resumo comparativo das principais características entres os simuladores integrados apresentados.

Tabela 7 Comparação entre os simuladores integrados.

|                    | NCTUns  | TraNS    | GrooveNet |
|--------------------|---------|----------|-----------|
| <b>Software</b>    |         |          |           |
| Gratuito           | ✓       | ✓        | ✓         |
| Gerador de tráfego | NCTUns  | SUMO     | GrooveNet |
| Interface gráfica  | ✓       | ✓        | ✓         |
| Configuração       | Difícil | Moderado | Moderado  |
| Uso                | Fácil   | Moderado | Difícil   |
| Linguagem          | C++     | Java     | C++       |
| <b>VANET</b>       |         |          |           |
| IEEE 802.11p       | ✓       | ✓        | ✓         |

#### 4.7. ANÁLISE DOS SIMULADORES

Concluída a apresentação dos principais simuladores utilizados nos estudos de redes VANET, são salientados os seguintes pontos:

- Os simuladores acoplados que se utilizam de simulador de tráfego e um simulador de rede para obter os resultados necessários. Tem como desvantagem não apresentar acoplamento perfeito e em alguns casos pode ser preciso à execução em diferentes máquinas devido a diferentes requisitos de plataforma de sistema operacional, o desempenho da simulação por meio desta abordagem pode ser afetada devido à necessidade de transferências de mensagens excessivas entre os dois simuladores.
- Por outro lado os simuladores integrados que trazem as funções de simulação de rede e mobilidade juntas, tem como vantagem o código do programa ser totalmente integrado garantindo que o *loop* de *feedback* entre os dois subsistemas seja muito eficiente no fornecimento de *feedback* para o outro subsistema.

Todos os simuladores apresentaram boas características sejam os acoplados ou integrados, porém o qual teve maior destaque foi o simulador NS-3, que junto ao NS-2 é um dos mais utilizados por pesquisadores e acadêmicos na avaliação e estudos de redes de comunicação sejam elas VANETs ou não. Contudo, o NS-3 se sobressai por apresentar melhorias e avanços em determinadas características.

Além do que, este simulador está em constante desenvolvimento acrescentando a cada nova versão novas funcionalidades e suporte de novos módulos. Possui também uma grande quantidade de material disponibilizado, o que auxilia os estudos, e um suporte contínuo por meio de seus desenvolvedores, através de fóruns.

Porém, o NS-3 se trata de um simulador de rede puro e os modelos de mobilidade fornecidos por ele não se enquadram em redes VANET, sendo necessária a utilização de um simulador de mobilidade. E ao avaliarmos os simuladores que foram apresentados, o SUMO é o que possui melhores características, no entanto sua configuração e uso são relativamente complexos, exigindo do usuário um grande conhecimento em simulações de tráfegos de veículos. Por outro lado o simulador BonnMotion é o que apresenta a maior simplicidade de uso e com boas características, permitindo a configuração de inúmeros parâmetros que possibilitam a criação de bons cenários de simulação, além de ser totalmente compatível com o simulador NS-3.

Portanto, devido aos motivos apresentados nos parágrafos anteriores o simulador de rede escolhido para este trabalho assim como o simulador de mobilidade foram, o NS-3 e o BonnMotion, respectivamente.



# 5. AVALIAÇÃO DOS PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO DE REDES VEICULARES

Neste capítulo é realizada a avaliação dos protocolos de roteamento, que são de extrema importância em uma rede de comunicação por garantir a confiabilidade na entrega de pacotes. Porém, as redes VANET apresentam características particulares, em função da mobilidade, o que tornam o roteamento desafiador.

Inicialmente o capítulo se inicia com a apresentação mais detalhada do protocolo DSRC/WAVE, o qual é responsável por padronizar desde a camada física até camada de aplicação, de forma a estruturar e permitir as diversas comunicações em uma rede veicular. Após isto, é realizado também um detalhamento do simulador NS-3, o qual possui suporte do protocolo WAVE, e permite realizar diversas análises e estudos das redes VANET.

O simulador NS-3 possui um módulo para o suporte de redes de comunicação veicular, módulo WAVE, o qual permite a configuração de inúmeros parâmetros dentre eles a configuração de alguns protocolos de roteamento.

Desta forma utilizando-se o simulador NS-3 foi realizada uma análise do desempenho dos protocolos de roteamento *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV)*, *Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)*, *Optimized Link State Routing (OLSR)*, quando submetido a uma rede VANET. Com base nos parâmetros de taxa de entrega de pacotes (PDR), *goodput*, *routing overhead* e o tempo de atraso na entrega de pacotes.

## **5.1. DESCRIÇÃO DO PROTOCOLO DSRC/WAVE**

Como já abordado na seção 3.2.2 o DSRC apenas se caracteriza como uma faixa do espectro eletromagnético reservado para comunicações veiculares, também chamada banda DSRC, sendo necessária a aplicação de um protocolo de comunicação de forma a normatiza-lo e permitir que ocorra a troca de informações.

Para isto, o principal protocolo utilizado é o WAVE, que através da união das normas IEEE 802.11p e IEEE 1604.x permitir cobrir todas as camadas protocolares. A seguir são apresentadas as funções de cada uma das normas:

- IEEE 802.11p [30] – esta norma foi incorporada na IEEE 802.11-2012, e é responsável por especificar a camada física e a camada de acesso ao meio (MAC) em redes veiculares, para fornecer conectividade sem fio entre estações fixas e móveis. Esta norma também padroniza a faixa de operação de 5,9 GHz (5,850 – 5,925 GHz nos EUA, 5,855 – 5,925 GHz na Europa), largura dos canais, as classes de funcionamento, e a classificação da potência de transmissão.
- IEEE 1609.0 (Arquitetura) [76] – Descreve a arquitetura do padrão WAVE bem como os serviços necessários para que os dispositivos WAVE se comuniquem.
- IEEE 1609.2 (Serviços de segurança) [77] – Define o formato, bem como o processamento e a privacidade na troca de mensagens de segurança, incluindo os métodos de proteção das mensagens de gerenciamento e de mensagens de aplicações.

- IEEE 1609.3 (Serviços de rede) [78] – especifica os serviços das camadas de rede e de transporte, incluindo o endereçamento e roteamento, utilizados na camada de enlace lógico (LCC). Dois protocolos são definidos para o envio de mensagens: o *WAVE Short Message Protocol* (WSMP) e o comum *Internet Protocol version 6* (IPv6). Em aplicações de segurança deverão se utilizar o WSMP prioritariamente, e as demais aplicações utilizam se do protocolo IPv6 ao nível de camada de rede e *Transmission Control Protocol* (TCP) ou *User Datagram Protocol* (UDP) na camada de transporte. Além disso, nesse padrão é definida a MIB (*Management Information Base*) que é responsável por as entidades da pilha WAVE.
- IEEE 1609.4 (Operações de multicanal) [79] – Está norma especifica algumas modificações no padrão IEEE 802.11, de forma a garantir a operação em múltiplos canais. Nela é definida a maneira como é feita a comutação entre os canais e as prioridades de encaminhamento de cada mensagem, indicando se serão comutadas para o canal de controle ou para um dos canais de serviço. Além disso, realiza a divisão de tempo entre os canais e a sincronização desses tempos entre os dispositivos da rede.
- IEEE 1609.6 (Gerenciamento remoto) [80] – Fornece a gestão de serviços interoperáveis em dispositivos WAVE de forma remota, que incluem serviço de gerenciamento remoto e serviços de identificação.
- IEEE 1609.11 (Coleta automática de encargos) [81] – Define um nível básico de interoperabilidade técnica para o fornecimento de serviços pagamentos eletrônico, além de definir o formato de mensagens seguras necessário.
- IEEE 1609.12 (Alocação de identificador de provedor de serviço) [82] – Identificadores são utilizados na família de padrões IEEE 1609 para o uso dos sistemas WAVE, e dentro na norma IEEE 1609.12 o uso destes identificadores é descrito, o valor dos identificadores que são alocados são indicados, e os valores de identificadores específicos do padrão WAVE são especificados.

De forma a simplificar e ilustrar a arquitetura do modelo WAVE, na Figura 14 é apresentada uma comparação entre o modelo de referência OSI e o modelo WAVE, indicando a relação entre as camadas de cada modelo.



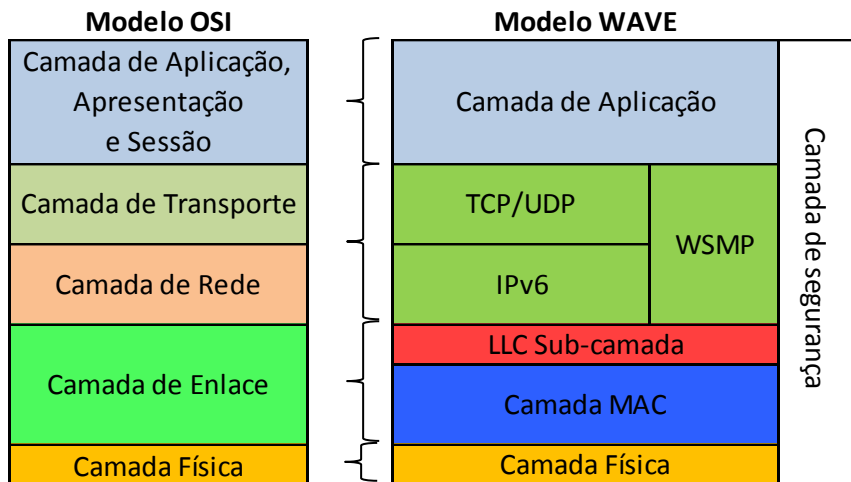


Figura 14 Comparação entre o modelo OSI e a arquitetura WAVE.

Como pode ser observado na Figura 14, na estrutura do protocolo WAVE é possível identificar algumas camadas adicionais em relação ao modelo OSI como, camada de segurança, sub-camada LCC e a unidade WSMP responsável pelas mensagens de segurança. De forma a melhor identificar a relação das camadas com as normas, na Figura 15 são indicadas as normas que regulamentam cada uma delas.

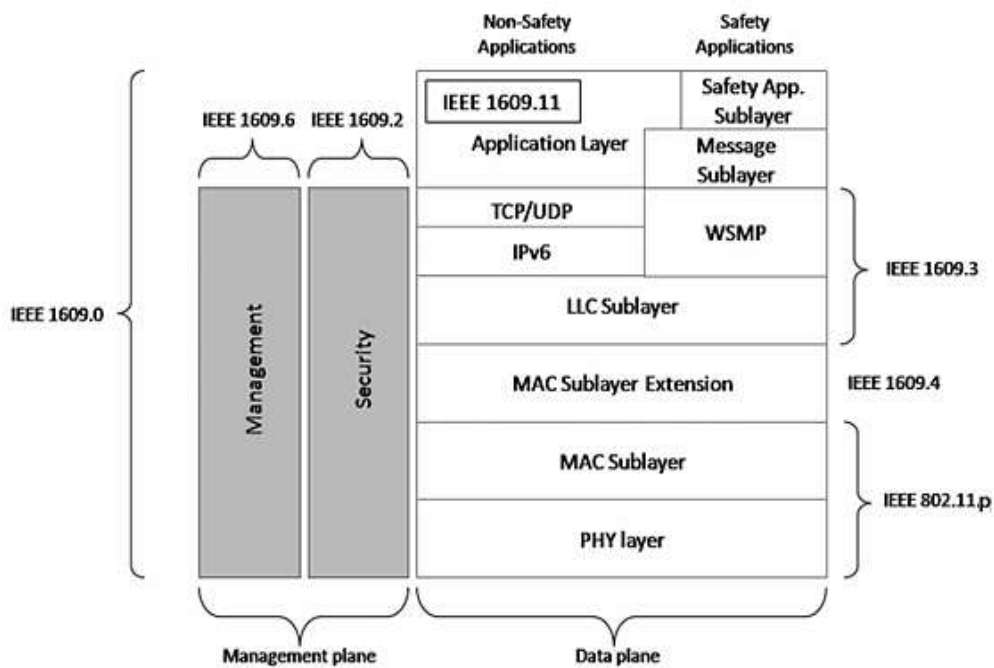


Figura 15 Pilha de protocolos WAVE [83].

A seguir são detalhadas as camadas física, de controle de acesso ao meio (MAC) e de rede do protocolo WAVE:

- **Camada Física WAVE**

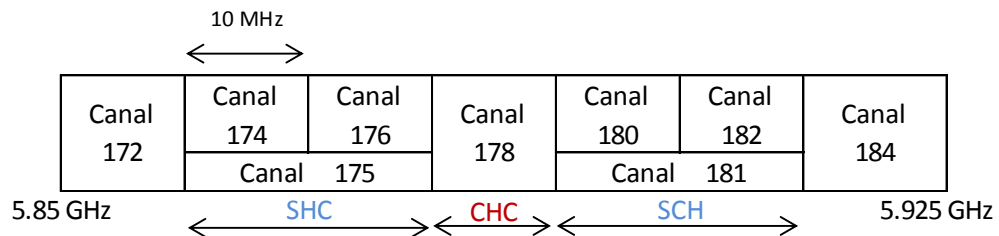
A camada física da arquitetura WAVE como já abordado é regulamentada pela norma IEEE 802.11p e tem como base a norma IEEE 802.11a, e utilizando alguns recursos desta norma como a técnica de modulação *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), proporciona o suporte de diferentes taxas de dados, em função das taxas de codificação e tipo de modulação. Todas estas características são gerenciadas pela unidade *Physical Layer Management Entity* (PLME).

A Figura 16 a seguir demonstra as taxas de transmissão alcanças pelo WAVE, assim como as modulações e codificação suportados.

| CARACTERÍSTICAS TECNOLOGIA WAVE |                           |           |                     |
|---------------------------------|---------------------------|-----------|---------------------|
| Taxa de transmissão             |                           | Modulação | Codificação         |
| Velocidade do veículo           | Taxa                      |           |                     |
| 0 - 60 Km/hr                    | 9, 12, 18, 24 e 27 Mbit/s | BPSK      | Convolutacional 1/2 |
| 60 - 120 Km/hr                  | 3, 4.5, 6, 9 e 12 Mbit/s  | QPSK      | Convolutacional 2/3 |
|                                 |                           | 16-QAM    | Convolutacional 3/4 |
|                                 |                           | 64-QAM    |                     |

**Figura 16** Taxa de transmissão, modulação e codificação da tecnologia WAVE [84].

A largura de banda de 75 MHz no espectro de 5,9 GHz é dividido em 7 pequenos canais operacionais, Figura 17, cada qual com largura de banda de 10 MHz. [85]



**Figura 17** Disposição dos canais na arquitetura WAVE [85].

Os canais são classificados como canal de controle (CCH) e canais de serviço (SHC), como identificados na Figura 17. O CCH (178) é utilizado exclusivamente para comunicações de segurança e controle de informações, definidas por *WAVE Short Messages Protocols* (WSMP) e *WAVE Service Advertisement* (WSA). Por sua vez os canais SHC (172, 174, 176, 180, 182 e 184) são normalmente utilizados para aplicações de interações comerciais baseados em IP e transmissão de dados.

O par de canais 174, 176 e 180, 182 podem ser combinados a fim de formar um único canal, 175 e 181 respectivamente, proporcionado uma largura de banda de 20 MHz.

Os dispositivos WAVE, RSU e OBU, podem usar dois tipos de canais de rádio, único ou multicanais. O canal único realiza somente uma operação por vez, troca de dados ou escuta do canal. Por sua vez a opção de multicanais possibilita que o dispositivo esteja a transmitir dados em um canal, enquanto esta ativamente escutando a um segundo canal.

As formas de acesso a esses canais podem ser das seguintes formas:

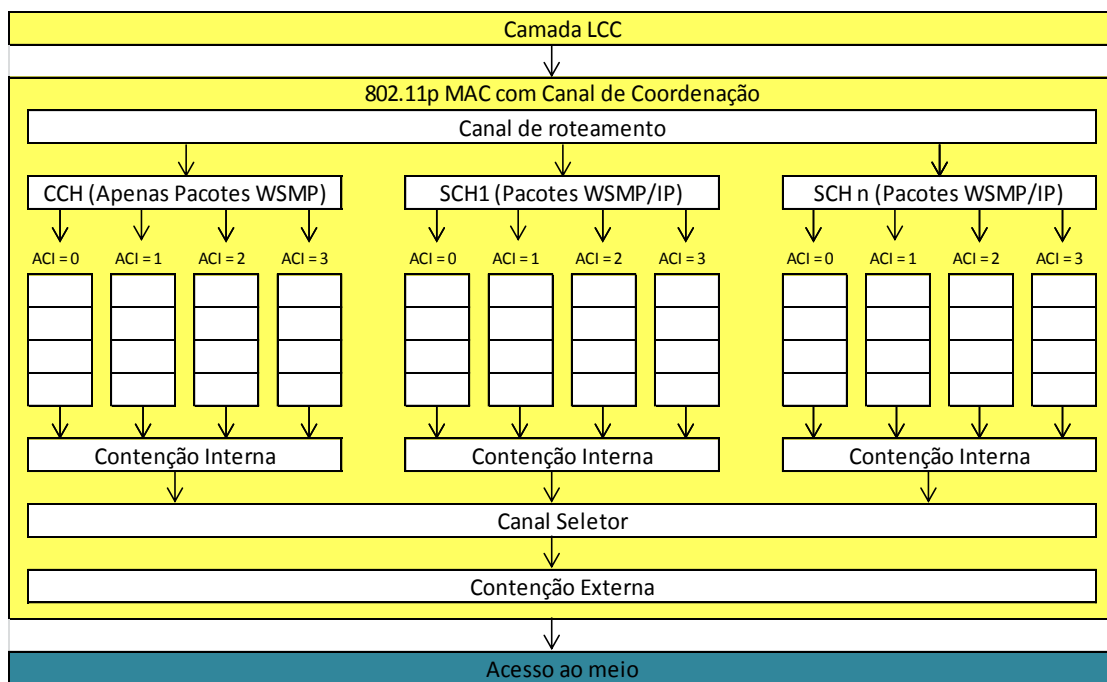
- Acesso contínuo: o dispositivo operar somente no CCH.
- Acesso alternado: o dispositivo acessa o SCH e o CCH em intervalos de tempo.
- Acesso intermediário ou estendido: o dispositivo acessa durante certos intervalos de tempo o SCH e o CCH.

Devido às capacidades limitadas dos dispositivos WAVE com canal único, é necessário um mecanismo de sincronização, a fim de garantir a interoperabilidade com os dispositivos de multicanais. A sincronização dos dispositivos é obtida através do alinhamento dos seus recursos de rádio com o relógio global (UTC) a cada período de tempo.

#### ▪ **Camada MAC WAVE**

As funções da camada de acesso ao meio (MAC) são definidas pelo padrão IEEE 802.11p, junto com o padrão IEEE 1609.4, a qual especifica uma subcamada MAC e é responsável por regularizar a operação em multicanais. Seu gerenciamento é feito pela unidade MAC *Layer Management Entity* (MLME).

A camada MAC WAVE utiliza-se do protocolo de acesso ao meio *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA/CA), assim como fundamentos da norma IEEE 802.11e, a qual é responsável por agregar qualidade de serviços (QoS) necessários para mensagens de segurança crítica e tráfego de mídia, definindo o método *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA) como processo de acesso ao meio, fornecendo um acesso distribuído ao meio a fim de atender as diferentes prioridades dos serviços IP ou *WAVE Short Message* (WSM). A Figura 18 demonstra a arquitetura da camada MAC WAVE.



**Figura 18** Arquitetura da camada MAC WAVE [85].

Esta arquitetura implementa uma categoria de acesso (AC) por filas, empregando um canal de roteamento e um canal seletor responsáveis pela coordenação da camada. Quando os dados são recebidos a partir da camada *Logical Link Control* (LLC), o canal de roteamento verifica o campo de cabeçalho dos dados, e caso seja uma aplicação segurança, então ele deve ser encaminhado para a fila apropriada com base no identificador de canal e a prioridade de dados.

No entanto, a transmissão de uma aplicação comercial é um pouco diferente, todos os dados de IP deve ser registrados com o perfil transmissor na *Management Information Base* (MIB) que contém o número do canal SCH, nível de potência e o status adaptável do

nível de potência e taxa de dados. Quando LLC passa um datagrama IP para o canal de roteamento, o datagrama é direcionado para o *buffer* de dados que corresponde ao SCH especificado.

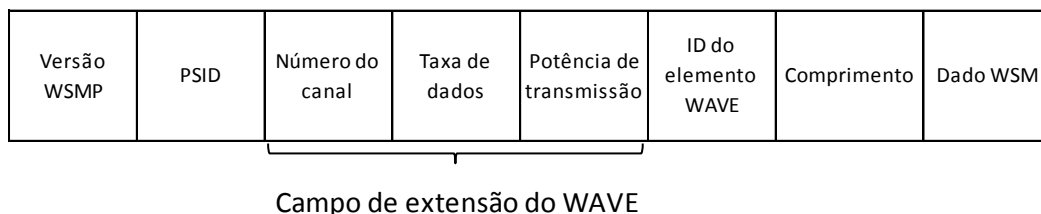
O canal seletor exerce múltiplas funções, tais como dispensar a informação quando o canal não esta sendo mais utilizado, monitorar determinado canal ou como o dispositivo WAVE deve utilizar determinado canal, entre outros aspectos.

- **Camada de Rede WAVE**

A norma IEEE 1609.3 define a operação dos serviços da camada de rede, que incluem endereçamento e roteamento, nela também são descritos os serviços de plano de gerenciamento e plano de dados.

O plano de gerenciamento apresenta dois módulos específicos o *WAVE Management Entity* (WME) e *WAVE Security Entity* (WSE). O WME é responsável por fornece funções de gestão como a monitoramento e atribuição de canais, configuração do IP, gerenciamento da base de informação, como endereço do roteador, *gateways*, tamanho da mensagem WSM, porta de registro, taxa e potência de transmissão, entre outros. Enquanto o WSE providência o gerenciamento dos mecanismos de criptografia de dados.

O plano de dados acaba por especificar alguns pacotes de transmissão de dados como o UDP/TCP/IP, além do *WAVE Short Message Protocol* (WSMP) um protocolo único da tecnologia DSRC, o qual é empregado na transmissão de dados sensíveis ao tempo e de alta prioridade. A Figura 19 demonstra a estrutura de *frame* de dados de uma mensagem WSM.



**Figura 19** Estrutura do *frame* de mensagens WSM [85].

O campo versão WSMP é responsável por informar a versão do protocolo WAVE, o *Provide Service Identifier* (PSID) serve para identificação, similar ao número de porta

utilizado em aplicações UDP/TCP. O *frame* WSM apresenta um campo de extensão no qual se contém informações como o número do canal que será utilizado para comunicação, a taxa de dados usada na transmissão e a potência de transmissão com que os dados serão enviados. Além dos campos de ID que representa o cabeçalho WSMP, o campo de comprimento o qual irá determinar o tamanho dos dados, e o campo dado WSM que contém a informação útil.

## 5.2. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR NS-3

O simulador NS-3 se caracteriza por ter um aspecto modular, onde através da associação e ligação de diversos módulos é possível a criação de uma rede de comunicação funcional.

A Figura 20 apresenta uma organização básica do simulador NS-3, onde é possível identificar os módulos que constituem o simulador, com algumas de suas funções.

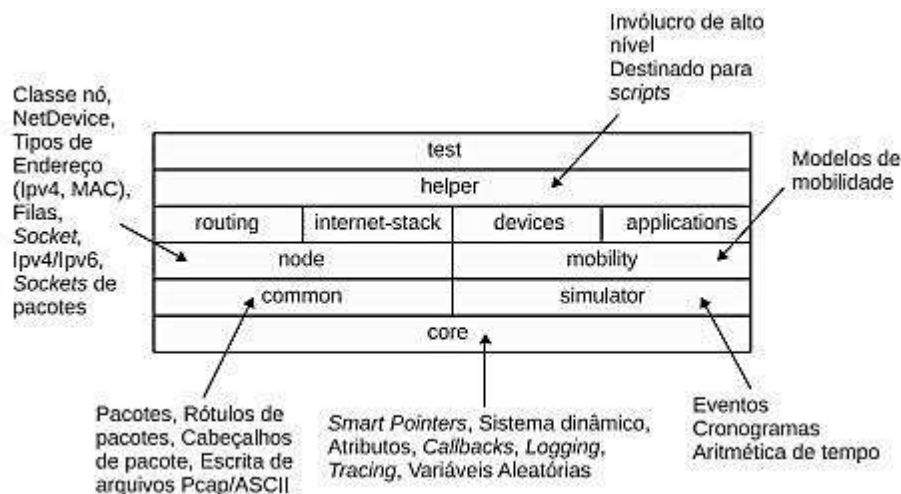


Figura 20 Estrutura do NS3 [67].

As classes básicas para a confecção de uma rede de comunicação no NS-3 são:

- Nodo

É o dispositivo computacional que se conecta a uma rede, representado pela classe *Node*. Em um nodo ou chamado também de nó é possível adicionar funcionalidades, tal como aplicativos, pilha de protocolos e periféricos que permitam executar tarefas.

- Aplicações

No NS-3 a abstração básica para um programa de usuário que gera alguma atividade a ser simulada é uma aplicação, que é representada pela classe *Application*.

- Canal de comunicação

Em uma rede o meio sobre o qual os dados trafegam é chamado de canal. No NS-3 é representado pela classe *Channel* e fornece métodos para gerenciar objetos de comunicação de sub-redes e Nós conectados a eles.

- Dispositivo de rede

No NS-3 a abstração do dispositivo de rede cobre tanto as partes de *hardware* quanto o *software*. Um dispositivo de rede é instalado em um nó para permitir que este se comunique com outros na simulação, usando os canais de comunicação. Representado pela classe *Net Device*, fornece métodos para gerenciar conexões para objetos *Node* e *Channel*.

- Assistentes de topologia

Este componente é responsável por facilitar a configuração das redes, permitindo que de forma rápida e conveniente o usuário crie os dispositivos e lhes atribua endereço IP, endereço MAC, configure as pilhas de protocolo, etc.

Até este momento, o simulador NS-3 não comporta a arquitetura WAVE completa, contudo as extensões na camada MAC e PHY realizadas pela norma IEEE 802.11p já estão disponíveis. E em conjunto com o suporte de modelos de mobilidade criados por ferramentas externas, é possível a criação de cenários de comunicação veicular. Além disto, protocolos de roteamento de redes MANETs, na qual está inclusa a rede VANET, são suportados pelo NS-3, tais como DSDV, AODV e OLSR.

### 5.3. PROTOCOLOS DE ROTEAMENTO – DSDV, AODV E OLSR

Os protocolos de roteamento tem a função de selecionar o melhor caminho de comunicação entre emissor e receptor de forma a permitir que transmissão de dados seja a melhor possível.

Em uma rede VANET o roteamento é uma questão crítica devido às suas características particulares, tais como, alta mobilidade, conexão instável e necessidade de baixo tempo de latência. Isto torna as informações de roteamento desafiadoras, uma vez que os protocolos de encaminhamento das redes MANET, não foram projetados para lidar com tais características.

Nessa seção serão abordados apenas os protocolos de roteamento suportados pelo simulador NS-3.

#### 5.3.1. DSDV

O protocolo *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing* (DSDV) [86], baseado no algoritmo *distance vector* de Bellman-Ford, é categorizado como *Table-Drive* ou protocolo pró-ativo, onde cada nó armazena em sua memória uma tabela de roteamento, referentes aos demais Nós da rede.

Na tabela de roteamento são armazenadas informações como, número de saltos (*hop*), endereço de destino e número de sequência (SN). Através de mensagens de atualização estas tabelas são renovadas periodicamente, e a cada nova entrada um novo SN é gerado.

Os Nós da rede ao receberem uma informação recorrem a tabela para verificar o número da sequência da informação recebida, se o SN da informação for diferente a atualização é feita, caso contrário os dados são mantidos. Se um nó receber duas mensagens de atualização ao mesmo tempo, dá-se prioridade a informação com maior SN, e para o caso de o SN ser o mesmo opta-se pela que possui o menor número de saltos.

A necessidade de atualizações periódicas da tabela para manter a consistência dos dados armazenados, acaba por ser um fator negativo neste protocolo, pois exige um alto consumo de banda, restringindo sua aplicação a redes pequenas.



### 5.3.2. AODV

O protocolo *Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (AODV) [87] é um aperfeiçoamento do protocolo DSDV e é caracterizado como um protocolo reativo (*on-demand*), uma vez que não é baseado na manutenção de informações sobre rotas, nem na troca de informações de roteamento entre os Nós. E sim as rotas são criadas apenas quando necessárias, evitando-se assim a manutenção de tabelas de roteamento completas.

Em sua operação quando um nó deseja enviar dados a um destino ao qual não conhece, inicia-se um processo de descoberta, enviando para toda a rede uma mensagem de *Route-Request* (RREQ). Nesta mensagem são contidas informações de endereço de origem e destino, número de sequência (SN), tempo de vida, quantidade de saltos e número de *broadcast-id*. Uma rota é descoberta quando o RREQ atinge o nó de destino ou atinge algum nó intermediário que possui a rota atualizada, enviado assim um pacote de *Route Reply Packet* (RREP).

Este protocolo pode ou não fazer o uso de mensagens de monitoramento de rotas ativas, através do quadro *hello*. Caso ocorra uma quebra de *link*, uma mensagem de *Route Error* (RERR) é enviada aos Nós vizinhos até que chegue ao nó fonte e um novo RREQ seja enviado.

A técnica de descoberta de novas rotas utilizada por este protocolo acaba por provocar um alto *delay* de transmissão de dados, além de causa o fenômeno de *flooding* na rede devido ao excesso de mensagens de *request*. A Figura 21 demonstra a ocorrência do fenômeno de *flooding* no protocolo AODV, as flechas indicam todas as transmissões realizadas.

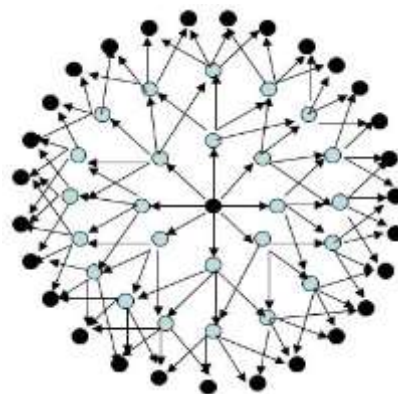
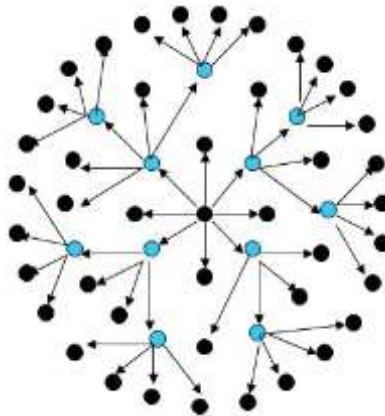


Figura 21 Fenômeno de *flooding* sofrido pelo protocolo AODV. [92]

### 5.3.3. OLSR

O protocolo *Optimized Link State Routing* (OLSR) [88] assim como o DSDV é um protocolo pró-ativo, ou seja, periodicamente troca informações sobre sua topologia. Porém a quantidade de Nós que enviam seu estado é limitado, a fim de evitar o fenômeno de inundação (*flooding*) da rede com mensagens de sinalização.

Para isto, utilizando-se da técnica *MultiPoint Relay* (MPR), na qual um grupo de Nós vizinhos elegem um nó como MPR sendo ele o único responsável por retransmitir os pacotes, como demonstra a Figura 22, permitindo assim a redução do número de mensagens de sinalização na rede. Os Nós declarados MPR devem estar a distância de um salto.



**Figura 22** Os Nós azuis são os eleitos como MPR e responsáveis pela transmissão de dados. [92]

Este protocolo possui três tipos de mensagens: *hello*, *Topology Control* (TC) e *Multiple Interface Declaration* (MID). A mensagem de *hello* funciona para a detecção de ligações entre vizinhos a um salto e sinalização MPR, as mensagens TC transmitidas pelos Nós MPR têm a tarefa de declaração da topologia e por último a MID declara se o nó possui múltiplas interfaces.

O conceito de MPRs proporciona ao protocolo OLSR um modo mais organizado e eficiente no tráfego de dados, evitando sobrecarga da rede.

## 5.4. METODOLOGIA

Este estudo pretende avaliar através de simulação o comportamento do padrão IEEE 802.11p sobre diferentes protocolos de roteamento. Investigando-se diversos artigos e trabalhos científicos realizados sobre redes veiculares, não se identificou nenhuma metodologia padrão para a avaliação de uma rede VANET. Normalmente, cada autor realiza a metodologia de acordo com os itens que pretende avaliar e com o cenário escolhido. Sendo assim, os critérios de avaliação e atividades realizadas neste estudo serão detalhados a seguir.

### 5.4.1. MÉTRICAS DE AVALIAÇÃO

- Taxa de entrega de pacotes (PDR)

O PDR é taxa entre o número de pacotes recebidos pelo receptor e o número de pacotes enviados pelo transmissor, e é expresso pela equação (4). Onde  $N_r$  indica o número de pacotes recebidos e  $N_s$  o número total de pacotes enviados.

$$PDR = \frac{N_r}{N_s} \quad (4)$$

- *Goodput*

A métrica *goodput* serve para medir a quantidade de dados úteis transmitidos num determinado *link* durante certo tempo descartando dados de retransmissão. Diferente do *throughput* mede a quantidade total de dados. O *goodput* é obtido através da equação (5).

$$goodput = \frac{8 \cdot p \cdot N_{rx}}{T} \quad (5)$$

As variáveis  $p$ ,  $N_{rx}$  e  $T$  correspondem ao tamanho do pacote em *bytes*, número de pacotes recebidos e período de transmissão em segundos, respectivamente.

- *Routing Overhead*

À medida que a rede cresce, a quantidade de pacotes de roteamento aumenta o que afeta diretamente no desempenho dos protocolos de roteamento. Sendo o *routing overhead* uma medida importante da escalabilidade do protocolo. E é definido pelo o número total de pacotes de controlo enviados dividido pelo número de pacotes de dados entregue com êxito [89].

- Tempo de atraso

Este parâmetro é responsável por determina o tempo de atraso sofrido para entrega de um pacote desde o destino até a origem. Incluindo atrasos gerados por filas de interface, retransmissão, propagação, e descoberta de rota. E é obtido através da soma de todos os atrasos de ponta a ponta para todos os pacotes recebidos, dividido pelo total de pacotes recebidos [88].

## **5.5. SIMULAÇÃO**

Ambos os simuladores utilizados neste estudo, NS-3 e BoonMotion, são suportados somente no sistema operacional Linux. Para este estudo utilizou-se uma máquina com as seguintes configurações: processador Intel® Core™ 2 Duo CPU E6550 @ 2.33GHz x 2/64 bits, memória RAM de 1,9 GB, armazenamento interno de 147,8 GB e plataforma Fedora 24.

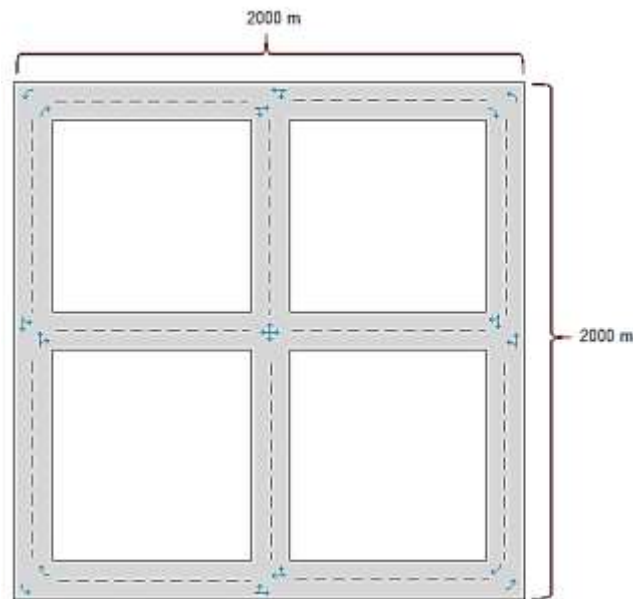
### **5.5.1. CENÁRIO DE SIMULAÇÃO**

Para a simulação de uma rede VANET se faz necessário à criação de um cenário que melhor represente o ambiente veicular, onde o deslocamento dos Nós (veículos) é restringido pelas ruas e a topologia da rede tende a mudar rapidamente devido a velocidade de deslocamento dos Nós.

Desta forma utilizou-se o *software* de mobilidade BonnMotion que permite a criação de um cenário veicular simplificado. O modelo de mobilidade Manhattan presente neste simulador permite a configuração dos seguintes parâmetros: duração da simulação, número de Nós, largura e altura da área de simulação, probabilidade de mudança de velocidade,

velocidade mínima, velocidade média, pausa máxima, probabilidade de pausa, probabilidade de mudança de direção e número de blocos no eixo x e eixo y.

A Figura 23 trás o modelo do cenário gerado para o estudo, demonstrando o tamanho da área de simulação, a quantidade de blocos em cada eixo e os sentidos percorridos pelos Nós.



**Figura 23 Cenário simulado.**

Os parâmetros utilizados nas simulações são mostrados na Tabela 8.

**Tabela 8 Parâmetros utilizados nos cenários de mobilidade gerados.**

| <b>Parâmetros de simulação</b>       |                    |
|--------------------------------------|--------------------|
| Duração (s)                          | 100                |
| Número de Nós móveis                 | 30, 40, 50         |
| Área de simulação (km <sup>2</sup> ) | 1, 4, 9 e 16       |
| Número de blocos no eixo x           | 2                  |
| Número de blocos no eixo y           | 2                  |
| Velocidade média (m/s)               | 15, 25, 35, 45, 55 |
| Tempo máximo de pausa (s)            | 10                 |
| Probabilidade de pausa               | 5                  |
| Probabilidade de mudança de direção  | 10                 |

A geração de um cenário no *software* BonnMotion é feita através de linha de comando, seguindo a seguinte sintaxe:

```
$ ./bin/bm -f <Nome_do_Cenário> ManhattanGrid
-d 100 //Duração da simulação
-n <qt.Nós (30, 40, 50)> //Número de Nós
-x <Tam. (1000, 2000, 3000 e 4000)> //Largura da área de simulação
-y <Tam. (1000, 2000, 3000 e 4000)> //Comprimento da área de simulação
-u 2 //Número de blocos no eixo x
-v 2 //Número de blocos no eixo y
-m <Vel.Nós (15, 25, 35, 45, 55)> //Velocidade de deslocamento do nós
-o 10 //Tempo máx. de pausa
-p 5 //Prob. de pausa
-t 10 //Prob. mudança de direção
```

Após a criação de cada um dos cenários é necessário gerar o arquivo de entrada para o simulador de rede NS-3, para isto se executa o seguinte comando:

```
$ ./bin/bm NSFile -f <Nome_do_Cenário>
```

Para este estudo foram criados um total de doze cenários de simulação, envolvendo as características de densidade da rede, velocidade de deslocamento dos Nós e tamanho da área de simulação, todos baseados no modelo apresentado na Figura 23.

Inicialmente foram criados três cenários com uma velocidade fixa de 15 m/s, variando-se a quantidade de veículos em 30, 40 e 50. Depois realizou-se a construção de mais cinco cenários fazendo-se somente a alteração da velocidade de deslocamento dos Nós em 15, 25, 35, 45 e 55 m/s, com uma densidade fixa de 50 Nós. E por fim foram elaborados os cenários com a alteração do tamanho da área de simulação em 1, 4, 9 e 16 km<sup>2</sup>.

## 5.5.2. SIMULAÇÃO DA REDE VEICULAR

O simulador NS-3 possui um *script* exemplo chamado *vanet-routing-compare.cc* [91], o qual realiza a simulação de uma rede VANET através da associação diversos módulos. Que são o módulo de teste, para suporte de um *script* de simulação abrangente, o módulo de protocolos, responsável pelo suporte dos diferentes protocolos de roteamento, módulo de propagação, proporciona a simulação das percas de comunicação sem fio e somreamento, o módulo de mobilidade, para garantir suporte de mobilidade aos Nós, e o módulo de rede, que estrutura a camada física e MAC baseado na norma 802.11p e parte da norma 1609. Suporte adicional é fornecido pelo módulo de *internet*, que suporta o endereçamento IPv4 e o módulo de aplicação, para a geração de tráfego.

São vários os parâmetros de configuração deste *script*, a Tabela 9 tratará de apresentar todos eles, junto com o seu significado e valores de configuração.

**Tabela 9** Parâmetros configuráveis no *script vanet-routing-compare.cc*.

| <b>Parâmetros da simulação</b>  |   |  |
|---------------------------------|---|--|
| --totalTime                     | Tempo de simulação                                    | <double>   |
| --ascii_trace                   | Arquivos de rastreamento ASCII                        | 0 = Não<br>1 = Sim                                 |
| --routing_trace                 | Despejar tabelas de roteamento                        | 0 = Não<br>1 = Sim                                 |
| --pcap                          | Criar arquivos pcap para todos os Nós                 | 0 = Não<br>1 = Sim                                 |
| --CSVfileName                   | Nome do arquivo de saída csv                          | <string>   |
| --scenario                      | Cenário pré-definido                                  | 1 = Sintético<br>2 = Reprodução do <i>trace</i>    |
| --mobility                      | Modelo de mobilidade                                  | 1 = Trace<br>2 = RWP                               |
| --nodes                         | Número de Nós (veículos)                              | <int>  |
| --traceMobility                 | Ativar rastreamento de mobilidade                     | <boolean>  |
| --traceFile                     | Arquivo de rastreamento de mobilidade                 | Arquivo NS-3 de mobilidade (ex. Name.ns_movements) |
| --logFile                       | Arquivo de registro de mobilidade                     | <string>   |
| <b>Parâmetros de mobilidade</b> |   |  |
| --speed                         | Velocidade de deslocamento para o modelo RPW, em m/s. | <int>  |
| --pause                         | Tempo de pausa do nó no modelo RPW, em s.             | <int>  |
| <b>Características MAC/PHY</b>  |   |  |
| --txp                           | Potência de transmissão (dB)                          | <double>   |
| --txdist                        | Distância de transmissão                              | <double>   |
| --lossModel                     | Modelos de propagação                                 | 1 = Friis<br>2 = ItuR1411Los<br>3 = TwoRayGround   |

| <b>Características MAC/PHY</b> |   |                                  |
|--------------------------------|---|----------------------------------|
| --80211Mode                    | Protocolo da camada MAC                                     | 1 = 802.11p<br>2 = 802.11b       |
| --phyMode                      | Configuração da camada física                               | OfdmRate6MbpsBW10MHz             |
| --gpsaccuracy                  | Tempo de sincronismo do GPS, em ns.                         | <int>                            |
| --fading                       | Modelo de desvanecimento                                    | 0 = Nenhum<br>1 = Nakagami       |
| <b>Aplicações de tráfego</b>   |   |                                  |
| --bsm                          | Tamanho da mensagem de segurança (BSM/WAVE) em <i>bytes</i> | <int>                            |
| --interval                     | Intervalo em segundos da mensagem de segurança (BSM/WAVE)   | <double>                         |
| --protocol                     | Protocolo de roteamento                                     | 1 = OLSR<br>2 = AODV<br>3 = DSDV |
| --rate                         | Taxa de roteamento de dados                                 | 2048 bps                         |
| --sinks                        | Número de receptores  | <int>                            |

O *script vanet-routing-compare.cc* realiza envio de mensagens básicas de segurança (BSM) de 200 *bytes* 10 vezes por segundo a uma taxa de 6 Mbps a todos os Nós da rede, que estão ao seu alcance, através do canal de controle (CH) de 10 MHz com acesso contínuo. Além disso, todos os Nós tentam continuamente rotear pacotes de 64 *bytes* a uma taxa de aplicação de 2048 bps para os outros Nós, selecionados como Nós *sink*.

Por *default* se realizarmos a simulação do *script* sem a alteração de nenhum parâmetro, será executado o cenário 1, o qual possui 10 segundos de simulação, com um total de 40 Nós, isto é, veículos, se movendo de acordo com o modelo de mobilidade *Random Waypoint* com uma velocidade de 20 m/s e sem tempo de pausa dentro de uma região de 300 x 1500 metros. Tendo o protocolo de roteamento AODV como padrão e o modelo de propagação *Two-Ray-Ground*. A potência de transmissão é definida para 20 dB e o alcance da transmissão de 145 metros.

Contudo, o modelo de mobilidade *Random Waypoint* não adequa-se a um ambiente veicular, uma vez que os Nós se deslocam de forma aleatória sem nenhuma restrição. Para



isto, de forma a simular um ambiente um pouco mais realista realizou-se algumas alterações no *script* de forma a suportar os cenários gerados externamente na ferramenta BonnMotion, estas alterações podem ser vistas no anexo A.

A configuração de mobilidade é toda realizada pelo simulador BonnMotion onde foram criados os cenários no padrão *Manhattan Grid*, já a parte de criação de tráfego de dados e estruturação da rede é toda feita no simulador NS-3. As configurações da rede são apresentadas na Tabela 10.

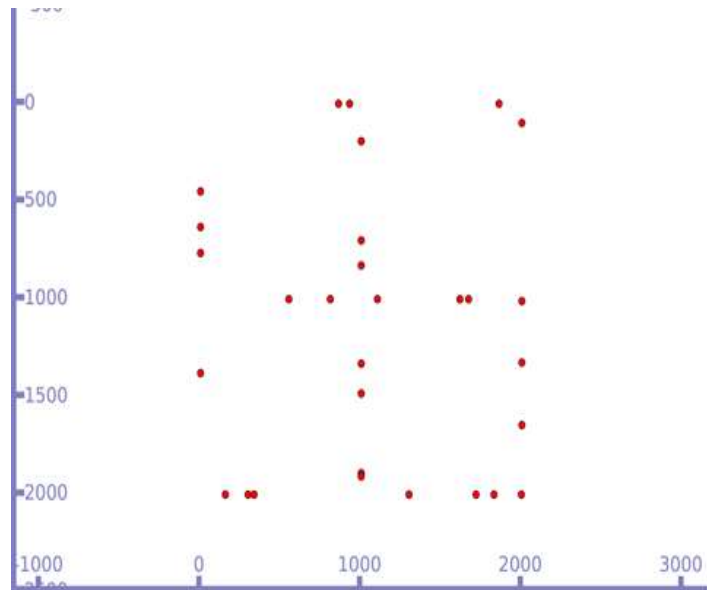
A sintaxe da linha de comando para execução das simulações é apresentada abaixo:

```
$ ./waf --run "scratch/simulacao
--totaltime=100
--CSVfileName2=<output>.csv
--scenario=3
--mobility=1
--nodes=<qt.Nós (30, 40, 50)>
--traceFile=scratch/<cenários>.ns_movements
--logfile=ns2-mob.log
--txp=20
--lossModel=3
--80211Mode=1
--fading=1
--protocol=<OLSR (1), AODV (2), DSDV (3)>
--sinks=10"
```

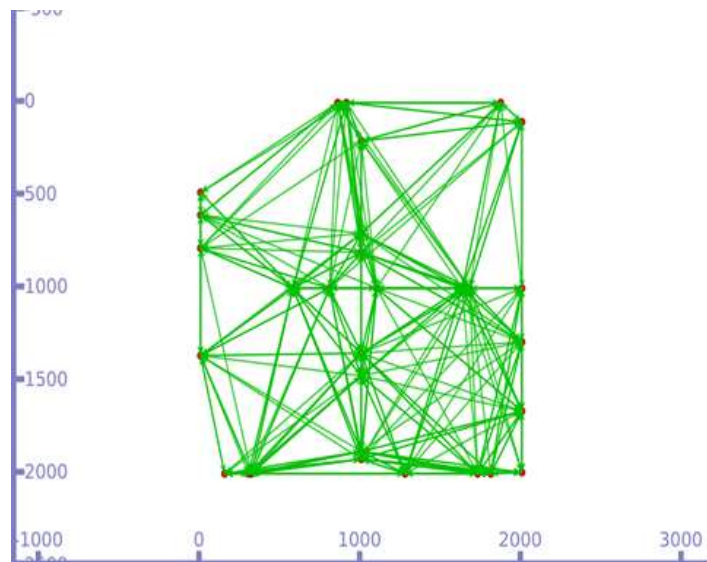
Os parâmetros que estão entre < > foram os que sofreram modificações em função dos diferentes cenários, os demais se mantiveram fixos com os valores indicados. A Figura 24 demonstra, através da ferramenta de visualização PyViz, a disposição dos diversos Nós (imagem A) e os *links* de comunicação entre eles (imagem B) dentro no ambiente NS-3.

**Tabela 10 Parâmetros utilizados na simulação da rede veicular.**

| <b>Parâmetros de simulação</b> |                  |
|--------------------------------|------------------|
| Tempo de simulação (s)         | 100              |
| Número de Nós móveis           | 30, 40, 50       |
| Distância de transmissão (m)   | 250              |
| Protocolo MAC                  | 802.11p          |
| Protocolo de roteamento        | DSDV, AODV, OLSR |
| Taxa de transmissão            | 6 Mbps           |
| Potência de transmissão        | 20 dB            |
| Tamanho do pacote              | 200 bytes        |
| Modelo de mobilidade           | Manhattan Grid   |
| Modelo de propagação           | Two-Ray Ground   |
| Modelo de desvanecimento       | Nakagami         |



(A) Modelo de simulação pausado, mostrando a disposição dos Nós (veículos) no ambiente.



(B) Modelo de simulação pausado, mostrando os *links* de comunicação entre os Nós (veículos).

**Figura 24** A imagem A apresenta a disposição dos nós e a imagem B mostra os *links* de comunicação, no cenário simulado com 30 Nós.

Os resultados das diferentes simulações foram armazenados em arquivos de extensão csv, nos quais eram armazenadas as informações de taxa de entrega de pacotes, média de *goodput* e *routing overhead*. Para coleta dos dados de tempo de atraso utilizou-se o recurso FlowMonitor [90] do próprio simulador NS-3, que gera arquivos de saída no formato xml. As análises sobre esses dados são mostradas na próxima seção.

## 5.6. ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Foram avaliados os resultados de simulação para os protocolos de roteamento DSDV, AODV e OLSR.

O gráfico da Figura 25 apresenta a taxa de entrega de pacotes (PDR) dos diferentes protocolos em função da quantidade de Nós presentes na rede.

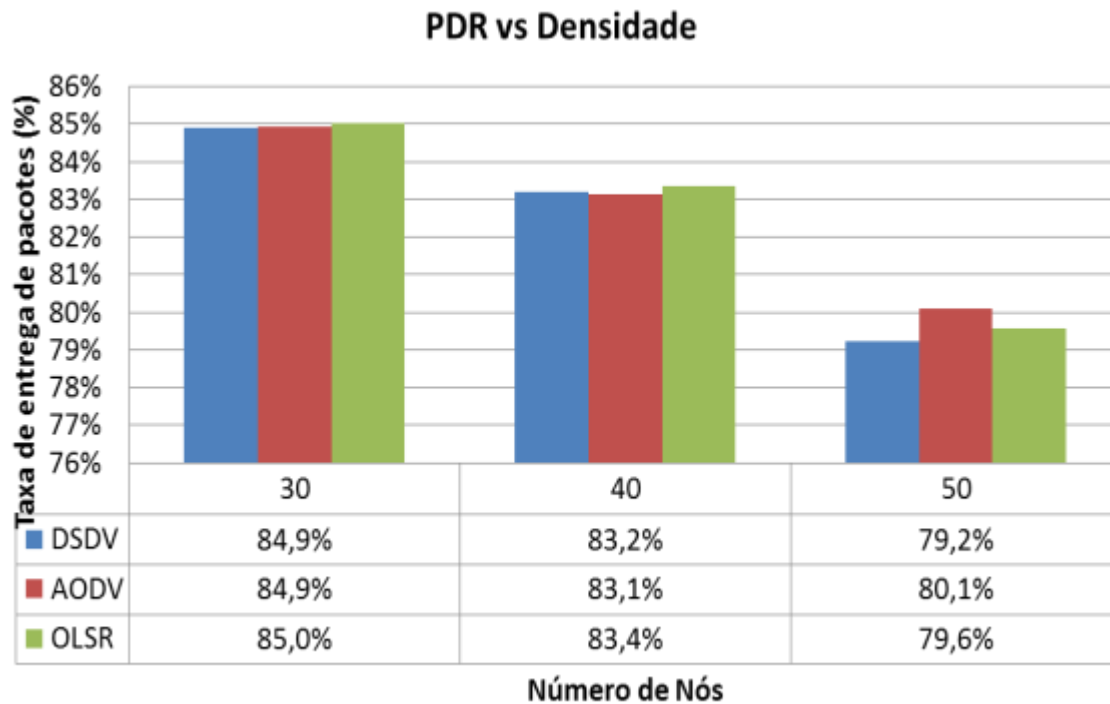
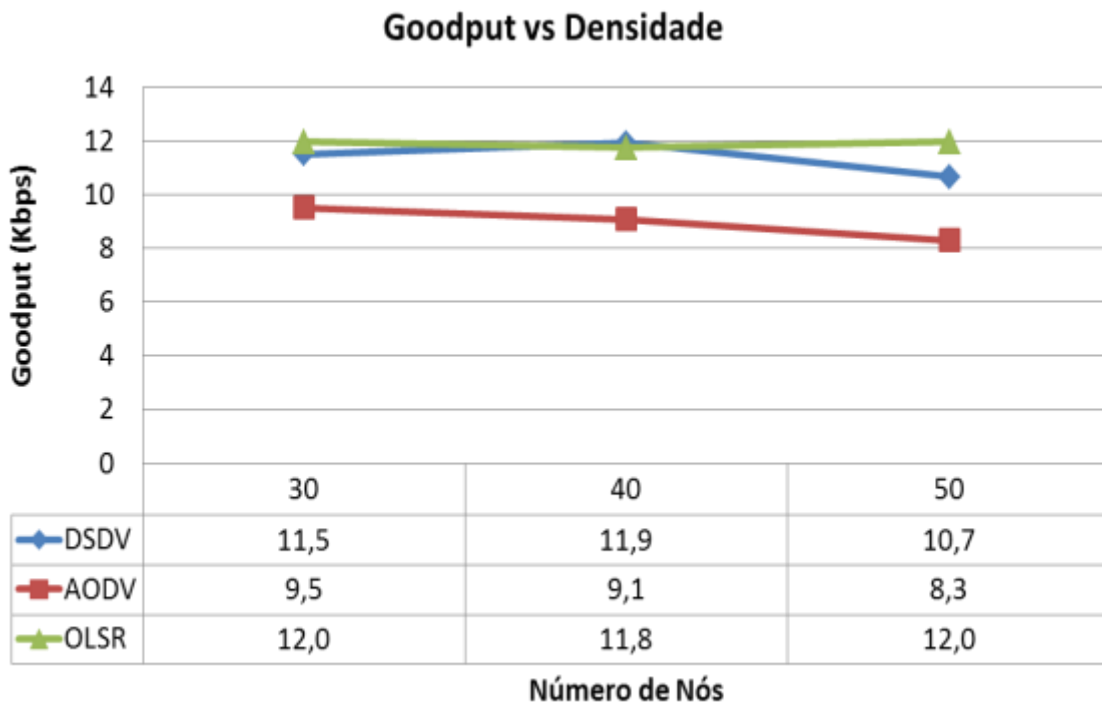


Figura 25 Taxa de entrega de pacotes em função da quantidade de veículos.

Avaliando os resultados apresentados na Figura 25, notamos que densidade de veículos tem influência direta na taxa de entrega de pacotes. O protocolo DSDV apresentou bons resultados em cenários com baixa quantidade de Nós, entretanto em redes com alta densidade como é o caso para o terceiro cenário com um total de 50 Nós sua performance é reduzida. Isso se deve ao fato que por ser um ambiente com alta densidade e grande quantidade de quebras de *links*, devido à mobilidade, a manutenção das tabelas de roteamento é prejudicada. O protocolo AODV apresentou altas taxas de entrega de pacote em ambos os cenários simulados, porém como será melhor abordado na próxima métrica de avaliação *goodput*, essa alta taxa não se traduz em boa performance de comunicação. Por fim é avaliado o protocolo de roteamento OLSR que também sofreu uma queda de

performance em cenários com alta densidade, entretanto manteve uma boa taxa de entrega de pacotes, sendo estes de informação útil e não de repetição como foi o caso do AODV.

O segundo parâmetro de avaliação estudado foi o *goodput* em função da quantidade de Nós, como demonstra a Figura 26. O *goodput* se traduz por quantificar somente os dados úteis recebidos, descartando dados de retransmissão.



**Figura 26 Taxa de *goodput* em função da quantidade de veículos.**

Avaliando os resultados apresentados no gráfico da Figura 26 notamos que cada protocolo apresentou respostas distintas de taxas de *goodput* em função da quantidade de veículos. O protocolo DSDV apresentou bom desempenho até o cenário de média densidade com 40 Nós, entretanto teve sua performance reduzida em topologias com alta densidade, isso se deve ao fato da baixa taxa de entrega de pacotes como foi avaliado no parâmetro anterior. Já o protocolo AODV é o que apresenta as menores taxas de *goodput*, apesar das altas taxa de PDR apresentadas anteriormente. Isto porque a quantidade de pacotes entregues não se traduz a informação útil, em virtude de o AODV ser um protocolo reativo e enviar um grande número de mensagens de descobrimento de rota, o que acaba por gerar um grande número de colisões afetando diretamente na taxa de *goodput*. E por fim o protocolo OLSR

foi o qual demonstrou melhores resultados em função do aumento da densidade da rede, em consequência da sua boa característica de gerenciamento por meio do emprego da técnica de MPR, que evita a inundação da rede com informações repetidas.

A métrica de *routing overhead* é responsável por expressar a sobrecarga sofrida pela rede no processamento em excesso realizado pelos protocolos. Algumas das fontes causadoras de sobrecarga de roteamento em uma rede são as quantidades de Nós vizinhos, o número de saltos a partir da origem para o destino, além do congestionamento da rede e erros de rota.

A Figura 27 demonstra os resultados de *routing overhead* obtidos para cada um dos protocolos, em função do aumento de densidade da rede. Avaliando-se os resultados apresentados, notamos que o protocolo que gera o maior *routing overhead* é o AODV devido ao fato dos procedimentos de descobertas e manutenção de rota. O protocolo DSDV também apresenta altas taxas de *routing overhead* em consequência da manutenção das tabelas de roteamento. Tais protocolos causam o consumo excessivo de mensagens de sinalização, o que se torna mais preocupante com o aumento da rede. Já para o protocolo OLSR a diminuição do *routing overhead* se dá por conta do menor número de retransmissões.

Outro parâmetro avaliado é a taxa de atraso sofrido por cada protocolo, a Figura 28 apresenta os resultados obtidos. Este parâmetro se refere ao tempo de atraso na transmissão de um pacote de dados da origem ao destino, e é de extrema importância uma vez que as principais aplicações de rede VANET estão voltadas a segurança e demandam baixos tempos de resposta.

Observando-se a Figura 28, notamos inicialmente que ambos os protocolos sofrem atrasos conforme o aumento de densidade da rede. No primeiro cenário com a quantidade de 30 veículos, notamos que o protocolo com maior atraso é o AODV, isso se deve ao fato da inundação causada na rede pelo grande volume de mensagens de controle. Entretanto, conforme a densidade de veículos vai aumentando o protocolo DSDV é o que apresenta atraso mais significativo. E nos três cenários o protocolo OLSR apresentou bons resultados.

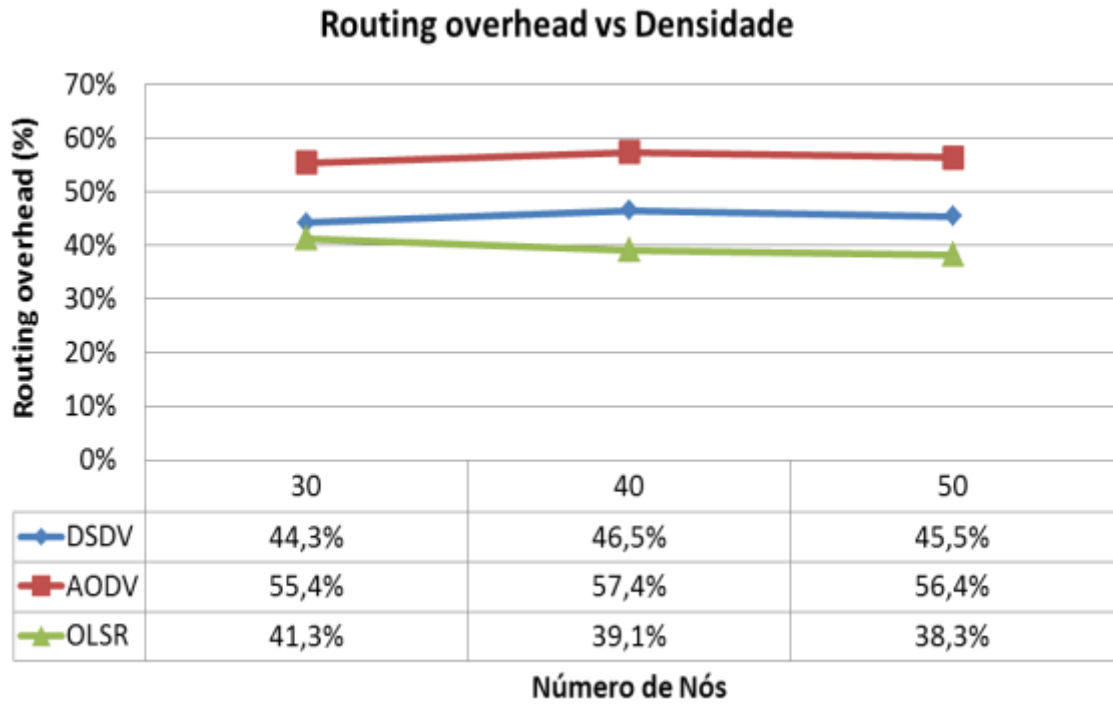


Figura 27 Taxa de *routing overhead* em função da quantidade de veículos.

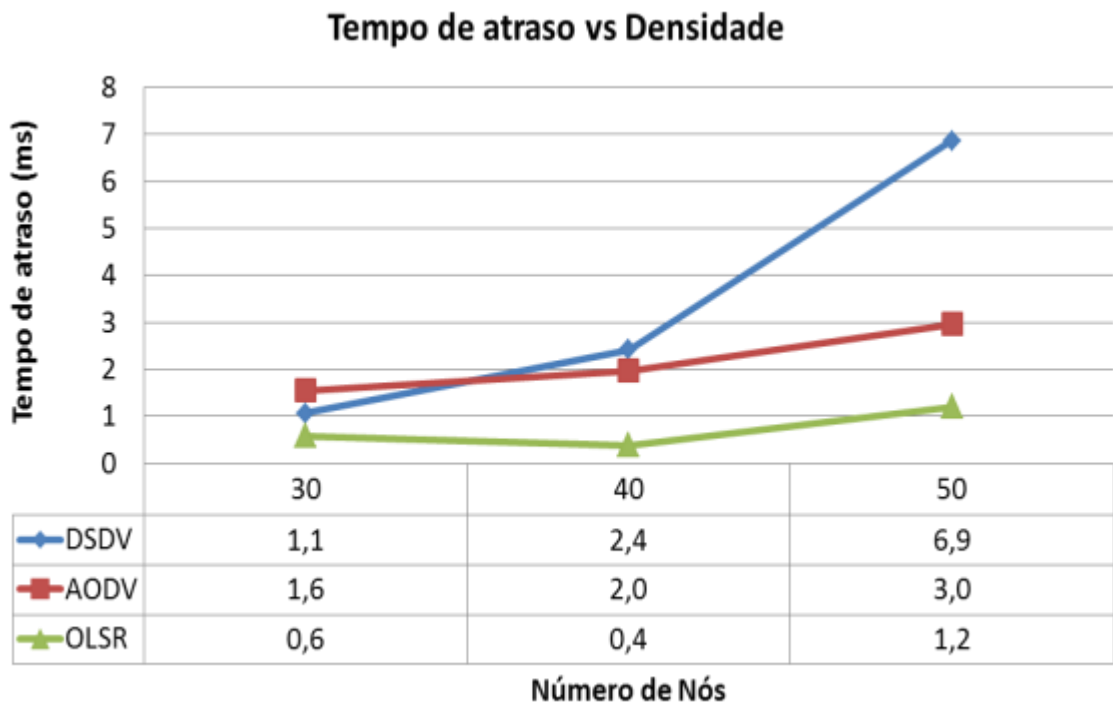


Figura 28 Tempo de atraso na entrega de pacotes em função da quantidade de veículos.

Os resultados e análises apresentados nesse estudo tem sua validade confirmada com base em trabalhos já realizados sobre o desempenho dos protocolos de roteamento em redes VANETs. Em [14] o autor realiza um estudo dos protocolos de roteamento AODV, OLSR e DSDV em comunicações V2V e V2R, através da implementação no simulador NS-3. Os protocolos foram avaliados em função dos parâmetros QoS como, taxa de transferência (PDR), taxa de perda de pacotes (PLR) e *routing protocol*. Sua simulação utilizou-se do padrão IEEE 802.11p e do modelo de propagação Nakagami-n. Os resultados obtidos neste estudo mostram que entre os protocolos AODV, DSDV e OLSR, o qual apresenta melhores resultados e permite ser aplicado em uma rede de comunicação veicular é o OLSR. Outros trabalhos que também serviram como referências para esta dissertação foram [15] e [16], ambos realizados pelos mesmos autores e complementares. Em [15] é realizada a investigação do desempenho do protocolo OLSR em relação ao AODV. Já em [16] traz-se a avaliação do protocolo OLSR em comparação ao DSDV. Ambos os estudos são realizados no simulador NS-3, e tem por base a utilização do padrão IEEE 802.11p, modelo de propagação *Two-Ray Ground* e diferentes fluxos de transmissão. As avaliações são feitas com relação aos parâmetros de taxa de entrega de pacotes (PDR) e taxa de transferência. Os resultados de simulação em ambos os estudos mostram que o protocolo OLSR funciona melhor em redes de comunicação veicular.

E de forma a fazer uma análise mais aprofundada sobre os protocolos de roteamento, agregando um valor adicional ao estudo, trouxesse a análise em função da velocidade de deslocamento dos Nós (veículos).

A velocidade com que os Nós se deslocam tem influência direta sobre alguns parâmetros, devido à ocorrência de quebras de *links* de comunicação. A seguir são apresentados os desempenhos de cada um dos protocolos de roteamento estudados, conforme o acréscimo de velocidade com que os Nós se deslocam. Para isto, foi utilizado o cenário com alta densidade (50 Nós) e as velocidades de deslocamento testadas começando com a velocidade de 15 m/s (54 km/h) até a velocidade de 55 m/s (198 km/h). A justificativa para o aumento de intervalos de simulação em relação do parâmetro de densidade, que possui somente três, e que durante a avaliação de alguns parâmetros (*goodput*) observou-se um comportamento diferente e de forma a tentar descobrir o motivo deste comportamento aumentou-se o número de intervalos.

A Figura 29 mostra o resultado da taxa de entrega de pacotes em função da variação da velocidade de deslocamento dos Nós (veículos). É possível notar que o acréscimo de velocidade tem influência direta na taxa de entrega, e ambos os protocolos são afetados negativamente. Sendo que o protocolo que apresentou melhor suporte ao aumento da velocidade foi o OLSR mantendo uma taxa de entrega superior aos demais.

A Figura 30 apresenta os resultados do *goodput* em função da velocidade de deslocamento. Nota-se que o protocolo mais afetado é o AODV tendo uma taxa de transmissão inferior aos demais, com uma média de 8,29 Kbps. O protocolo DSDV apresentou bom resultados no geral, porém, quando submetido a altas velocidades foi o qual obteve pior resposta. Já o protocolo OLSR, foi o qual apresentou variações mais suaves e o melhor comportamento quando submetido em um cenário com alta mobilidade. Contudo, destaca-se o cenário com velocidade de 35 m/s, que atingiu a maior taxa de transmissão. A justificativa para a melhora da métrica de *goodput* na velocidade de 35 m/s se deve ao alcance de transmissão, isto porque em velocidades inferiores os nós estão distantes (o cenário simulado possui uma área de 4 km<sup>2</sup>) e conforme o aumento da velocidade eles tendem a se aproximar chegando em seu ponto ótimo para esta simulação na velocidade de 35 m/s. Entretanto, conforme o acréscimo da velocidade para valores superiores a 35 m/s, que corresponde a 126 km/h, o índice de *goodput* torna a deteriorar devido ao fato que a partir deste valor a mobilidade da rede é muito alta o que gera instabilidade dos *links* de comunicação.



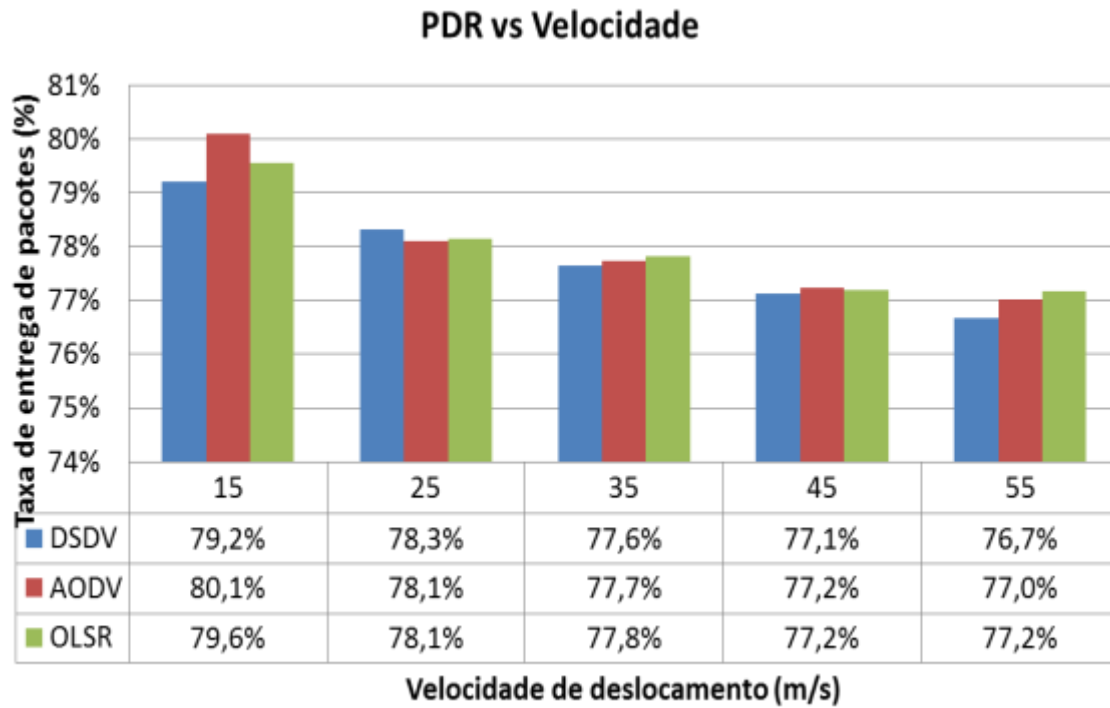


Figura 29 Taxa de PDR em função da velocidade de deslocamento dos veículos.

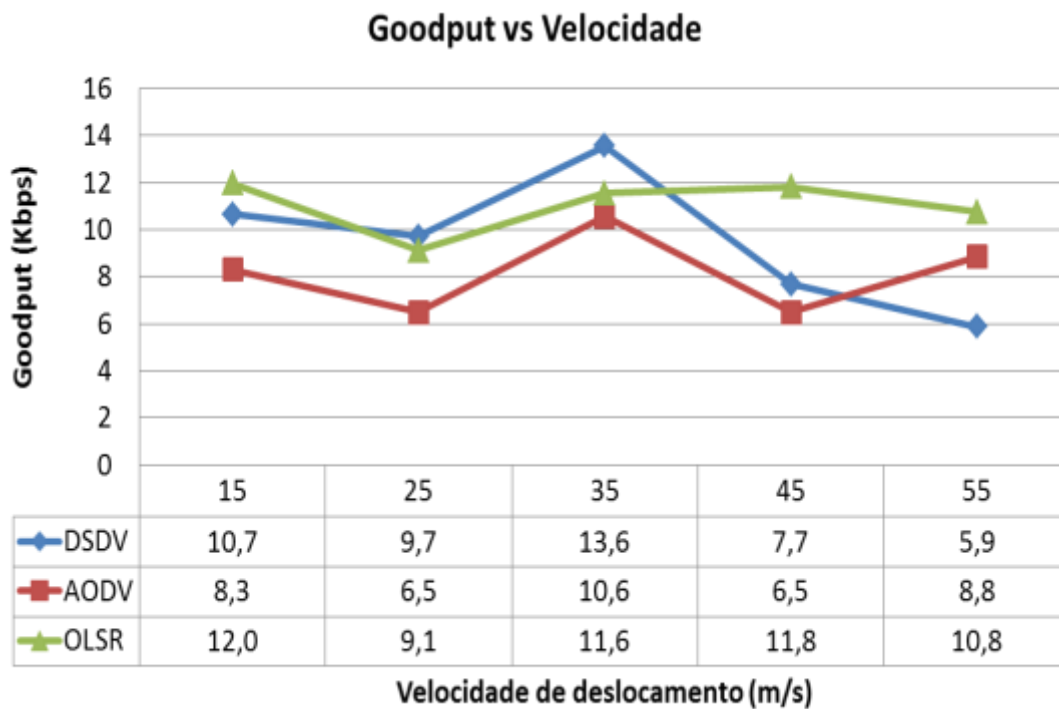
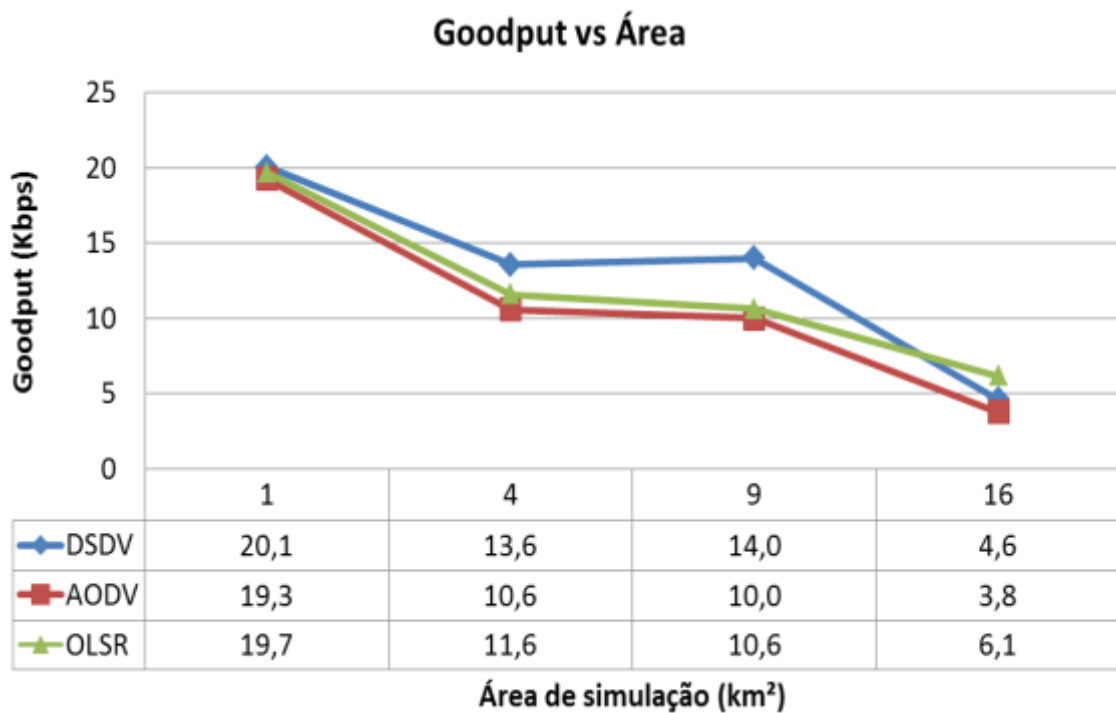


Figura 30 Taxa de *goodput* em função da velocidade de deslocamento dos veículos.

De forma a comprovar a influência da distância entre os Nós na taxa de *goodput*, realizou-se uma simulação variando o tamanho da área de simulação, como mostra a Figura 31. Para isto manteve-se fixa a velocidade de deslocamento de 35 m/s, a qual gerou a melhor taxa de *goodput*, e variou-se área de simulação de cenários de menor área, onde os Nós estão próximos, até cenários grandes. Observou-se que conforme o aumento da área apesar da boa mobilidade obtida com a velocidade de 35 m/s, as distâncias entre os nós (veículos) são tão grandes que a taxa de *goodput* é seriamente afetada.



**Figura 31** Taxa de *goodput* em função da área de simulação.

A Figura 32 traz os resultados da taxa de *routing overhead* em função da velocidade de deslocamento dos Nós (veículos). É possível notar que conforme o aumento da velocidade este parâmetro é pouco afetado para ambos os protocolos. Entretanto, mante-se a premissa que devido ao fato do protocolo AODV ter a característica reativa e enviar um grande número de mensagens de controle de rota, possui uma alta taxa de *overhead*. Sendo seguido pelo DSDV que tem seu *overhead* gerado devido a manutenção das tabelas de roteamento. E assim como nas simulações envolvendo o aumento da densidade de rede o protocolo OLSR, obteve baixos índices de *routing overhead* devido ao emprego da técnica de MPRs.

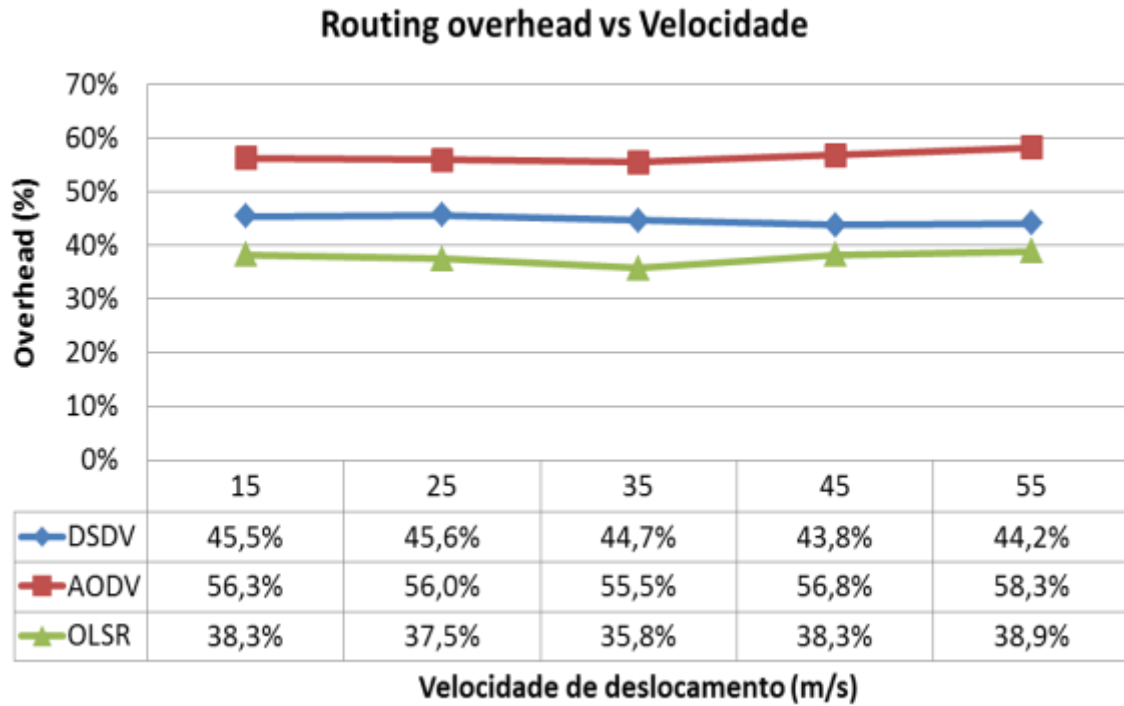


Figura 32 *Routing overhead* em função da velocidade de deslocamento dos veículos.

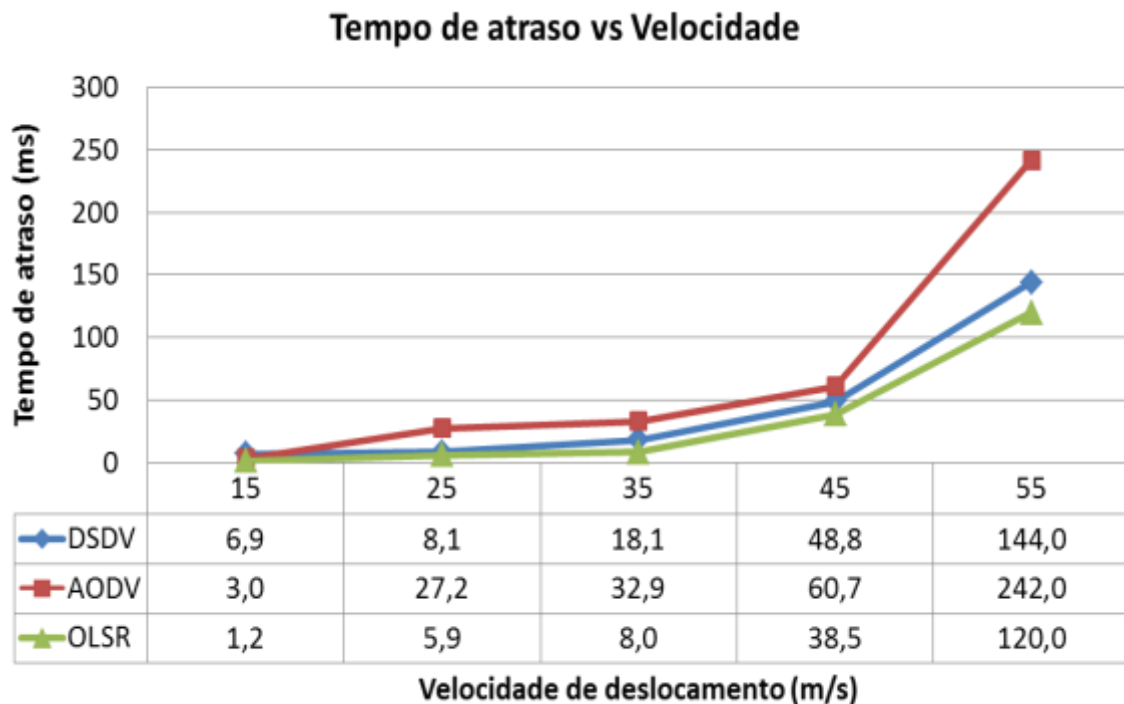


Figura 33 Tempo de atraso na entrega de pacotes em função da velocidade de deslocamento dos veículos.

A Figura 33 apresenta o tempo de atraso da entrega de pacotes em função da velocidade de deslocamento dos Nós. Mostra-se que para baixas velocidades, o atraso na entrega de pacotes é semelhante para todos os protocolos. É possível constatar que, conforme o aumento da velocidade o tempo de atraso aumenta, isto se deve ao fato do aumento da quebra dos *links* de comunicação devido à mobilidade. No entanto, o protocolo OLSR foi o qual apresentou a melhor resposta conforme o aumento da velocidade de deslocamento. Isto está ligado diretamente a boa taxa de entrega obtida por este protocolo.

Sendo assim após as análises dos diversos parâmetros sobre os protocolos de roteamento, seja em função da densidade da rede ou da velocidade de deslocamento, o protocolo OLSR mostrou-se superior aos demais quando aplicado em uma rede VANET, com boas características para o suporte tanto no aumento de densidade da rede como da velocidade de deslocamento, com boas taxas de transmissão e tempo de atraso inferior em relação aos outros protocolos estudados, sendo estes fatores de extrema importância para as aplicações de redes VANET. E também este protocolo demonstrou ter baixas taxas de *overhead*, parâmetro responsável por determinar a sobrecarga da rede, logo isto demonstra que é um protocolo escalável e suporta a expansão da rede.



# 6. CONCLUSÃO E TRABALHO FUTURO

## 6.1. CONCLUSÃO

As redes veiculares são uma área de estudo bastante ampla, com um potencial de pesquisa extremamente grande. As normas que regulamentam estas redes estão em estado de maturação, passando por constantes renovações e melhorias, sendo de fundamental importância os estudos voltados para as análises sobre o tráfego de dados nessas redes, de forma a garantir que as aplicações por elas fornecidas sejam cumpridas.

Desta forma a avaliação realizada neste estudo sobre dos protocolos de roteamento (DSDV, AODV e OLSR), permitiu examinar o desempenho destes protocolos em termos das métricas de qualidade de serviços, taxa de entrega de pacotes (PDR), *goodput*, *routing overhead* e tempo de atraso.

E sendo assim, dentre os protocolos avaliados, o qual apresentou melhores resultados foi o OLSR, devido a sua boa característica de gerenciamento, através da técnica de MPR, o que lhe permite evitar inundações da rede com dados repetidos, não ocupando toda a banda de

transmissão e permitindo suportar uma boa escalabilidade da rede. Isto nos permite responder a pergunta fundamental desta dissertação, a qual questiona se os protocolos de comunicação disponíveis atualmente são adequados para redes veiculares? Com base na avaliação dos três protocolos, para um cenário robusto onde a mobilidade é alta e a quantidade de Nós é alta, o OLSR foi o qual obteve melhores resultados que o permitiriam ser utilizado em uma rede de comunicação veicular.

Entretanto, vale ressaltar que estes protocolos foram concebidos para redes MANETs, que têm como característica baixa mobilidade, fazendo com que a rede sofra um menor número de mudanças na topologia, conseqüentemente um menor número de mensagens de controle da rede. Diferente das redes VANET, que apesar de estarem inclusas nas MANET apresentam características específicas, sendo a alta mobilidade a principal delas.

Outro ponto a se ressaltar é com relação aos simuladores, onde notou-se que a abordagem através de simuladores acoplados, que fazem uso de um simulador de rede e um simulador de mobilidade separadamente, não é uma das mais eficiência devido ao fato que para a simulação de diferentes cenários com diferentes configurações, obriga a um trabalho dobrado de geração do arquivo de mobilidade, para após isso carregá-los no simulador de rede. Porém, uma evolução desses simuladores é dificultada, pois a grande maioria é *open source* e não possui incentivo financeiro, sendo na maioria dos casos utilizados por pesquisadores e estudantes no desenvolvimento de seus estudos e trabalhos de conclusão de curso, que após atingirem seus objetivos não têm continuidade.

## **6.2. TRABALHO FUTURO**

Como trabalho futuro seria interessante verificar o desempenho destes protocolos, em cenários mais realísticos com a presença de semáforos, faixas duplas, vias de sentidos opostos, entre outras características presentes em um cenário de comunicação veicular.

Além disto, com base nos resultados obtidos foi possível identificar os principais fatores que comprometem a comunicação veicular, podendo isto servir como base para a apresentação de propostas de melhoria aos atuais protocolos, como também o desenvolvimento de novos, mais eficientes e capazes de se adaptar a diversos tipos de cenários.

## *Referências Documentais*

- [1] E. G. d. Carvalho, “Inovação tecnológica na indústria automobilística: características e evolução recente,” *Economia e Sociedade*, vol. 17, n. 3, pp. 429-461, Dezembro 2008.
- [2] J. SOUSANIS, “World Vehicle Population Tops 1 Billion Units.,” 2011. [Online]. Available: <http://wardsauto.com/news-analysis/world-vehicle-population-tops-1-billion-units>. [Acesso em 10 Junho 2016].
- [3] ACEA, “European Automobile Manufacturers Association,” [Online]. Available: <http://www.acea.be/>. [Acesso em 22 Setembro 2016].
- [4] D. Sperling e D. Gordon, “Two Billion Cars: Transforming a Culture.,” *Tr News*, vol. 259, pp. 3-9, 2008.
- [5] WORLD HEALTH ORGANIZATION, “GLOBAL STATUS REPORT ON ROAD SAFETY,” Geneva, 2015.
- [6] NHTSA’s National Center for Statistics and Analysis, “DOT HS 812 115 - Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey,” 2015.
- [7] World Health Organization, Maio 2016. [Online]. Available: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/en/>. [Acesso em Junho 2016].
- [8] National Highway Traffic Safety Administration, “Crash Factors in Intersection-Related Crashes: An On-Scene Perspective,” Washington DC, 2010.
- [9] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (US DOT), “Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communications for Safety,” 2015. [Online]. Available: [http://www.its.dot.gov/connected\\_vehicle/connected\\_vehicle\\_research.htm](http://www.its.dot.gov/connected_vehicle/connected_vehicle_research.htm). [Acesso em 10 Junho 2016].
- [10] European New Car Assessment Programme, “2020 RoadMap,” 2015. [Online]. Available: <http://www.euroncap.com/>. [Acesso em 15 Outubro 2016].
- [11] P. Gao, R. Hensley e A. Zielke, “A road map to the future for the auto industry,”



2014. [Online]. Available: <http://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/a-road-map-to-the-future-for-the-auto-industry>. [Acesso em 10 Junho 2016].
- [12] C. Morsinger e T. Hubing, "A REVIEW OF VEHICLE-TO-VEHICLE AND VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE INITIATIVES," *The Clemson University Vehicular Eletronics Laboratory*, n. 7, 2007.
- [13] Y. Fangchun, W. Shangguang, L. Jinglin, L. Zhihan e S. Qibo, "An overview of Internet of Vehicles," *China Communications*, vol. 11, n. 10, pp. 1-15, 2014.
- [14] T. S. Chouhan e R. S. Deshmukh, "Analysis of DSDV,OLSR and AODV Routing Protocols in VANETS Scenario: Using NS3," em *International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks*, 2015.
- [15] E. Spaho, M. Ikeda, L. Barolli, F. Xhafa, M. Younas e M. Takizawa, "Performance Evaluation of OLSR and AODV Protocols in a VANET Crossroad Scenario," em *IEEE 27th International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 2013.
- [16] E. Spaho, M. Ikeda, L. Barolli, F. Xhafa, M. Younas e M. Takizawa, "Performance of OLSR and DSDV Protocols in a VANET Scenario: Evaluation Using CAVENET and NS3," em *Seventh International Conference on Broadband, Wireless Computing, Communication and Applications*, 2012.
- [17] E. A. Lee, "Cyber Physical Systems: Design Challenges," em *2008 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*, [S.I.], 2008.
- [18] N. Lu, N. Cheng, N. Zhang, X. Shen e J. W. Mark, "Connected Vehicles: Solutions and Challenges.," *IEEE Internet Of Things Journal.*, vol. 1, n. 4, pp. 289-299, 2014.
- [19] C. Campolo, A. Molinaro e R. Scopigno, "From today's VANETs to tomorrow's planning and the bets," *Vehicular Communications*, vol. 2, n. 3, pp. 158-171, 2015.
- [20] A. Handley, "How Honda's V2V and V2P techonology uses smartphones to save lives ?," 26 Setembro 2013. [Online]. Available: <http://quartsoft.com/blog/201309/honda-v2v-v2p-technology-smartphones>. [Acesso em 18 Julho 2016].
- [21] General Motors Company, "OnStar," [Online]. Available: <https://www.onstar.com/us/en/home.html>. [Acesso em 2016 Outubro 06].

- [22] M. S. Anwer e C. Guy, “A Survey of VANET Technologies,” *Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences*, vol. 5, n. 9, pp. 661-671, 2014.
- [23] R. Davies, “5G network technology,” EPRS | European Parliamentary Research Service, 2016.
- [24] “Carmakers, Telecom Players Join Forces on 5G.,” [Online]. Available: [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1330525&](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1330525&). [Acesso em 28 Setembro 2016].
- [25] H.-Y. Kim, D.-M. Kang, J.-H. Lee e T.-M. Chung, “A Performance Evaluation of Cellular Network Suitability for VANET,” *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, vol. 6, n. 4, pp. 448-451, 2012.
- [26] Y. Liu, X. Chen, C. Chen e X. Guan, “Traffic big data analysis supporting vehicular network access recommendation,” em *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, [S.I.], 2016.
- [27] V. K. Garg, *Wireless Communications & Networking*, São Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc. , 2007.
- [28] S. Kindt, “Is Sigfox/LoRa the new WiMAX?,” 21 Outubro 2015. [Online]. Available: <https://blog.networks.nokia.com/mobile-networks/2015/10/21/is-sigfoxlora-the-new-wimax/>. [Acesso em 25 Setembro 2016].
- [29] J. S. Huang, O. Yang e F. Lawal, “Sending Safety Video over WiMAX in Vehicle Communications,” *Future Internet*, vol. 5, n. 4, pp. 535-567, 2013.
- [30] IEEE Std 802.11p-2010, *IEEE Standard - Telecommunications and information exchange between systems Specific Requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments..*
- [31] SIGFOX, “SigFox,” [Online]. Available: <http://www.sigfox.com/en/>. [Acesso em 27 Setembro 2016].
- [32] LoRa Alliance, “LoRa,” [Online]. Available: <https://www.lora-alliance.org/>. [Acesso em 27 Setembro 2016].
- [33] Y. Li, “An Overview of the DSRC/WAVE Technology.,” *Quality, Reliability, Security And Robustness In Heterogeneous Networks*, vol. 74, pp. 544-558, 2010.

- [34] Federal Communications Commission (FCC), “Code of Federation Regulations 47, Part 95 -- Personal Radio Services,” 2009.
- [35] EUROPEAN TELECOMMUNICATIONS STANDARDS INSTITUTE, “EN 302 571: Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TT,” Sophia Antipolis, 2008.
- [36] ASSOCIATION OF RADIO INDUSTRIES AND BUSINESSES (ARIB), “STD-T75: DEDICATED SHORT-RANGE COMMUNICATION SYSTEM,” Japão, 2001.
- [37] U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (US DOT), “ASTM E2213-03 - Standard Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems - 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.,” WASHINGTON, 2006.
- [38] ISO TC204 WG16, “Communications in Cooperative Intelligent Transport Systems,” 2015. [Online]. Available: <http://calm.its-standards.eu/>. [Acesso em 6 Maio 2016].
- [39] Information Society Technologies, “Co-operative Networks for Intelligent Road Safety,” [Online]. Available: <http://www.transport-research.info/project/co-operative-networks-intelligent-road-safety>. [Acesso em 21 Julho 2016].
- [40] P. Kompfner, “Cooperative systems for road transport,” 2010. [Online]. Available: <http://cvt-project.ir/En/EnNewsDetail.aspx?SubjectType=99&InfoID=1057>. [Acesso em 2016 Setembro 29].
- [41] E. C. I. Society, “SAFESPOT Integrated Project,” [Online]. Available: <http://www.safespot-eu.org/challenges.html>. [Acesso em 21 Julho 2016].
- [42] CAR 2 CAR COMMUNICATION CONSORTIUM, “C2C-CC Manifesto v1.1,” 2007.
- [43] AdaptIVe Consortium, “Automated Driving Applications & Technologies for Intelligent Vehicles,” [Online]. Available: <https://www.adaptive-ip.eu/>. [Acesso em 21 Julho 2016].
- [44] R. Frank, W. Bronzi, G. Castignani e T. Engel, “Bluetooth Low Energy: An Alternative Technology for VANET Applications,” em *2014 11th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Obergurgl, 2014.

- [45] P. P. V. W. C. S. C. A. G. Y. F. H. Paolo Barontib, "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards," *Computer Communications*, vol. 30, n. 7, pp. 1655-1695, 2007.
- [46] K. R. K. Bhargav e R. Singhal, "Zigbee based VANETs for accident rescue missions in 3G WCDMA networks," em *Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite (GHTC-SAS)*, [S.I.], 2013.
- [47] V. Center, "Vehicle Information and Communication System," [Online]. Available: <http://www.vics.or.jp/en/vics/>. [Acesso em 21 Julho 2016].
- [48] A. D. R. S. D. A. Asmaa El Gueraa, "An efficient Transceiver for Vehicular Ad hoc Network Based on IR-UWB," em *2014 Second World Conference on Complex Systems (WCCS)*, Agadir, 2014.
- [49] IEEE, "Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light," 2001.
- [50] A. Sewaiwar, P. P. Han e Y. H. Chung, "3-Gbit/s Indoor Visible Light Communications Using Optical Diversity Schemes," *IEEE Photonics J.*, vol. 7, n. 9, pp. 1 - 9, 2015.
- [51] Y. Wang, X. Huang, L. Tao e N. Chi, "1.8-Gb/s WDM visible light communication over 50-meter outdoor free space transmission employing CAP modulation and receiver diversity technology," *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)*, pp. 1-3, 2015.
- [52] S. Yu, O. Shih e H. Tsai, "Smart Automotive Lighting for Vehicle Safety," *IEEE Communications Magazine*, pp. 50-59, 2013.
- [53] A. Bazzi, B. M. Masini, A. Zanella e A. Calisti, "Visible light communications as a complementary technology for the," *Computer Communications*, vol. 93, pp. 39 - 51, 2016.
- [54] J. Harri, F. Filali e C. Bonnet, "Mobility Models for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey and Taxonomy," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 11, n. 4, pp. 19 - 41, 2009.
- [55] T. Larsson e N. Hedman, "Routing Protocols in Wireless Ad-hoc Networks - A simulation study," Universidade Técnica de Luleå, Estocolmo, 1998.
- [56] R. Kumar e M. Dave, "Mobility Models and their Affect on Data Aggregation and

- Dissemination in Vehicular Networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 79, n. 3, pp. 2237 - 2269, 2014.
- [57] N. C. e. Silva, *A simulação dos protocolos de roteamento em redes veiculares para análise da influência da densidade e mobilidade veicular*, São Paulo, 2016.
- [58] L. U. Aguiar, C. T. Barba, J. E. Jiménez e M. A. Igartua, “On the Impact of Building Attenuation Models in VANET Simulations of Urban Scenarios”, *Eletronics 2015*, vol. 4, n. 1, pp. 37 - 58, 2015.
- [59] United States Census Bureau, “Topologically Integrated Geographic Encoding and Referencing (TIGER),” [Online]. Available: <https://www.census.gov/geo/maps-data/data/tiger.html>. [Acesso em 26 Outubro 2016].
- [60] Google, “Google Earth,” [Online]. Available: <https://www.google.com/earth/>. [Acesso em 26 Outubro 2016].
- [61] Shifali e Y. Juneja, “Simulation Environment for VANET,” *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 4, n. 5, pp. 492 - 497, 2015.
- [62] F. J. Martinez, “CityMob: A Mobility Model Pattern Generator for VANETs,” *ICC Workshops - 2008 IEEE International Conference on Communications Workshops*, pp. 370 - 374, 2008.
- [63] J. Härrri, M. Fiore, F. Filali e C. Bonnet, “VanetMobiSim: generating realistic mobility patterns for VANETs,” Instituto Eurécom e Politecnico Di Torino, [Online]. Available: <http://vanet.eurecom.fr/>. [Acesso em 15 Agosto 2016].
- [64] F. E. Bustamante, J. Otto e D. Choffnes, “STRAW - STREET RANDOM WAYPOINT - VEHICULAR MOBILITY MODEL FOR NETWORK SIMULATIONS,” [Online]. Available: <http://www.aqualab.cs.northwestern.edu/projects/144-straw-street-random-waypoint-vehicular-mobility-model-for-network-simulations-e-g-car-networks>. [Acesso em 15 Agosto 2016].
- [65] N. Aschenbruck, R. Ernst, E. Gerhards-Padilla e M. Schwamborn, “BonnMotion: a mobility scenario generation and analysis tool,” em *Proc. of 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques (SIMUTools'10)*, Malaga, 2010.
- [66] A. Helmy e S. Kumar, “The Network Simulator - ns-2,” [Online]. Available:

- <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. [Acesso em 18 Agosto 2016].
- [67] “Simulador NS-3,” [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/> . [Acesso em 18 Agosto 2016].
- [68] L. Bajaj, M. Takai, R. Ahuja, K. Tang, R. Bagrodia e M. Gerla, “GloMoSim: A Scalable Network Simulation Environment,” UCLA CSD, Los Angeles, 1999.
- [69] A. Varga, “OMNet++,” 2009. [Online]. Available: <https://omnetpp.org/>. [Acesso em 18 Agosto 2016].
- [70] S. A. Hussain e A. Saeed, “An Analysis of Simulators for Vehicular Ad hoc Networks,” *World Applied Sciences Journal*, vol. 23, n. 8, pp. 1044 - 1048, 2013.
- [71] F. P. d. Araújo, “IMPLEMENTAÇÃO E AVALIAÇÃO DE NOVOS MODELOS DE MOBILIDADE PARA O SIMULADOR JIST/SWANS,” Recife, 2008.
- [72] Riverbed Technologies, “OPNET,” [Online]. Available: [www.opnet.com/university\\_program/itguru\\_academic\\_edition/](http://www.opnet.com/university_program/itguru_academic_edition/). [Acesso em 05 Outubro 2016].
- [73] S. Wang e C. Chou, “NCTUns tool for wireless vehicular communication network researches,” *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, n. 7, pp. 1211 - 1226, 2009.
- [74] J.-P. Hubaux, J.-Y. L. Boudec, P. Thiran e M. Grossglauser, “Traffic and Network Simulation Environment,” [Online]. Available: <http://lca.epfl.ch/projects/trans/>. [Acesso em 30 Agosto 2016].
- [75] R. Mangharam, D. Weller, R. Rajkumar, P. Mudalig e F. Bai, “GrooveNet: A Hybrid Simulator for Vehicle-to-Vehicle Networks,” em *3rd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems - Workshops*, 2006.
- [76] IEEE Std 1609.0-2013, *IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture*.
- [77] IEEE Std 1609.2-2006, *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Security Services for Applications and Management Messages*.
- [78] IEEE Std 1609.3-2010, *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services*.

- [79] IEEE Std 1609.4-2010, *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)--Multi-channel Operation*.
- [80] IEEE Std 1609.6, *Draft Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)— Remote Management Services*.
- [81] IEEE Std 1609.11-2010, *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)-- Over-the-Air Electronic Payment Data Exchange Protocol for Intelligent Transportation Systems (ITS)*.
- [82] IEEE Std 1609.12-2016, *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Identifier Allocations*.
- [83] C. Campolo, A. Molinaro e R. Scopigno, “From today’s VANETs to tomorrow’s planning and the bets,” *Vehicular Communications*, vol. 2, n. 3, pp. 158-171, 2015.
- [84] Y. L.Morgan, “Notes on DSRC & WAVE Standards Suite: Its Architecture, Design, and Characteristics.,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, n. 4, pp. 504-518, 2010.
- [85] S. A. M.Ahmed, S. H. S. Ariffin e N. Faisal, “Overview of Wireless Access in Vehicular Environment (WAVE) Protocols and Standards.,” *Indian Journal Of Science And Technology.*, vol. 6, n. 7, pp. 4994 - 5001, 2013.
- [86] C. E. Perkins e P. Bhagwat, “Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing DSDV for Mobile Computers,” *SIGCOMM - Comput. Commun. Rev.*, 1994.
- [87] C. Perkins, E. Belding-Royer e S. Das, “Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV).,” IETF RFC 3561, Junho 2003. [Online]. Available: <https://www.ietf.org/>. [Acesso em 10 Outubro 2016].
- [88] T. Clausen e P. Jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol (OLSR),” IETF RFC 3626, Outubro 2003. [Online]. Available: [www.ietf.org](http://www.ietf.org). [Acesso em 10 Outubro 2016].
- [89] P. Maheswara e K. B. Naik, “Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations in MANET,” *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 3, n. 4, pp. 1-5, 2013.
- [90] G. Carneiro, P. Fortuna e M. Ricardo, “FlowMonitor - a network monitoring framework for the Network Simulator 3 (NS-3),” em . *Proceedings Of The 4th*

*International Icst Conference On Performance Evaluation Methodologies And Tools*,  
[S.I.], 2009.

[91] S. Carpenter, M. Sichitiu, D. Underwood, M. Patwardhan e S. Starr, “Evaluating VANET Performance in ns-3,” em *In Workshop on ns-3 (WNS3)*, 2014.

[92] P. A. S. Magalhães, “Compressão de Cabeçalhos de Routing em Redes Ad-Hoc,”  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto , Porto, 2009.





## Anexo A. Script vanet-routing-compare.cc

Neste anexo são mostrados as modificações realizadas no script *vanet-routing-compare.cc*. Devido a grande extensão desse *script* são indicados somente os trechos que sofreram alteração.

```
...
//-----Inclusão do modulo Flow Monitor-----
110 #include "ns3/flow-monitor-module.h"
...
1705 void
1706 VanetRoutingExperiment::Run ()
1707 {
1708     NS_LOG_INFO ("Run Simulation.");
1709
1710     CheckThroughput ();
1711
1712     //-----Flow monitor-----
1713     Ptr<FlowMonitor> flowMonitor;
1714     FlowMonitorHelper flowHelper;
1715     flowMonitor = flowHelper.InstallAll();
1716
1717     Simulator::Stop (Seconds (m_TotalSimTime));
1718     Simulator::Run ();
1719
1720     flowMonitor->SerializeToXmlFile("NAME_FILE.xml", true, true);
1721
1722     Simulator::Destroy ();
1723 }
...
2355 void
2356 VanetRoutingExperiment::SetupScenario ()
2357 {
2358     // member variable parameter use
2359     // defaults or command line overrides,
2360     // except where scenario={1,2,3,...}
2361     // have been specified, in which case
2362     // specify parameters are overwritten
2363     // here to setup for specific scenarios
2364
2365     // certain parameters may be further overridden
2366     // i.e. specify a scenario, override tx power.
2367
2368     if (m_scenario == 1)
2369     {
2370         // 40 nodes in RWP 300 m x 1500 m synthetic highway, 10s
2371         m_traceFile = "";
2372         m_logFile = "";
2373         m_mobility = 2;
2374         if (m_nNodes == 156)
2375         {
```

```
2376         m_nNodes = 40;
2377     }
2378     if (m_TotalSimTime == 300.01)
2379     {
2380         m_TotalSimTime = 10.0;
2381     }
2382 }
2383 else if (m_scenario == 3)
2384 {
2385     m_logFile = "ns2-mobility-trace.log";
2386     m_mobility = 1;
2387 }
2388 }
...

```