



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**  
**MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

**BRUNO ARAUJO LIMA**

**HETVCAR: UMA ARQUITETURA HETEROGÊNEA PARA CENÁRIOS ESPARSOS**  
**DE AMBIENTES VEICULARES**

**FORTALEZA – CEARÁ**

**2018**

BRUNO ARAUJO LIMA

HETVCAR: UMA ARQUITETURA HETEROGÊNEA PARA CENÁRIOS ESPARSOS DE  
AMBIENTES VEICULARES

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Celestino Júnior

Co-Orientador: Prof. Dr. Rafael Lopes Gomes

FORTALEZA – CEARÁ

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Estadual do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Lima, Bruno Araujo.

HetVCar: Uma arquitetura heterogênea para cenários esparsos de ambientes veiculares [recurso eletrônico] / Bruno Araujo Lima. - 2018.

1 CD-ROM: il.; 4 ¼ pol.

CD-ROM contendo o arquivo no formato PDF do trabalho acadêmico com 66 folhas, acondicionado em caixa de DVD Slim (19 x 14 cm x 7 mm).

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciências e Tecnologia, Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação, Fortaleza, 2018.

Área de concentração: Redes de Computadores.

Orientação: Prof. Ph.D. Joaquim Celestino Junior.

Coorientação: Prof. Ph.D. Rafael Lopes Gomes.

1. Vanet. 2. LTE. 3. cluster. 4. DSRC. I. Título.

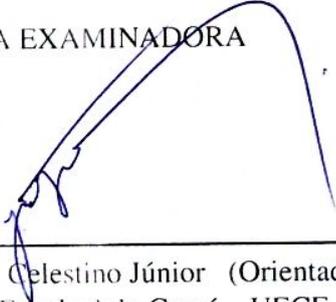
BRUNO ARAUJO LIMA

HETVCAR: UMA ARQUITETURA HETEROGÊNEA PARA CENÁRIOS ESPARSOS DE  
AMBIENTES VEICULARES

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciência da Computação do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciência da Computação. Área de Concentração: Ciência da Computação

Aprovada em: 27/07/2018

BANCA EXAMINADORA



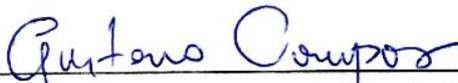
---

Prof. Dr. Joaquim Celestino Júnior (Orientador)  
Universidade Estadual do Ceará – UECE



---

Prof. Dr. Rafael Lopes Gomes (Co-Orientador)  
Universidade Estadual do Ceará – UECE



---

Prof. Dr. Gustavo Augusto Lima de Campos  
Universidade Estadual do Ceará – UECE



---

Prof. Dr. André Luiz Moura dos Santos  
Universidade Estadual do Ceará – UECE



---

Prof. Dr. Francisco José da Silva e Silva  
Universidade Federal do Maranhão - UFMA

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

A todos os professores por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Principalmente ao professores Celestino e Rafael, pela orientação, apoio e confiança.

Agradeço a minha namorada, Aline, que por mais difícil que fossem as circunstâncias, sempre teve paciência e confiança.

Meus agradecimentos aos amigos Diego Alysson e Flávio, companheiros de trabalhos e que fizeram parte da minha formação.

“Para ter um negócio de sucesso, alguém, algum dia, teve que tomar uma atitude de coragem.”

(Peter Drucker)

## RESUMO

Com a popularização de dispositivos sem-fio, a possibilidade de implementação de serviços de segurança tem sido estudados por anos no contexto de redes veiculares (VANET). A tecnologia Dedicated Short Range Communication (DSRC) foi desenvolvida para suprir as restrições de aplicações de segurança. Entretanto, DSRC não oferece uma ampla cobertura em ambientes de rodovias para determinadas aplicações. Considerando estas desvantagens, Long Term Evolution (LTE), uma tecnologia avançada de comunicação celular, foi considerada como uma alternativa para o DSRC. Um problema é a capacidade do LTE de suportar constantes transmissões de mensagens cooperativas de status em virtude do seu alto atraso. Neste contexto, esta dissertação de mestrado propõe uma arquitetura VANET heterogênea que utiliza uma abordagem baseada em agrupamentos no intuito de aprimorar as comunicações sem-fio, utilizando DSRC para comunicações intra-cluster e LTE para comunicações inter-cluster. Nos experimentos realizados, mostramos que nossa proposta melhora o desempenho da rede, aumentando a taxa de entrega de dados e reduzindo o atraso médio das aplicações executadas nos veículos.

**Palavras-chave:** VANET. LTE. cluster. DSRC.

## ABSTRACT

With the popularity of wireless devices, the possibility of implementing vehicular safety applications has been studied for years in the context of vehicular ad-hoc networks. Dedicated Short Range Communication (DSRC) is designed to serve the needs of vehicular safety applications. However, DSRC does not offer good enough coverage and range in highways for certain applications. Considering these drawbacks, LTE, an advanced cellular communication technology, is proposed as an alternative to DSRC. One problem is LTE capability to support regularly transmitted cooperative awareness messages due to high delay. Within this context, in this work we propose an architecture that uses a clustering approach in order to improve the wireless communications while using DSRC for intra-cluster communication and LTE for inter-cluster communication. We show that our proposition improves the network performance while increasing the data packet delivery and decreasing the average delay.

**Keywords:** DSRC. LTE. Cluster. vehicular networks.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 – Arquitetura das redes veiculares</b> . . . . .	19
<b>Figura 2 – Arquitetura WAVE</b> . . . . .	22
<b>Figura 3 – Funcionamento de uma conexão WiMax</b> . . . . .	28
<b>Figura 4 – Arquitetura básica do LTE</b> . . . . .	30
<b>Figura 5 – Arquitetura completa do LTE</b> . . . . .	31
<b>Figura 6 – Comparação entre arquitetura 802.11p e arquitetura heterogênea</b> . . .	34
<b>Figura 7 – Exemplos de transmissão celulares em V2I</b> . . . . .	35
<b>Figura 8 – Alocação do espectro DSRC americano</b> . . . . .	40
<b>Figura 9 – Arquitetura da coordenação de canal do MAC da pilha WAVE</b> . . . . .	41
<b>Figura 10 – Divisão do tempo em intervalos CCH e SCH</b> . . . . .	41
<b>Figura 11 – Escalonamento de pacotes em sistemas LTE</b> . . . . .	43
<b>Figura 12 – Pilha de camadas para HetVCar</b> . . . . .	46
<b>Figura 13 – Funcionamento do Dynamic Means</b> . . . . .	52
<b>Figura 14 – Arquitetura HetVNET</b> . . . . .	57
<b>Figura 15 – DPDR de 30 veículos com diferentes velocidades máximas</b> . . . . .	59
<b>Figura 16 – DPDR com diferentes números de veículos</b> . . . . .	60
<b>Figura 17 – Atraso médio de 30 veículos com diferentes velocidades máximas</b> . . . .	61
<b>Figura 18 – Atraso médio com diferentes números de veículos</b> . . . . .	61

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1 – Vantagens das tecnologias candidatas para HetVNET . . . . .</b>	<b>36</b>
<b>Quadro 2 – Serviços de segurança e casos de uso . . . . .</b>	<b>37</b>
<b>Quadro 3 – Serviços de segurança e casos de uso . . . . .</b>	<b>38</b>
<b>Quadro 4 – Trabalhos Relacionados . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>Quadro 5 – Parâmetros da simulação . . . . .</b>	<b>58</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CH	Cluster Head
DM	Dynamic Means
DPDR	Data Packet Delivery Ratio
DSRC	Distributed Short Range Communication
ITS	Intelligent Transportation System
IVC	Intervehicle Communication
LTE	Long Term Evolution
RSU	Road Side Unit

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	14
1.1	MOTIVAÇÃO	16
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	17
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	17
<b>1.1.3</b>	<b>Metodologia</b>	17
<b>1.1.4</b>	<b>Organização do trabalho</b>	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	19
2.1	REDES VEICULARES	19
<b>2.1.1</b>	<b>Definição</b>	19
<b>2.1.2</b>	<b>Características</b>	20
<b>2.1.3</b>	<b>Arquitetura</b>	21
<b>2.1.4</b>	<b>Aplicações</b>	23
2.1.4.1	Aplicações de segurança	23
2.1.4.2	Aplicações de conforto	24
2.2	REDES CELULARES	25
<b>2.2.1</b>	<b>Primeira Geração de Sistemas Móveis (1G)</b>	25
<b>2.2.2</b>	<b>Segunda Geração de Sistemas Móveis (2G)</b>	26
<b>2.2.3</b>	<b>Terceira Geração de Sistemas Móveis (3G)</b>	26
<b>2.2.4</b>	<b>Quarta Geração de Sistemas Móveis (4G)</b>	27
2.2.4.1	A tecnologia WiMax	27
2.2.4.2	A tecnologia LTE	29
<b>2.2.5</b>	<b>Quinta Geração de Sistemas Móveis (5G)</b>	32
2.3	REDES VEICULARES HETEROGÊNEAS	33
<b>2.3.1</b>	<b>Definição</b>	33
2.3.1.1	Comunicações V2I	35
2.3.1.2	Comunicações V2V	36
<b>2.3.2</b>	<b>Aplicações</b>	36
2.3.2.1	Serviços de segurança	37
2.3.2.2	Serviços de não segurança	38
<b>2.3.3</b>	<b>Desafios da camada MAC e <i>design</i> de redes</b>	39
2.3.3.1	Métricas do MAC	39

2.3.3.2	Padrões IEEE para protocolos MAC em VANETs . . . . .	39
2.3.3.2.1	<i>Padrões WAVE IEEE 1609.4</i> . . . . .	40
2.3.3.2.2	<i>Padrão IEEE 802.11p</i> . . . . .	42
2.3.3.3	Protocolos <i>broadcast/multicast</i> . . . . .	42
2.3.3.4	Alocação de Recursos e suporte a QoS . . . . .	43
<b>3</b>	<b>PROPOSTA</b> . . . . .	<b>45</b>
3.1	ESTRUTURAS DO HETVCAR . . . . .	45
<b>3.1.1</b>	<b>Camada de Serviço</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Ambiente veicular</b> . . . . .	<b>47</b>
3.1.2.1	Camada de Controle . . . . .	47
3.1.2.2	Camada de Gerenciamento Heterogêneo . . . . .	48
3.1.2.3	Camada de Acesso ao Meio . . . . .	50
<b>3.1.3</b>	<b>Ambiente de borda</b> . . . . .	<b>50</b>
3.2	PROTÓTIPO . . . . .	51
<b>3.2.1</b>	<b>Algoritmo de Clusterização</b> . . . . .	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b> . . . . .	<b>54</b>
<b>5</b>	<b>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO</b> . . . . .	<b>58</b>
5.1	CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO . . . . .	58
5.2	RESULTADOS . . . . .	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> . . . . .	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A comunicação intraveicular (IVC - *Intervehicle Communication*) vem atraindo uma considerável atenção na comunidade científica e na indústria automobilística, visto que fornece um Sistema de Transporte Inteligente (IVC - *Intelligent Transportation System*) e ainda viabiliza o surgimento de novas aplicações e novos campos de pesquisa.

O grande número de acidentes e congestionamentos nas rodovias tem causado sérios problemas no mundo todo, com estatísticas cada vez mais assustadoras em relação ao número de vítimas fatais ou feridas. Nos Estados Unidos, segundo o Departamento de Transporte (DoT), somente em 2003 mais de 40.000 americanos perderam a vida e quase 3.000.000 de pessoas saíram feridas em acidentes rodoviários, gerando um prejuízo econômico da ordem de US\$ 200 bilhões de dólares por ano. Na Europa os números são proporcionalmente os mesmos. No Brasil, segundo relatório do IPEA de 2003, o país tinha uma média de mais de 30.000 mortes no trânsito e um prejuízo na faixa de R\$ 15 bilhões por ano.

A partir disso, o Departamento de Trânsito dos Estados Unidos alocou em 1999 uma faixa de frequência de canais conhecida como *Distributed Short Range Communication* (DSRC) para permitir a comunicação entre os veículos e entre veículos e infraestruturas colocadas ao longo das rodovias, chamadas de *RoadSide Unit* (RSU) (FCC, 2013). Em 2004 a proposta DSRC migrou para padronização no grupo IEEE 802.11, sendo conhecida desde então como IEEE 802.11p *WAVE Wireless Access in the Vehicular Environment* (JIANG; DELGROSSI, 2008). E então o WAVE tornou-se o padrão para *Vehicular Ad hoc NETWORKS* (VANETs). Onde os veículos atuam como nós móveis e formam redes *ad hoc*, conhecidas como redes veiculares.

Há alguns anos, indústrias e governos têm investido em tecnologias para tornar o conceito de VANETs em realidade, focando em dois principais aspectos: segurança no trânsito e conforto para os passageiros dos veículos (CAVALCANTI *et al.*, 2018).

As aplicações de segurança possuem caráter preventivo e emergencial, onde o principal desafio é divulgar rapidamente as informações para que o condutor tenha tempo para reagir. Nessa classe de aplicações destaca-se a divulgação de informações sobre acidentes, as ocorrências no trânsito e as condições adversas de ruas e as estradas. Em geral, neste tipo de aplicação, a divulgação é limitada aos nós localizados próximos ao perigo (ALVES *et al.*, 2009).

Aplicações de conforto, por sua vez, visam melhorar o conforto dos passageiros e a eficiência do tráfego, levando os veículos a escolherem as rotas menos congestionadas, por exemplo otimização de rotas, sistemas de informação de tráfego, informações climáticas, preços,

localização de restaurantes, dentre outras (YOUSEFI; MOUSAVI; FATHY, 2006).

Embora seja um tipo específico de *Mobile Ad hoc Network* (MANET), as VANETs possuem características as quais as tornam diferentes das MANETs tradicionais. Devido aos nós das VANETs serem constituídos por veículos, nos quais a direção e o sentido destes nós não são completamente aleatórias, que difere das MANETs.

Outra distinção entre VANETs e MANETs é a velocidade com que os nós se movimentam na rede. Em VANETs, a grande velocidade dos nós demanda que as conexões sejam completadas em curtos intervalos de tempo (CUNHA *et al.*, 2014). Além disso, em alguns tipos de MANETs existe uma preocupação com o tempo de vida dos dispositivos que fornecem a comunicação *ad hoc*. Em VANETs não há essa preocupação, pois os dispositivos usufruem da energia das baterias dos veículos, portanto estas são algumas das características distintas que compõem a problemática das redes veiculares.

Os sistemas de comunicação entre veículos formam as chamadas redes veiculares cujo objetivo principal é possibilitar a comunicação entre usuários móveis e oferecer as condições necessárias para que aplicações com diferentes requisitos sejam atendidas satisfatoriamente (ALVES *et al.*, 2009). Considerando que a densidade nesse tipo de rede depende do trânsito que pode variar bastante, dificultando estabelecer uma conexão fim-a-fim, comprometendo o funcionamento dos protocolos TCP/IP.

Além disso, muita atenção tem sido dada a aplicabilidade das redes celulares em suportar serviços veiculares, pois promovem uma maior cobertura e maiores taxas de transferência para serviços veiculares. Entretanto, tanto DSRC quanto redes celulares tem suas limitações em ambientes veiculares. DSRC foi inicialmente desenvolvida para comunicações de curto alcance sem a necessidade de infraestrutura nas vias (RSUs).

Por outro lado, apesar de as redes celulares fornecerem uma ampla cobertura geográfica, elas não suportam eficientemente troca de informações em tempo real em áreas locais. Dentro deste contexto, surge o conceito de *Heterogeneous Vehicular Networks* (HetVNs) que fornecem ampla cobertura para os veículos em redes de larga escala, mas também proveem distribuição de mensagens em tempo real em áreas locais. Assim, redes veiculares heterogêneas que integram comunicações DSRC e redes celulares podem dar suporte aos requisitos de comunicação dos sistemas de transporte inteligentes (ITS) (ZHENG *et al.*, 2015).

A arquitetura HetVCAr utiliza técnicas de agrupamentos que consiste em estruturas que organizam hierarquicamente a rede e visam facilitar o gerenciamento de sistemas complexos e a escalabilidade de informações trafegadas na rede. Nos agrupamentos, diversos nós se

organizam em um grupo, em torno de um representante, momentaneamente selecionado e denominado líder (*Cluster Head*). Este nó assume a responsabilidade de coordenar os restantes dos nós do agrupamento.

Com isso, a arquitetura é capaz de disseminar informações por toda a rodovia evitando sobrecarregar uma única interface de comunicação. Além disso, é capaz de manter a rede funcionando, mesmo que ela esteja esparsa.

Nesse contexto, esta dissertação propõe uma nova arquitetura veicular heterogênea, chamada HetVCAr. Baseada em agrupamentos (*cluster*) com o objetivo de melhorar a conectividade em cenários *highway* de ambientes veiculares, bem como sua avaliação de desempenho por meio de simulações no *Network Simulator 3* (NS3) de forma que possa ser comparado com as abordagens que fazem uso somente da arquitetura tradicional, utilizando somente a interface DSRC.

Nos experimentos realizados foi desenvolvido um mecanismo para validação da arquitetura HetVCAr, o mecanismo usa clusterização para melhorar o uso de recursos das tecnologias aplicadas superando abordagens existentes, tendo o equilíbrio mais adequado entre taxa de entrega e o atraso da rede. No geral, o mecanismo proposto conseguiu cerca de 50% menos atraso e no mínimo 90% de taxa de entrega em todos os cenários avaliados. Este mecanismo foi publicado na Conferência *IEEE Symposium on Computers and Communications* 2018 (ISCC 2018) com Qualis A2.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A eventual implantação das HetVNets poderá contribuir na redução de acidentes de trânsito, diminuição do número de mortes no trânsito e melhorias no conforto dos passageiros durante viagens. De acordo com Cavalcanti et al. (2018), as aplicações mais comumente consideradas estão relacionadas com a segurança pública, coordenação de tráfego e sistemas de alerta de colisão. Além disso, aplicações de gerenciamento de tráfego, suporte de informação aos viajantes, e várias aplicações de conforto têm potencial de tornarem as viagens consideravelmente mais eficientes, práticas e agradáveis.

Essas aplicações são as que fornecem as maiores motivações para pesquisa em HetVNets, conseqüentemente trazendo também a importância de um bom desempenho das tecnologias de comunicação para que essas aplicações possam funcionar com eficiência, mesmo quando a rede estiver esparsa, pois dependendo do horário, o trânsito pode estar muito livre,

fazendo com que desconexões sejam mais frequentes. Dessa forma, utilizar a ampla cobertura geográfica das redes celulares de forma interoperável com as redes VANETs atuais pode ser uma possível solução, fazendo com que as aplicações funcionem de maneira satisfatórias, ainda que o ambiente esteja esparso.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Propor a arquitetura veicular heterogênea HetVCAR e mensurar seu desempenho, avaliando sua adequação ao cenário *highway* de um ambiente veicular comparando com a abordagem tradicional utilizando somente DSRC e somente LTE, contribuindo, dentre outras coisas, para a realização de estudos sobre redes veiculares utilizando redes celulares.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir de uma arquitetura HetVNet composta pela pilha 802.11p e LTE.
- Desenvolver e implementação de um protótipo da arquitetura proposta.
- Elaborar um cenário *highway* que reflita aplicações de VANETs.
- Simular e comparar o desempenho da arquitetura implementada com abordagens que fazem uso somente de comunicações DSRC e somente comunicações LTE.

### 1.1.3 Metodologia

As simulações foram realizadas utilizando o *Network Simulator 3* (versão 3.26). O protótipo da arquitetura e as simulações foram implementadas utilizando a linguagem de programação C++. O modelo de propagação utilizado foi o Nakagami (CAMP; BOLENG; DAVIES, 2002) com alcance de transmissão de aproximadamente 300 metros. De acordo com Taliwal et al. (2004) e Schmidt-eisenlohr et al. (2007) o melhor modelo de propagação para VANET é o Nakagami.

Para cada experimento, foi criado um arquivo de simulação. Neles, a mobilidade dos veículos foi feita por meio do gerador de mobilidades *Simulation of Urban MObility* (SUMO).

Foi implementado o protocolo de agrupamento (*clustering*) Dynamic Means (DM) (CAMPBELL *et al.*, 2013) para ser utilizado no protótipo da arquitetura. O protótipo foi avaliado utilizando as métricas: taxa de entrega (DPDR) e atraso médio. Comparando com duas abordagens, a primeira utilizando somente comunicações DSRC. Já a segunda utiliza somente comunicações LTE, todas as abordagens foram comparadas em um cenário VANET.

#### **1.1.4 Organização do trabalho**

Este trabalho foi organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 apresenta a Fundamentação teórica sobre redes veiculares e redes veiculares heterogêneas abordando a definição, características, arquiteturas e aplicações, bem como, trata de redes celulares mostrando a sua evolução.

O Capítulo 3 trata da proposta desta pesquisa, especificando a arquitetura veicular heterogênea desenvolvida. O Capítulo 4, por sua vez, aborda alguns trabalhos relacionados aos estudos e definições de redes veiculares heterogêneas que norteou a proposta deste trabalho.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos nas simulações efetuadas do protótipo desenvolvido com a descrição do cenário e das métricas observadas. Por fim, o Capítulo 6 apresenta a conclusão deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

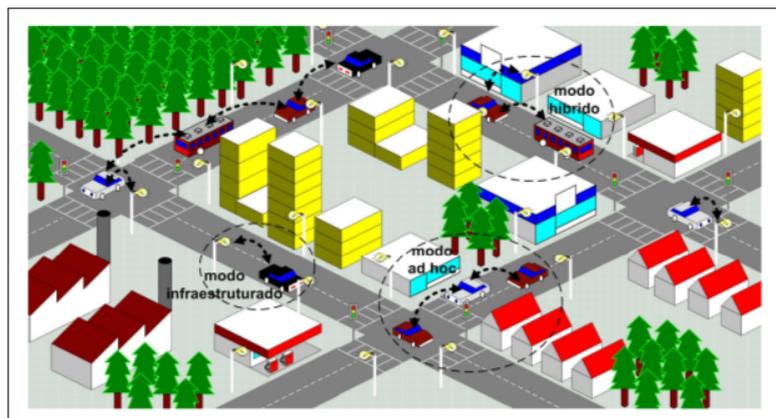
### 2.1 REDES VEICULARES

A comunicação intraveicular (IVC - *Intervehicle Communication*) vem atraindo uma considerável atenção na comunidade científica e na indústria automobilística, visto que fornece um sistema de transporte inteligente (ITS - *Intelligent Transportation System*) que viabiliza o surgimento de novas aplicações e novos campos de pesquisa. Neste contexto, as redes veiculares emergiram como uma nova classe de rede sem fio, fornecendo comunicação entre veículos e entre veículo e infraestrutura. Nessa seção apresentamos as redes veiculares, mostrando a definição, padrões, arquitetura, bem como algumas aplicações.

#### 2.1.1 Definição

A indústria automobilística e os avanços da tecnologia sem fio contribuíram para o desenvolvimento de redes veiculares (VANETs) que são um subtipo de Mobile Ad hoc NETWORKS (MANETs) onde os nós são unidades de bordo em veículos (OBUs) ou unidades de acostamento (RSUs), de acordo com Alves et al (2009) podemos destacar três tipos de comunicação: infraestruturada, *ad hoc* pura e híbrida. A Figura 1 ilustra essas três formas de comunicação.

**Figura 1 – Arquitetura das redes veiculares**



Fonte: (ALVES *et al.*, 2009)

A abordagem infraestruturada é caracterizada pela comunicação veículo-infraestrutura (V2I - *Vehicle-to-Infrastructure*) que apresenta a desvantagem do alto custo de instalação das RSUs ao longo das vias. Contudo, no modo de comunicação *ad hoc* puro toda comunicação

ocorre veículo a veículo (V2V - *Vehicle-to-Vehicle*), evitando-se os custos de instalação das várias RSUs, mas manter a conectividade da rede torna-se uma tarefa mais desafiadora. A forma híbrida é realizada tanto a comunicação V2V quanto V2I, conseqüentemente apresenta uma relação custo-benefício mais viável.

Embora seja um tipo específico de rede móvel, as redes veiculares possuem características únicas as quais tornam seu desenvolvimento e implantação algo novo e desafiador. Essas características bem como suas causas e implicações, serão abordadas na subseção seguinte.

### 2.1.2 Características

O comportamento característico das redes veiculares é diferente dos outros tipos de redes móveis devido a natureza de seus nós, visto que se tratam de veículos (carros próprios, ônibus, ambulâncias, táxis, motos, etc) e trazem a essa rede alguns atrativos, identificados por (MOUSTAFA; ZHANG, 2009):

- Ausência de limitação energética: Ao contrário do que ocorre com outras redes móveis, por exemplo com as redes de sensores sem fio, nas VANETs a limitação energética não existe. Isso ocorre, visto que os nós em si podem fornecer energia continuamente para dispositivos tanto de computação quanto de comunicação.
- Maior capacidade computacional: De fato, um veículo pode dispor de computação, comunicação e capacidade de detecção mais significativa.
- Mobilidade previsível: Diferentemente das MANETs clássicas, onde é uma tarefa difícil prever a mobilidade dos nós, nas VANETs os nós tendem a possuir certa previsibilidade quanto a mobilidade. Isso ocorre devido esses nós serem limitados às vias e às respectivas sinalizações de trânsito, bem como a velocidade média, ao sentido da via, a velocidade e a posição atual do veículo possibilitam prever a posição de um nó em um momento próximo.

Entretanto, ainda em (MOUSTAFA; ZHANG, 2009) e também em (YOUSEFI; MOUSAVI; FATHY, 2006) são comentadas certas características desafiadoras presentes nas redes veiculares, tornando-as um campo ainda mais interessante:

- Grande quantidade de nós: Isso ocorre pois uma rede veicular pode se estender por toda uma cidade ou rodovia e assim a quantidade de nós numa VANET pode atingir números realmente altos.
- Rápidas e frequentes mudanças topológicas: Isso ocorre devido ao ambiente

veicular ser altamente dinâmico. Nas rodovias, por exemplo, os nós podem atingir uma velocidade relativa de até 300 km/h e a densidade veicular pode chegar a um ou dois veículos por quilômetro. Por outro lado, em cenários urbanos congestionados, a velocidade relativa dos nós dificilmente ultrapassa 60 km/h, enquanto a densidade veicular chega a valores realmente altos.

- Particionamento da rede e curto tempo de vida de um enlace: Essa característica, semelhante a anterior, também é proveniente da variabilidade da velocidade relativa dos nós VANET.

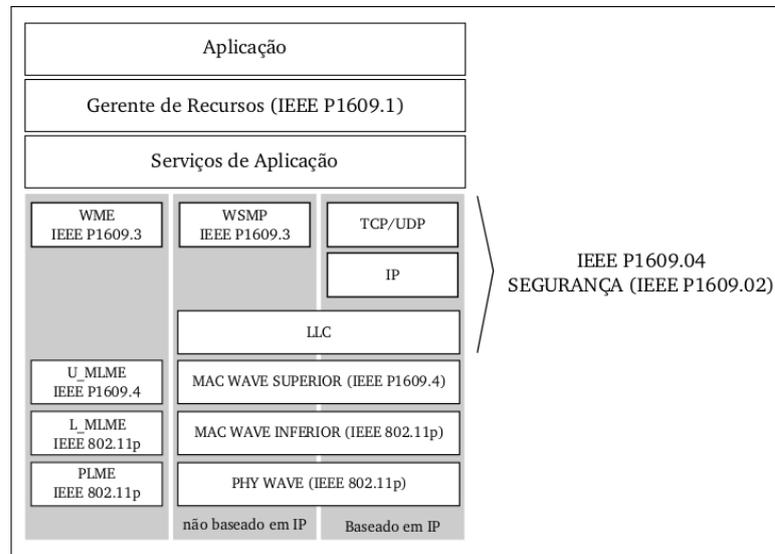
### 2.1.3 Arquitetura

A arquitetura especificada para redes veiculares é conhecida por IEEE 802.11p *Wireless Access in the Vehicular Environment* (WAVE) (Figura 2) composta por documentos que definem um conjunto de padrões de interface de comunicação V2V e V2I. Tal arquitetura é importante para que exista interoperabilidade entre dispositivos desenvolvidos por diferentes fabricantes.

Foram então definidos cinco documentos que especificam como essa arquitetura deve ser implementada, são eles IEEE P1609.1, IEEE P1609.2, IEEE P1609.3, IEEE P1609.4 e IEEE 802.11 que tem a extensão IEEE 802.11p. (ALVES *et al.*, 2009). Cada um descreve o funcionamento de protocolos de segurança, acesso ao meio, gerente de recursos, serviços de redes e operações com múltiplos canais.

O documento IEEE 1609.1 (Gerente de Recursos) especifica a comunicação entre aplicativos remotos e unidades de bordo (OBU) através de unidades de acostamento (RSU). O Gerente de recursos atua como uma camada de aplicação que multiplexa a comunicação de várias aplicações com várias OBUs. Serviços que estão executando em uma RSU são requisitados por uma OBU por meio do *Resource Command Processor* (RCP). Além disso, podem existir *Resource Manager Applications* (RMAs) que são aplicações remotamente conectadas às RSUs e que se comunicam através delas com as OBUs com intuito de conseguir informações sobre recursos controlados pelos RCPs. Todas essas especificações são descritas no IEEE P1609.1.

O documento IEEE P1609.2 (Serviço de Segurança para Aplicações e Mensagens de Gerenciamento) descreve padrões de segurança que utilizam técnicas para proteger os serviços na comunicação. Então, são definidos os formatos de mensagens de segurança e o processamento delas dentro de um sistema WAVE. Tais padrões têm como única restrição o tempo de operação,

**Figura 2 – Arquitetura WAVE**

Fonte: (VIEIRA, 2010)

já que, a maioria das aplicações é restringida pelo tempo. Além disso, a sobrecarga de processamento e banda deve ser mínima, para diminuição do tempo de resposta e da probabilidade de perda de pacote.

O documento IEEE P1609.3 (Serviços de Rede) especifica serviços para camada de controle lógico (*Logical Link Control* - LLC), camada de transporte e de rede. Como pode ser visto na Figura 2 é possível utilizar a pilha com IPV6 e UDP/TCP ou mensagens curtas WAVE (WAVE Short Messages) que são mais eficientes para um ambiente veicular, pois a outra alternativa possui uma sobrecarga maior de comunicação, por exemplo quando usamos o TCP ocorre a *handshake* para o estabelecimento de uma conexão, o tempo gasto nele pode ser longo que poderá desperdiçar o tempo curto de contato entre os nós.

O padrão IEEE P1609.4 (Operação de múltiplos canais) descreve operações de múltiplos canais (modo WAVE), onde o dispositivo deve monitorar o canal de controle (CCH) aguardando serviços WAVE, para obter o número do canal de serviços (SCH) que será utilizado. Além disso, ele deve monitorar o CCH em intervalos de tempo à espera de outros serviços.

O padrão IEEE 802.11p é uma extensão de IEEE 802.11, o qual se baseia especificamente na extensão "a" fazendo três modificações da camada física. A primeira mudança é da largura 20 MHz para 10MHz, a segunda é que os requisitos de desempenho do receptor de rádio ficaram mais restritivos que os do 802.11a. A terceira mudança específica à utilização de rádios.

## 2.1.4 Aplicações

São muitas as possibilidades de aplicações e serviços em uma rede veicular que podem ser classificadas em aplicações de segurança e conforto (MOUSTAFA; ZHANG, 2009). As aplicações de segurança fornecem meios para tentar diminuir a quantidade de acidentes de trânsito e melhorar condições do tráfego fornecendo aos motoristas e passageiros informações úteis como avisos de colisão, alarmes de sinalização da estrada e visão do tráfego. No caso de aplicações de conforto, são fornecidos serviços voltados para o conforto dos passageiros.

### 2.1.4.1 Aplicações de segurança

As aplicações de segurança visam garantir a integridade dos passageiros, visto que as mensagens de alerta ou emergência sejam transmitidas entre os veículos, tais informações são ainda apresentadas aos motoristas para que ele tenha tempo suficiente para reagir a determinado evento. Essas informações também podem ser enviadas para os sistemas de segurança ativos que podem, automaticamente, inflar um *air bag*, frear o veículo, transmitir outras mensagens de alerta, etc.

As aplicações de segurança visam também fornecer informações úteis sobre o ambiente físico, como avisos de colisões e alertas de condições de estradas, fazendo com que o motorista escolha um caminho mais seguro. Portanto, as aplicações de segurança pretendem minimizar os acidentes.

Exemplos de aplicações dessa categoria são:

- **Alerta de colisão:** Auxiliam os motoristas a evitar batidas entre veículos. Podem usar informações de posição, direção e velocidade e calcular as trajetórias dos veículos prevendo cruzamentos e possíveis colisões.
- **Colisão iminente:** Geram informações para os mecanismos automáticos do veículo serem acionados (*air bags*, cintos de segurança, freios etc) para tentar diminuir os danos do acidente.
- **Alertas sobre locais perigosos:** Através de sensores dos veículos, essas aplicações são capazes de detectar pistas escorregadias, buracos nas estradas e outras situações de risco e informá-las aos outros veículos para que eles evitem tais locais.
- **Assistente de mudança de faixa e de ultrapassagem:** Através de informações cinemáticas dos outros veículos, tais aplicações permitem que o motorista saiba

quando é possível trocar de faixa ou ultrapassar com segurança.

- Alerta de situação de semáforo: tais aplicações permitem que o motorista se mantenha consciente da situação do semáforo e, assim, possa ajustar sua velocidade.
- Veículo de emergência passando: Essas aplicações são usadas quando veículos dos bombeiros, polícia, ambulâncias ou outros estão trafegando em situação de emergência e precisam avisar aos veículos que estão na frente para eles abrirem caminho.
- Informações restritas de segurança: São utilizadas quando veículos de emergência precisam trocar mensagens somente entre eles. Por exemplo, veículos da polícia informando a outros veículos da polícia sobre uma perseguição a um veículo em fuga.

#### 2.1.4.2 Aplicações de conforto

Esta categoria de aplicações se destina ao conforto dos passageiros ou mesmo recepção de anúncios publicitários, como os de lanchonetes ou outros estabelecimentos comerciais (BALDESSARI *et al.*, 2007). Esta interação diária que ocorre quando o passageiro demonstra interesse por determinados anúncios acaba proporcionando informações em uma base regular. Estas informações podem direcionar o tipo de anúncio que o motorista prefere receber.

Exemplos de aplicações dessa categoria são:

- Aplicações de acesso à Internet: Um passageiro que quer se conectar à Internet envia uma requisição para encontrar um nó que tenha tal acesso (uma RSU, ou outros dispositivos de outras tecnologias como WiMAX ou 3G). O nó que tem tal acesso responde à requisição e, assim, começa a interação para o acesso à Internet.
- Diagnóstico: as aplicações de diagnóstico permitem que oficinas mecânicas, concessionárias de veículos, postos de combustível, avaliem a situação do veículo e sugiram serviços. Por exemplo, se o nível de combustível do veículo estiver baixo, um posto pode indicar um abastecimento já informando os preços.
- Jogos *multiplayers* entre os passageiros de alguns veículos: Passageiros de diferentes veículos podem jogar determinados tipos de jogos que contém interatividade entre vários jogadores.
- Troca de música entre passageiros de veículos.

- Informações climáticas.
- Aplicações de pontos de interesse: Permite obter informações sobre determinadas empresas ao longo do percurso, preços de restaurantes, bares, atrações turísticas etc.
- Informações sobre a rota menos congestionada até determinado destino.
- Pedágio automático: Permite pagar o pedágio sem precisar parar o veículo ou sem precisar de qualquer intervenção do motorista ou dos passageiros. (VIEIRA, 2010)

## 2.2 REDES CELULARES

### 2.2.1 Primeira Geração de Sistemas Móveis (1G)

A tecnologia 1G surgiu em 1980 com a adoção dos sistemas analógicos. Tais sistemas eram conhecidos como NMT (*Nordic Mobile Telephone*). Além disso, os serviços oferecidos por estes sistemas eram totalmente incompatíveis entre si (SHUKLA *et al.*, 2013).

A responsável por desenvolver o primeiro sistema de telefonia celular foi a empresa de telecomunicações *Nippon Telephone and Telegraph* (NTT), no Japão. Somente no ano de 1982 é que os sistemas de telefonia móvel chegaram aos Estados Unidos (SHARMA, 2013).

O primeiro mercado de serviços móveis nos Estados Unidos foi baseado em Serviços de Telefonia Móvel Avançada (AMPS). Esta tecnologia é comumente conhecida como a primeira geração ou 1G (LEHR; MCKNIGHT, 2003).

A tecnologia AMPS é um sistema que utiliza o múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA). A sua banda é dividida em canais que são constituídos por um par de frequências cada (Transmissão e Recepção) com 30 KHz de capacidade. Em 1988 foi adicionado mais 10 KHz, o que possibilitou ter uma área de cobertura maior, cerca de 2100 milhas quadradas (IRSHAD; CHAUDHRY, 2013).

Segundo Kumar e Poornima (2014) as principais limitações existentes na tecnologia de comunicação móvel 1G são as seguintes: não possui serviço de dados para converter a voz em sinais digitais; não é possível ter serviço de *Roaming* Global; a qualidade de voz é extremamente baixa; os dados são enviados por um único canal, fazendo com que seja impossível duas pessoas se ouvirem simultaneamente.

### 2.2.2 Segunda Geração de Sistemas Móveis (2G)

A tecnologia 2G foi introduzida no final dos anos 80. Ela utiliza de múltiplo acesso digital, como *Time Division Multiple Access* (TDMA) e *Code Division Multiple Access* (CDMA). Além disso, possui uma maior eficiência e um melhor serviço de dados em relação ao seu antecessor (SHARMA, 2013).

Para Kumar e Poornima (2014) as principais diferenças entre o 2G e o 1G é que o 2G oferece uma maior quantidade de serviços, como: serviços de mensagem (SMS); serviços de foto mensagem e serviços de mensagem multimídia (MMS). O fato do 2G adotar o GSM (*Global System for Mobile Communication*) como padrão, possibilita que seus usuários consigam utilizar a conexão móvel em vários países diferentes, provendo assim uma melhor qualidade de serviço.

O 2G possibilitou um grande crescimento para a indústria de telecomunicações móveis, tanto em termos de usuários como em valor agregado aos seus serviços. A crescente demanda por aparelhos celulares fez com que novos recursos fossem adicionados a esta tecnologia, como: *paging*, fax e correio de voz (SHUKLA *et al.*, 2013).

Tal tecnologia ainda é utilizada em vários lugares do mundo e o seu principal objetivo é oferecer serviços de dados e voz. A família desta geração é constituída pelo 2G, 2.5G e 2.75G (IRSHAD; CHAUDHRY, 2013).

Segundo Kumar e Poornima (2014), as principais limitações da tecnologia 2G são as seguintes: são necessários sinais digitais de alta intensidade para que os telefones celulares possam trabalhar; caso não haja uma cobertura apropriada na área, o sinal digital será de baixa intensidade; e possui dificuldade para lidar com dados complexos, como vídeo, entre outros.

### 2.2.3 Terceira Geração de Sistemas Móveis (3G)

A tecnologia 3G foi projetada para a troca de dados e voz e seu destaque deve-se à forma como trabalha com estes dados, pois trata uma grande quantidade deles, principalmente conteúdos multimídia, traduzindo-se numa nova experiência para os seus usuários.

Entre as suas principais características estão à baixa latência e a confiabilidade reduzida, pois o fato de suportar operações em tempo real faz com que a velocidade de resposta da rede tenha prioridade sobre a sua confiabilidade. Além disso, estas redes são utilizadas em larga escala para a comunicação em longas distâncias. Como a sua utilização depende de uma operadora, a comunicação entre veículos acontece por meio de estações bases e não diretamente (DAR *et al.*, 2010).

As operadoras de serviços móveis utilizam um espectro licenciado para prover cobertura de sinal na área em que atuam. Portanto, pode-se dizer que uma de suas principais características é a cobertura onipresente e contínua. Assim, o consumidor pode realizar chamadas telefônicas enquanto dirige em uma rodovia a 100 km/h desde que as operadoras mantenham suas estações base conectadas em rede.

As torres celulares são conectadas por meio de uma rede *backhaul*, que é responsável por interconectar a rede pública de telefonia comutada (PSTN) e outros serviços. Assim, a tecnologia 3G é capaz de suportar comunicações de banda larga digital, baseando-se nos padrões apresentados pela *International Telecommunications Union* (LEHR; MCKNIGHT, 2003).

Embora a tecnologia 3G tenha sido apresentada como uma promessa de uma banda larga móvel, a sua qualidade não tem agradado a maioria das pessoas, visto que possui baixa taxa de transmissão e o seu custo é relativamente alto. Além destas desvantagens, Dar (2010) lista alguns pontos negativos existentes nas redes celulares:

- a) O uso da tecnologia celular requer taxas de operação acordadas com uma operadora;
- b) O fato da transmissão de voz ter uma maior prioridade em relação à transmissão de textos faz com que aumente a latência da rede.

Mesmo com algumas desvantagens, esta tecnologia pode ser viável para aplicações que não necessitem de respostas em tempo real e que precisem de comunicação de longo alcance, como: aplicações de entretenimento e disseminação de conteúdo.

## **2.2.4 Quarta Geração de Sistemas Móveis (4G)**

A tecnologia 4G é a quarta geração de padrão sem fio celular e sucessor dos padrões 2G e 3G. As mudanças de nomenclatura geralmente ocorrem devido às melhorias e funcionalidades que foram acrescentadas com o passar do tempo, como o aumento de desempenho das tecnologias ou aumento da banda de frequência. Atualmente há dois tipos principais de redes 4G no mundo: as redes LTE e as redes Wimax.

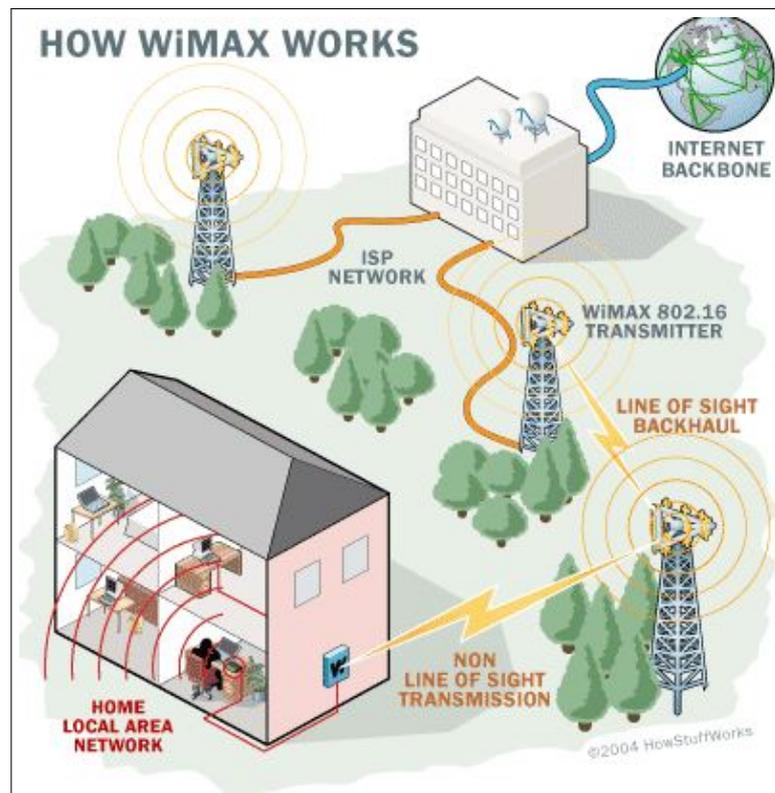
### **2.2.4.1 A tecnologia WiMax**

O WiMax ou 802.16, é um padrão criado para redes *wireless* de longa distância. Este padrão pode ser usado para criar *links* de longa distância, ou ainda para oferecer acesso à web em grandes áreas, utilizando um formato em que ele concorre com os padrões de telefonia. As redes WiMax oferecem uma cobertura maior que as redes WiFi (802.11g e 802.11n) e utiliza um

volume menor de pontos de acesso.

O sistema WiMax consiste em duas partes, a primeira é uma torre similar a torre de telefonia celular, porém uma única torre WiMax pode prover uma área de aproximadamente 8 mil  $km^2$ . A segunda parte de um sistema WiMax é o receptor WiMax que pode ser uma caixa pequena ou cartão PCMCIA, ou ainda poderiam ser integrados ao *laptop* assim como WiFi é feito atualmente.

**Figura 3 – Funcionamento de uma conexão WiMax**



Fonte: (BRAIN; GRABIANOWSKI, 2004)

A Figura 3 mostra dois tipos de serviços providos pelo WiMax. O primeiro é o serviço *non line of sight*, onde uma pequena antena no computador do usuário conecta-se a torre, assim o WiMax utiliza um alcance de frequência entre 2GHz a 11GHz de maneira similar ao WiFi.

O segundo serviço, ilustrado na Figura 3, é o serviço de *line of sight* que consiste em uma antena fixa apontada para a torre WiMax a partir de um telhado ou poste. As conexões de *line of sight* utilizam frequências mais altas, podendo ter um alcance de até 66GHz e assim menos interferência e mais largura de banda.

#### 2.2.4.2 A tecnologia LTE

O *Long Term Evolution* (LTE) é uma tecnologia de redes móveis celulares que possui uma arquitetura de rede toda baseada em IP. O padrão LTE possui vários *releases*, dentre os quais o *Release 8* foi a primeira versão a ser comercializada, com taxas de pico de 300 Mbps no *downlink* e 75Mbps no *uplink*, mas ainda não apresenta os requisitos esperados para o 4G (ALI-YAHIYA, 2011). Já o *Release 10*, lançado em 2013, também chamado *LTE-Advanced* (LTE-A), é considerado o autêntico 4G, com taxas de pico de 1Gbps no *downlink* e 500Mbps no *uplink*.

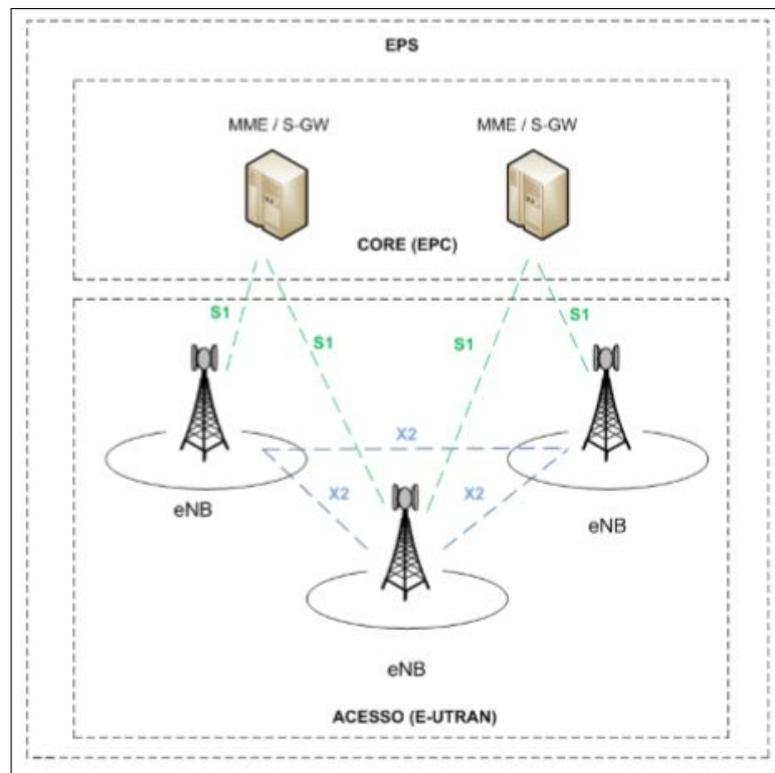
O LTE traz uma nova arquitetura bastante diferente do que vinha sendo utilizado nas tecnologias anteriores e um exemplo disso é a estação rádio base denominada de *Evolved NodeB* (eNodeB ou eNB), que no LTE passa a realizar tarefas de processamento antes realizadas no *Radio Network Controller* (RNC) na tecnologia UMTS (ALI-YAHIYA, 2011).

A arquitetura geral da rede LTE é composta de duas sub-redes: a rede RAN (*Radio Access Network*) chamada de *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) e o núcleo da rede (*Core Network*) denominada *System Architecture Evolution* (SAE), também chamada de *Evolved Packet Core* (EPC). A combinação dessas duas sub-redes foi denominada de *Evolved Packet System* (EPS). Segundo Sesia, Toufik e Baker (2011) as eNBs podem comunicar-se diretamente através das interfaces X2, além de se comunicarem com o EPC através da interface S1, conforme mostra a Figura 4.

A rede EPC realiza o roteamento das informações transmitidas e as funções relacionadas, tais como: gerenciamento de mobilidade, tratamento de QoS, política de controle dos fluxos de dados do usuário e interconexão com redes externas. A arquitetura LTE está dividida em quatro principais domínios de alto nível: *User Equipment* (UE), E-UTRAN, EPC e Serviços, conforme mostra a Figura 5. Nela estão contidos os principais elementos da rede. As funções desempenhadas por cada um destes são definidas a seguir (SEZIA; BAKER; TOUFIK, 2011):

- **MME (*Mobility Management Entity*):** é o principal elemento de controle no EPC. Entre as suas funções estão: autenticação, segurança, gerenciamento de mobilidade, gerenciamento de perfil do usuário, conexão e autorização de serviços.
- **S-GW (*Serving Gateway*):** realiza o roteamento dos pacotes de dados dos usuários entre a rede LTE e outras tecnologias como o 2G/3G utilizando a interface S4. Gerencia e armazena informações do UE como parâmetros de serviços IP suportados e informações sobre o roteamento interno dos pacotes na rede.

**Figura 4 – Arquitetura básica do LTE**

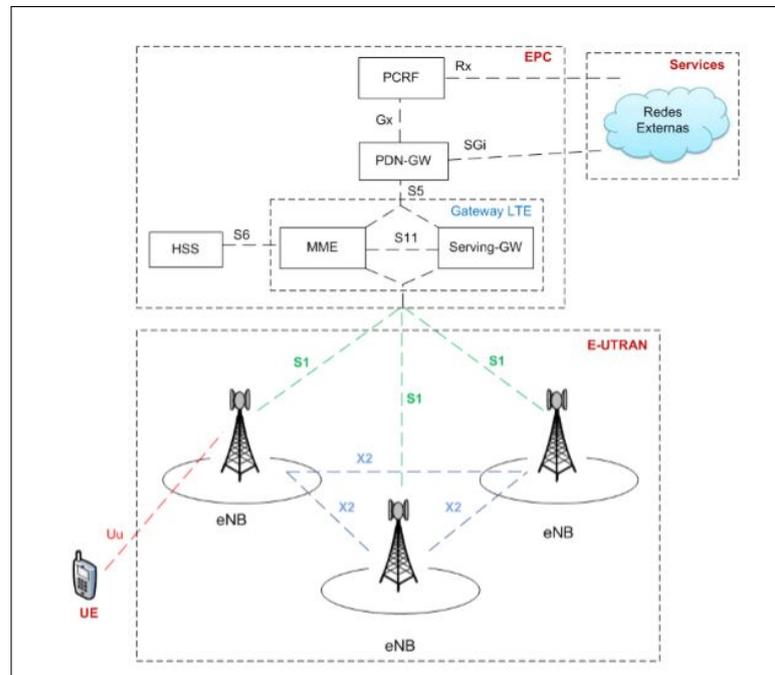


Fonte: (SESIA; BAKER; TOUFIK, 2011)

- **P-GW (Packet Data Network Gateway):** é o roteador de borda entre o EPC e redes de pacotes externas. Realiza a filtragem e controle de pacotes requeridos para o serviço em questão. Tipicamente, o P-GW aloca endereços IP para os equipamentos dos usuários para que eles possam se comunicar com outros dispositivos localizados em redes externas.
- **PCRF (Policy and Charging Resource Function):** elemento de rede responsável pelo PCC - Política e Controle de Carga. Provê os requisitos de QoS adequado para que os serviços solicitados possam utilizar os recursos apropriados.
- **HSS (Home Subscriber Server):** banco de dados de registro do usuário. Executa funções equivalentes às do HLR, AuC e EIR definidos nos *releases* anteriores.

A E-UTRAN é caracterizada por uma rede de eNBs, que interagem com os dispositivos nomeados de UE. O UE é o dispositivo que o usuário utiliza para comunicação, como um *smartphone* ou modem 4G. As eNBs estão conectadas entre elas e com o núcleo da rede. Segundo Korowajczuk (2011), ela é responsável por várias funções, entre elas: o gerenciamento dos recursos de rádio; a compressão do cabeçalho IP; a criptografia de dados; o escalonamento e alocação de recursos de rádio, tanto no *downlink* como no *uplink*, e a coordenação de *handover* entre as eNBs vizinhas.

**Figura 5 – Arquitetura completa do LTE**



Fonte: (SESIA; BAKER; TOUFIK, 2011)

As camadas da pilha de protocolos da rede E-UTRAN são (MAIA, 2013):

- **Física:** carrega todas as informações dos canais de transporte da camada MAC sobre a interface aérea. Esta camada também exerce as funções de adaptação do link, controle de potência, seleção de células e o provimento de algumas medições para a camada RRC.
- **MAC:** a camada *Media Access Control* oferece um conjunto de canais lógicos para a camada RLC que são multiplexados nos canais de transporte da camada física. A camada MAC também gerencia a correção de erros, lida com a priorização dos canais lógicos para o mesmo UE e o escalonamento de recursos de rádio entre os dispositivos (UEs).
- **RLC:** a camada *Radio Link Control* executa as tarefas de correção de erros, segmentação/-concatenação de dados, reordenação para entrega ordenada e detecção de duplicatas.
- **PDCP:** a camada *Pacjet Data Convergence Protocol* é a responsável pela compressão/-descompressão do cabeçalho dos pacotes IP, por assegurar a entrega ordenada de dados e também por realizar a criptografia dos pacotes.
- **RCC:** a camada *Radio Resource Control* cuida do sistema de difusão de informações, da paginação, do estabelecimento e da liberação das conexões RRC, do gerenciamento das chaves de segurança, do *handover* e das funções de mobilidade e gerenciamento de QoS.

### 2.2.5 Quinta Geração de Sistemas Móveis (5G)

A quinta geração de redes móveis, suporta diversos tipos de tecnologias, dentre as quais destacam-se: OFDM, MC-CDMA, UWB, Network-LMDS e IPv6. Além disso, também é conhecida por ser um sistema de comunicação sem fio completo, pois não possui limitações (IRSHAD; CHAUDHRY, 2013).

A adoção dessa tecnologia marca o início de uma das maiores revoluções nos padrões de telefonia móvel, o que proporciona às pessoas uma nova experiência em termos de redes sem fio. A sua qualidade de comunicação poderá melhorar de forma significativa as aplicações de automação residencial, transporte inteligente e segurança (SHARMA, 2013).

A tecnologia 5G é definida basicamente por duas camadas, física e dados. Tal característica faz com que ela se torne uma arquitetura sem fio aberta (OWA), o que garante a interoperabilidade de dispositivos de diversos fabricantes. Além disso, a tecnologia móvel de quinta geração permite trabalhar com virtualização de redes, sendo possível criar múltiplas redes sem fio virtuais, as quais podem ser operadas por diferentes provedores de serviço (KUMAR; POORNIMA, 2014).

Para que a virtualização de redes sem fio fosse possível, a camada de rede presente na tecnologia 5G foi dividida em outras duas camadas. Para os terminais móveis, foi adotada a camada de rede superior. Já para a *interface* foi concebida a camada de rede inferior. Tal divisão, possibilita que o roteamento seja baseado em endereços IPs, os quais deverão ser diferentes para cada uma das redes disponíveis na internet (IRSHAD; CHAUDHRY, 2013).

Para Kumar e Poornima (2014), as características mais relevantes do 5G, são: menor tráfego, garantia de disponibilidade de rede ao redor do mundo, velocidade de conexão de 25Mbps, largura de banda maior do que 1GB e baixo custo. Os autores ainda afirmaram que a maior desvantagem presente é a grande perda de bits, o que exige a adoção de um protocolo de controle aberto (OTP) para lidar com esse problema.

O conjunto de características acima citado, faz com que a quinta geração de sistemas móveis se torne uma das mais poderosas (SHUKLA *et al.*, 2013). Em um futuro próximo, a sua demanda aumentará ainda mais, possibilitando o surgimento de novas aplicações que mudarão o modo de utilizar o aparelho celular.

A primeira geração atendeu bem a necessidade dos consumidores por meio de seus serviços básicos de voz, usando técnicas analógicas. Na segunda geração, a capacidade e cobertura de sinal foram melhoradas significativamente devido à utilização de técnicas digitais.

No entanto, foi na terceira geração que os usuários puderam experimentar as vantagens de uma banda larga móvel, provendo um grande aumento na velocidade de transferência de dados.

Já a quarta geração consegue se destacar ainda mais do que sua antecessora, com uma nova experiência de acesso à *Internet*, com alta velocidade de dados e qualidade de imagem e vídeo comparada a dos televisores modernos. Por fim, a quinta geração de sistemas móveis, prevista para 2020, trará características mais avançadas e robustas do que as suas antecessoras.

Desse modo, verifica-se que o mercado de tecnologia móvel está crescendo e inovando constantemente, o que possibilita o surgimento de novas aplicações que poderão revolucionar a forma de utilizar os aparelhos celulares, além de prover novas e melhores tecnologias para a comunicação inter-veicular.

## 2.3 REDES VEICULARES HETEROGÊNEAS

Foi reportado que 50% dos consumidores entrevistados estão altamente interessados na ideia de carros conectados, 22% destes estão dispostos a pagar entre \$30 à \$65 por mês para obter acesso aos serviços providos enquanto estão em seus veículos (ARANITI *et al.*, 2013).

Muita atenção tem sido dada a aplicabilidade das redes celulares em suportar serviços veiculares, pois promovem uma maior cobertura e maiores taxas de transferência para serviços veiculares. Contudo, tanto DSRC quanto redes celulares tem suas limitações em ambientes veiculares. DSRC foi inicialmente desenvolvida para comunicações de curto alcance sem a necessidade de RSUs.

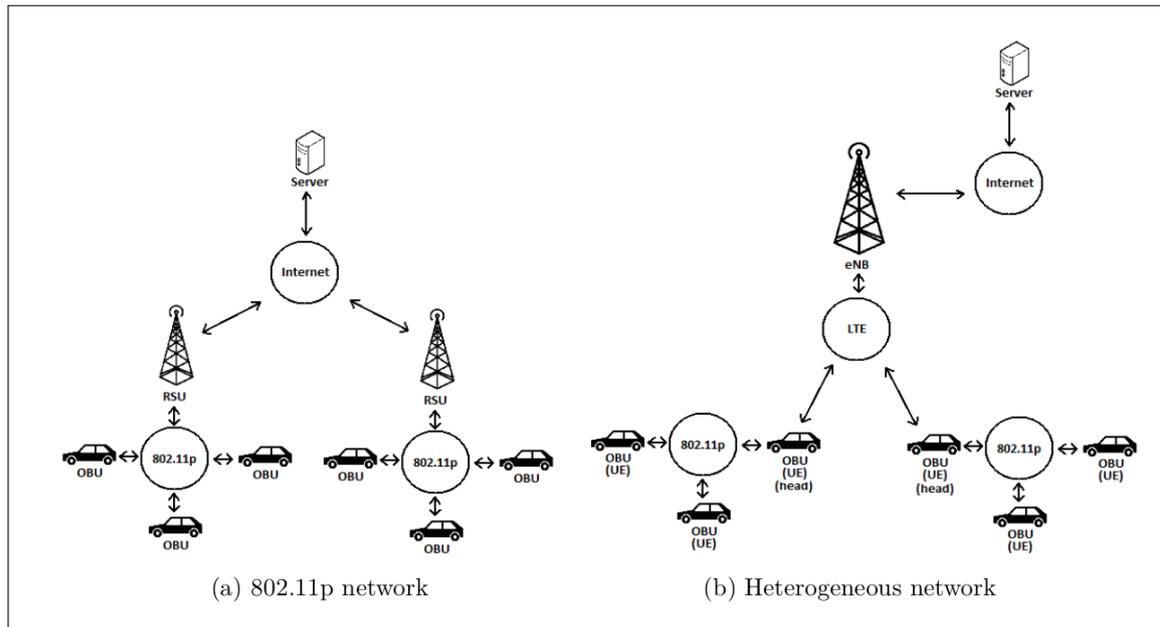
Devido a alta mobilidade dos veículos e as rápidas mudanças topológicas das redes VANETs é difícil prover satisfatoriamente serviços através de uma única rede *wireless*. Portanto, integrando diferentes redes wireless, como DSRC e LTE, espera-se que as HetVNETs supram vários requerimentos de comunicação de serviços ITS. Nessa seção apresentamos as redes veiculares heterogêneas, mostrando a definição, arquitetura e algumas aplicações (ZHENG *et al.*, 2015).

### 2.3.1 Definição

Com intuito de combinar os domínios de acesso infraestruturados, como LTE, e acesso sem infraestrutura, como IEEE 802.11p, foram concebidas redes heterogêneas. Essas redes heterogêneas misturam IEEE 802.11p com LTE, desta maneira quando aplicada em ambientes veiculares fornecem uma rede veicular de alta performance em cenários com alta

carga e alta densidade. Muitas maneiras de combinar essas tecnologias vem sendo propostas, porém ainda não existe um único padrão ou formalização definido na literatura.

**Figura 6 – Comparação entre arquitetura 802.11p e arquitetura heterogênea**



Fonte: (VILARDEBÓ, 2016)

Analisando a Figura 6, observamos que na arquitetura heterogênea as comunicações V2V são feitas realizadas utilizando IEEE 802.11p e o serviço de localização é fornecido utilizando LTE. Esta arquitetura não possui RSUs, em vez disso, possui eNBs que estão conectadas com o servidor da aplicação através da internet. A vantagem é que esta abordagem faz uso das redes celulares já existentes, assim não sendo necessário utilizar RSUs e por consequência evitando custos de implantação das mesmas.

Além disso, o alcance das comunicações LTE são maiores que o IEEE 802.11p, assim são necessárias menos eNBs para cobrir maiores áreas em comparação com a abordagem anterior. Adicionalmente, diminuimos a carga da rede 802.11p causada pelo overhead introduzido pelo serviço de localização. A desvantagem é que com a combinação dessas arquiteturas, veículos precisam ser equipados com ambos os tipos de interface, além de que pacotes sofrem mais atrasos através de redes LTE do que em redes 802.11p (VILARDEBÓ, 2016).

Em uma HetVNET existem dois tipos de comunicação entre os nós, V2V e V2I, que funcionam de maneira similar as redes VANETs tradicionais com suporte apenas há um tipo de tecnologia wireless (ATAT *et al.*, 2012). Comunicação V2V permite comunicações de curto e médio alcance entre usuários veiculares, oferecendo baixo custo de implantação e baixa latência

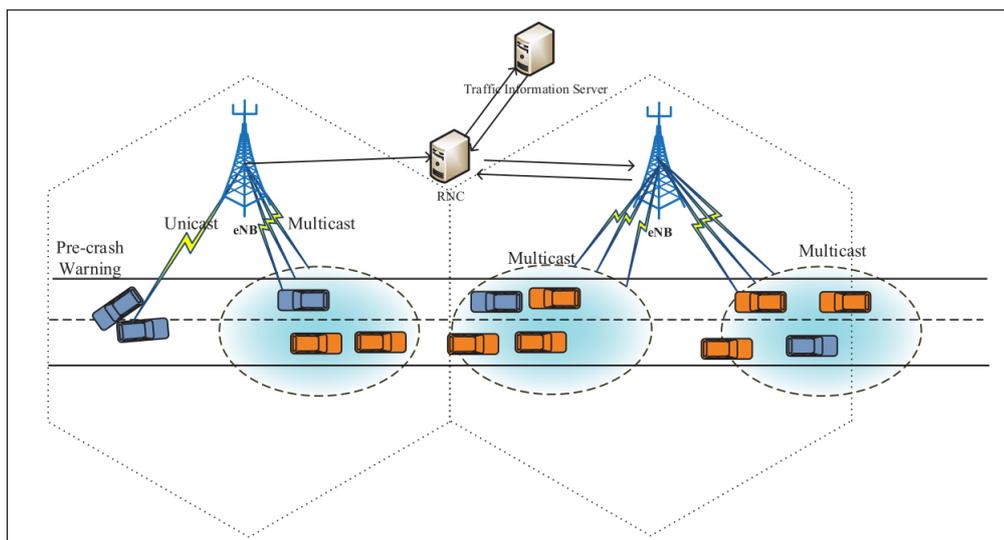
na entrega de mensagens. Já a comunicação V2I possibilita que veículos se conectem com a internet para disseminação de informação e *infotainment* via eNB.

### 2.3.1.1 Comunicações V2I

Comunicações V2I fornecem uma conexão com infraestruturas localizadas ao lado das vias, visto que a infraestrutura de redes celulares foram amplamente implementadas nas últimas décadas é economicamente eficiente utilizar redes celulares para dar suporte a comunicações V2I (KIHLE *et al.*, 2012). Outra solução é utilizar DSRC.

1. **Redes Celulares:** Oferecem dois tipos de transmissão, chamados *unicast* e *multicast/broadcast* que podem ser utilizados em comunicações V2I. *Unicast* pode ser utilizado tanto para distribuição de mensagens *uplink* e *downlink*, que consiste em uma ligação ponto a ponto entre um veículo e uma eNB. Já a transmissão *multicast/broadcast* é usada exclusivamente para a distribuição de mensagens *downlink*, que consiste em uma ligação ponto a múltiplos pontos. Os dois tipos de transmissão são ilustrados na Figura 7.
2. **DSRC:** é baseado na IEEE 802.11p/1609 que descreve os protocolos WAVE (KENNEY, 2011).

**Figura 7 – Exemplos de transmissão celulares em V2I**



Fonte: (ZHENG *et al.*, 2015)

### 2.3.1.2 Comunicações V2V

Comunicações V2V são conexões diretas entre veículos que visam minimizar acidentes e aprimorar a eficiência de tráfego. Acidentes causados por veículos lentos ou fora do campo de visão podem ser evitados trocando informações de velocidade, aceleração e mensagens de status entre veículos vizinhos (VINEL, 2012). São estudadas duas tecnologias para dar suporte as comunicações V2V:

1. **LTE D2D:** Comunicações *Device-to-Device* subjacentes a uma rede celular têm sido propostas como um meio de aproveitar a proximidade física de equipamentos em sistemas LTE (LEI; LIN; ZHONG, 2015). Em comunicações D2D equipamentos (UEs) próximos podem se comunicar diretamente um com o outro sem necessidade de uma eNB.
2. **DSRC:** Geralmente utiliza uma abordagem descentralizada em que a rede é autônoma e não necessita de uma infraestrutura externa para se organizar. Além disso, comunicações V2V baseadas em DSRC não interfere nas redes celulares devido ao uso de bandas de frequência diferentes.

No Quadro 1 é mostrado um comparativo entre as vantagens de cada uma das técnicas candidatas para as comunicações V2I e V2V em cenários HetVNETs.

**Quadro 1 – Vantagens das tecnologias candidatas para HetVNET**

modo de comunicação	LTE/LTE D2D	DSRC
Comunicação V2I	Alta cobertura, mecanismo de gerenciamento de mobilidade robusto, alta capacidade de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> , e arquitetura centralizada	fácil implementação e baixo custo, e adequado para disseminação de mensagens locais
Comunicação V2V	alta eficiência energética, alta eficiência de <i>spectrum</i> e <i>scheduling</i> eficiente de recursos	fácil implementação e baixo custo, modo <i>ad-hoc</i> , baixo overhead de mensagens de status

Fonte: Adaptado de (ZHENG *et al.*, 2015)

### 2.3.2 Aplicações

Serviços de ITS podem ser amplamente categorizados em serviços de segurança e não segurança, como descrito em (ARANITI *et al.*, 2013). O primeiro dissemina mensagens relacionadas à segurança em tempo-real, enquanto o segundo otimiza o fluxo de veículos, a fim de reduzir o tempo de viagem e melhorar a experiência dos usuários veiculares.

### 2.3.2.1 Serviços de segurança

Serviços de segurança visam reduzir o risco de acidentes e minimizar a perda de vidas de usuários veiculares, portanto pontualidade e confiabilidade são dois requisitos importantes para este tipo de serviços. O Quadro 2 lista as categorias e casos de uso de serviços de segurança, bem como os requisitos necessários.

**Quadro 2 – Serviços de segurança e casos de uso**

Categorias	Casos de uso	Requisitos de Segurança/confiabilidade	Uso	Frequência mínima de mensagens periódicas	Latência máxima
I: Aviso de status de veículos	Luz de freio emergencial	Alto/Alto	Avisar uma súbita desaceleração do veículo seguinte	10 Hz	100 ms
	Aviso de condição anormal	Alto/Alto	Avisar sobre o estado anormal do veículo	1Hz	100 ms
II: Avisos de tipos de veículos	Aviso de veículo de emergência	Alto/Alto	Reduzir o tempo de intervenção do veículo de emergência	10 Hz	100 ms
	Aviso de veículo lento	Alto/Alto	Melhorar a fluidez do trânsito	2 Hz	100 ms
	Aviso de motociclista	Alto/Alto	Evitar colisões	2 Hz	100 ms
III: Avisos de Perigo na via	Aviso de veículo no contrafluxo	Alto/Alto	Avisar sobre veículo no contrafluxo	10 Hz	100 ms
	Aviso de veículo estacionário	Alto/Alto	Evitar colisões sucessivas	10 Hz	100 ms
	Aviso de condições de tráfego	Alto/Alto	Reduzir o risco de colisões na formação de engarrafamentos	1 Hz	100 ms
	Aviso de violação de sinalização	Alto/Alto	Reduzir o risco de paralização e violação do tráfego	10 Hz	100 ms
	Aviso de obras na via	Alto/Alto	Reduzir o risco de acidentes	2 Hz	100 ms
IV: Avisos dinâmicos de veículos	Aviso de ultrapassagem de veículos	Alto/Alto	Reduzir o risco de acidentes	10 Hz	100 ms
	Assistente de troca de faixa	Alto/Alto	Segurança ativa na via	10 Hz	100 ms
	Deteção de colisão	Alto/Alto	Mitigação de impactos	2 Hz	50 ms

Fonte: Adaptado de (ZHENG *et al.*, 2015)

Nesta categoria de serviços a frequência mínima de mensagens periódicas varia entre 1Hz e 10Hz e o tempo de reação da maioria dos motoristas está entre 0.6s e 1.4s (WU *et al.*, 2009). Portanto, a latência máxima é restrita em até 100 ms. São considerados dois tipos de mensagens para serviços de segurança (ZHENG *et al.*, 2015):

- **Cooperative Awareness Message (CAM):** São disseminadas periodicamente na área de interesse, principalmente em avisos na via, como por exemplo, os casos de uso da categoria II do Quadro 2. As mensagens incluem informações sobre status, tipo do veículo, velocidade, posição, etc.
- **Decentralized Environmental Notification (DEN):** São acionadas por eventos especiais,

como por exemplo, os casos de uso das categorias I, III e IV do Quadro 2. O objetivo principal da DEN é notificar veículos na área de interesse sobre potenciais perigos.

### 2.3.2.2 Serviços de não segurança

Serviços de não segurança são utilizados principalmente para gerenciamento de trânsito, controle de congestionamento, melhorias na fluidez do tráfego, *infotainment*, etc. Tendo como objetivo principal fornecer uma experiência mais confortável e eficiente para usuários veiculares. Este tipo de serviço pode ser classificado em duas categorias gerenciamento de tráfego e *infotainment*, como pode ser visto na Quadro 3.

**Quadro 3 – Serviços de segurança e casos de uso**

Categorias	Casos de uso	Requisitos de Segurança/confiabilidade	Uso	Frequência mínima de mensagens periódicas	Latência máxima
I: Gerenciamento de tráfego	Regulamentação de limite de velocidades	Alto/Alto	Aprimorar a eficiência do tráfego/Reduzir a poluição dos veículos	1 Hz	N/A
	Aviso de velocidades ótimas para semáforos	Alto/Alto	Regulação do tráfego em interseções	2 Hz	100 ms
	Gerenciamento de cruzamentos	Alto/Alto	Regulação do tráfego em interseções e segurança das vias	1 Hz	100 ms
	Troca de faixas cooperativas	Alto/Alto	Aprimorar a eficiência de mobilidade	1 Hz	500 ms
II: Infotainment	Notificação de pontos de interesse	Médio/Médio	Conforto dos usuários veiculares	1 Hz	500 ms
	Comércio eletrônico local	Alto/Alto	Conforto dos usuários veiculares	1 Hz	500 ms
	Download de mídia	Médio/Médio	Entretenimento dos passageiros	1 Hz	500 ms
	Download de mapas e atualizações	Médio/Médio	Eficiência e conforto	1 Hz	500 ms

Fonte: Adaptado de (ZHENG *et al.*, 2015)

A primeira categoria tem como objetivo melhorar a fluidez do trânsito, assim diminuindo o tempo das viagens e reduzindo o consumo de combustível, já a segunda categoria provê entretenimento e informações sob demanda para os passageiros. Comparando com serviços de segurança observamos que possuem diferentes requisitos de QoS, para a maioria dos serviços de não segurança a frequência mínima de mensagens periódicas é de 1 Hz, enquanto a latência máxima é de 500ms.

### 2.3.3 Desafios da camada MAC e *design* de redes

Existem vários desafios relacionados as HetVNETs. Nesta seção, vamos discutir os desafios relacionados a camada MAC e design de redes.

#### 2.3.3.1 Métricas do MAC

Considerando os desafios das redes VANETs, protocolos MAC devem levar em consideração as seguintes métricas (ALMALAG; OLARIU, 2013):

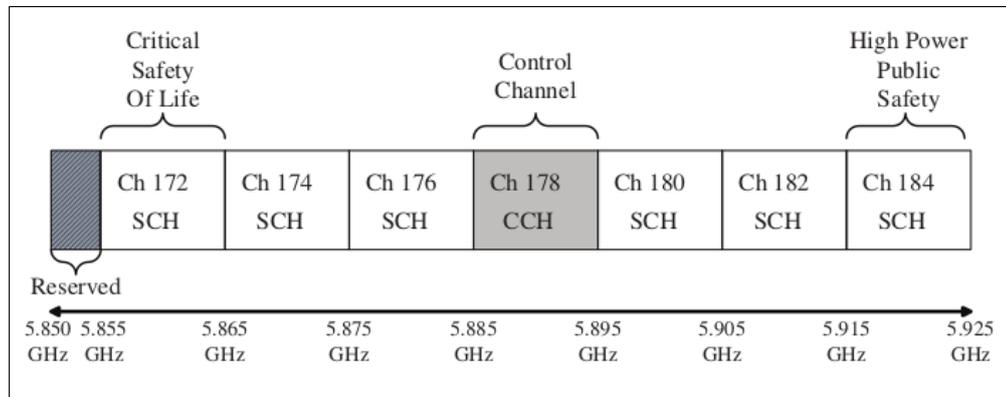
- **Vazão:** É o número médio de bytes recebidos com sucesso por segundo. Essa métrica é baseada em comunicações *broadcast* de único salto.
- **Confiabilidade:** Em VANETs é medida como a probabilidade de receber uma mensagem periódica de um determinado veículo dentro de cada raio de transmissão.
- **Tempo de canal de acesso:** É o tempo entre a aplicação encaminhar a mensagem para a camada MAC e o *frame* deixar o nó.
- **Equidade:** É mensurado maximizando a igualdade de compartilhamento de canais entre os veículos.
- **Overhead:** Ao projetar um protocolo MAC para VANETs, mensagens de controle podem precisar ser trocadas entre veículos por canal reservados. A quantidade de sobrecarga adicionada deve ser considerada.
- **Qualidade de serviço (QoS):** É importante alcançar um certo nível de qualidade de serviço (QoS) para suportar a comunicação multimídia em VANETs. Um protocolo MAC para VANET deve permitir que os veículos enviem e recebam mensagens que não sejam de segurança, sem qualquer impacto na confiabilidade do envio e recebimento de mensagens de segurança, mesmo se a densidade do tráfego for alta.

#### 2.3.3.2 Padrões IEEE para protocolos MAC em VANETs

O departamento de Trânsito dos Estados Unidos alocou em uma faixa de frequência de canais conhecida como *Distributed Short Range Communication* (DSRC), foi com 75MHz do espectro em 5.9GHz. O DSRC é dividido em sete canais, cada um com 10MHz de largura, como mostra a Figura 8.

O canal 178 é o canal de controle (CCH), que é utilizado para mensagens *beacons*, mensagens de emergência e mensagens de controle. Já os demais seis canais de serviço (SCH)

**Figura 8 – Alocação do espectro DSRC americano**



Fonte: (ALMALAG; OLARIU, 2013)

suportam aplicações de não-segurança. As taxas de transmissão de um canal de 10 MHz são de 6, 9, 12, 18, 24 e 27 Mbps com um preâmbulo de 3 Mbps, podendo atingir 54 Mbps se dois canais de serviço forem combinados para um de 20 MHz. O esquema de modulação usado é o OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

#### 2.3.3.2.1 Padrões WAVE IEEE 1609.4

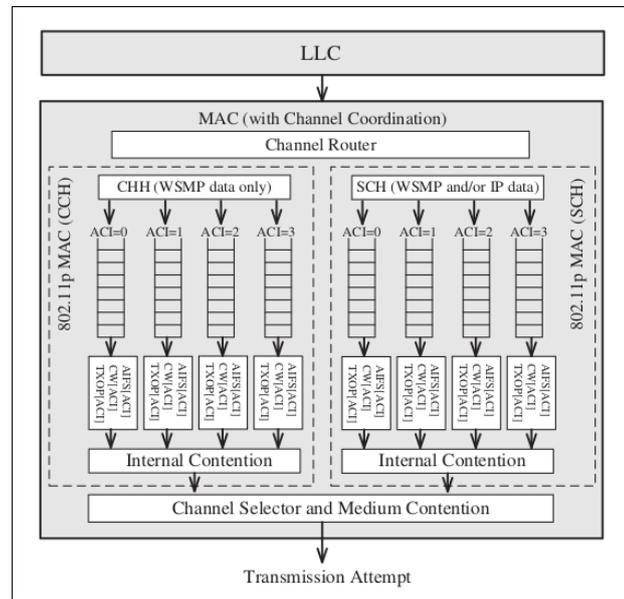
Na pilha WAVE, o padrão IEEE 1609.4 opera acima do IEEE 802.11p na camada MAC (Figura 2). IEEE 1609.4 tem seu foco principal em lidar com operações multicanais de rádio DSRC, como mostra a Figura 9. Existe um intervalo de sincronização (SI) que consiste de um intervalo CCH (CCHI) e um intervalo SCH (SCHI), cada um separado por um intervalo de guarda (GI), como mostra a figura Figura 10 (ALMALAG; OLARIU, 2013).

É assumido que todos os dispositivos de rádio estão sincronizados utilizando um sistema de posicionamento global (GPS). Durante o CCHI, todos os dispositivos devem estar sintonizados no canal 178 (CCH) para disseminar atualizações e escutar mensagens dos seus vizinhos e RSUs. Durante o SCHI, os veículos devem sintonizar com o SCH de sua escolha, dependendo dos serviços oferecidos.

O padrão define a largura do SI como 100ms, estimando 10 mensagens de segurança enviadas por segundo. É definido também o GI no início de cada CCHI e SCHI. A finalidade do GI é contabilizar a troca de canal, definindo sua largura entre 4 e 6 ms, que é o tempo de *overhead* para um rádio sintonizar e estar disponível em outro canal.

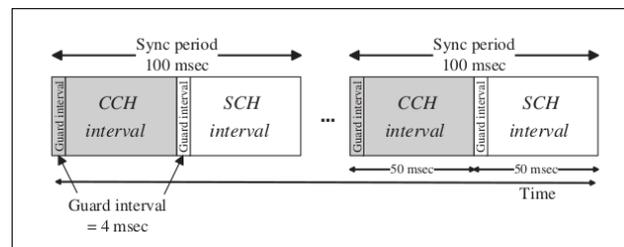
Segundo Zheng et al. (2015), o método de acesso de canal do IEEE1609.4 possui as seguintes desvantagens:

**Figura 9 – Arquitetura da coordenação de canal do MAC da pilha WAVE**



Fonte: (ALMALAG; OLARIU, 2013)

**Figura 10 – Divisão do tempo em intervalos CCH e SCH**



Fonte: (ALMALAG; OLARIU, 2013)

1. A utilização de canal degrada com o aumento do número de veículos, em virtude da ocorrência de mais colisões inerentes do MAC baseado em CSMA.
2. O *round-robin* da comutação de canal simultâneo pode causar o problema de inundação de colisões no início do intervalo. Durante o CCHI, veículos que querem enviar dados devem esperar até o SCHI. Entretanto, eles tendem a transmitir mensagens no início do SCHI simultaneamente, aumentando a probabilidade de colisões.
3. Devido a mobilidade veicular, o problema do terminal oculto é mais severo com uma topologia dinâmica veicular do que ambientes tradicionais estáticos.
4. Trocas de *Frequent-to-Sent* (RTS) / *Clear-to-Sent* (CTS) podem resultar em um alto *overhead*; e
5. Devido ao tempo limitado de comunicação e a estratégia de não associação do IEEE

1609.4, uma OBU ou RSU não podem manter uma tabela de status dos seus vizinhos, tornando difícil e ineficiente a implementação de escalonamento de canal nó a nó.

#### 2.3.3.2.2 Padrão IEEE 802.11p

O padrão IEEE 802.11p define a camada física e de controle de acesso ao meio. A pilha WAVE utiliza o IEEE-802.11p, que é baseado on CSMA/CA definido como procolo MAC no padrão IEEE 802.11 que incluem emendas de QoS do IEEE 802.11e.

O Padrão 802.11p utiliza utiliza o *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA), a Figura 9 dá uma visão geral sobre a arquitetura EDCA e os tipos de canais que são suportados, CCH e SCHs. Para o IEEE 802.11p, diferentes valores de *Arbitration Inter-frame Space* (AIFS) e *Content Window* (CW) são escolhidos para diferentes categorias de aplicação (ACs).

Existem quatro tipos de categorias de de tráfego de dados disponíveis com diferentes prioridades: *background traffic* (BK), *best effort traffic* (BE), *voice traffic* (VO) e *video traffic* (VI). Cada categoria de tráfego possui sua própria fila, de modo que existem quatro filas distintas para cada canal.

#### 2.3.3.3 Protocolos *broadcast/multicast*

Ambientes veiculares possui suas características únicas em comparação com outros ambientes de rede sem fio. Em uma rede veicular, energia é abundante e a mobilidade é previsível, que são motivos para implementação deste tipo de serviço (ZHENG *et al.*, 2015). Entretanto, existem diversos fatores que limitam a performance destes serviços, como tamanho em larga escala da rede, alta mobilidade dos nós, topologia de rede dinâmica e conectividade não confiável.

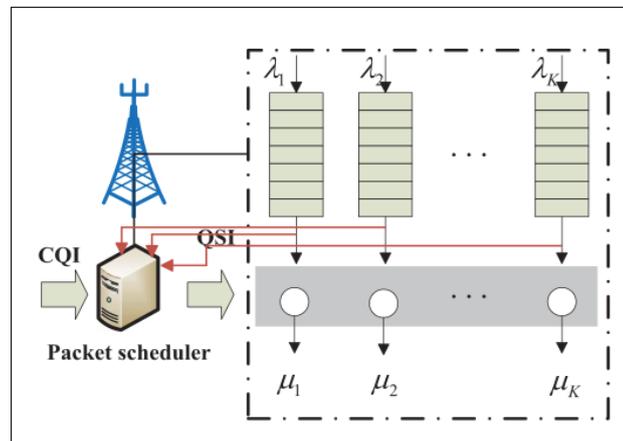
LTE pode suportar transmissões *broadcast/multicast* de alta qualidade através do eMBMS. Sendo capaz de enviar dados uma única vez para um grupo de usuários registrado no serviço oferecido, invés de enviar para cada nó individualmente. Em sistemas LTE, a transmissão de pacotes eMBMS é coordenada entre um grupo de células sincronizadas, que transmitem sinais idênticos exatamente ao mesmo tempo e frequência. Os sinais dessas células são combinados no meio, resultando num incremento na potência do sinal. Na perspectiva do nó, todos os sinais parecem ser transmitidos de uma única célula maior.

Desafios existem quando eMBSM é aplicado na disseminação de mensagens em HetVNeTs. Já que dados de serviços são enviados por múltiplas eNBs, o atraso de propagação pode ser alto. Sistemas LTE são muito suscetíveis ao problema de *inter-Carrier Interference*

(ICI) em cenários de alta mobilidade, devido a *Doppler spreads* (ZHENG *et al.*, 2015).

Sistemas DSRC foram desenvolvidos para serviços de disseminação de informações de segurança. Entretanto, com uma alta densidade, a probabilidade de sucesso em receber informações em *broadcast* baseado no IEEE 802.11 pode ser de menos de 30% em condições de saturação. Portanto, diversos desafios existem para os protocolos de *broadcast* existentes em oferecer serviços confiáveis, como: problema do terminal oculto, tamanho fixo da *content window* (CW), tempo de vida limitado para mensagens de segurança e problemas de *broadcast storm*.

**Figura 11 – Escalonamento de pacotes em sistemas LTE**



Fonte: (ZHENG *et al.*, 2015)

#### 2.3.3.4 Alocação de Recursos e suporte a QoS

Esquemas de alocação de recursos são desenvolvidos para suportar os requerimentos de QoS de serviços de segurança e não segurança em redes veiculares. O mecanismo EDCA é proposto no padrão IEEE802.11, enquanto o QoS Class Identifier (QCI) foi desenvolvido para redes celulares.

Suporte a QoS em sistemas LTE são de responsabilidade de um escalonador de pacotes localizado na eNB e responsável pela gerência de recursos de rádio, como pode ser visto na Figura 11. O escalonador seleciona quais fluxos de tráfego devem atender e aloca os recursos de rádio correspondentes, dependendo dos requisitos de QoS de cada tráfego, conforme especificado pelo QCI.

Então, baseado no *feedback Channel Quality Indicator* (CQI), um esquema de *Modulation and Coding* (MCS) apropriado é escolhido para transmitir tráfego de dados. A

principal diferença entre os os esquemas de escalonamento está em seus distintos objetivos de otimização, e.g., a maximização da vazão, minimização do atraso fim-a-fim, orientação a serviço, limitar interferência, etc. (ZHENG *et al.*, 2015).

### 3 PROPOSTA

Este trabalho tem como proposta a arquitetura HetVCAR que possui o objetivo de fornecer uma rede híbrida que integra diferentes tecnologias sem fio, e.g. IEEE802.11p e LTE, a fim de melhorar a conectividade em cenários veiculares esparsos, de forma que a confiabilidade e disponibilidade de serviços veiculares sejam aprimoradas. A arquitetura proposta neste trabalho possui as seguintes características:

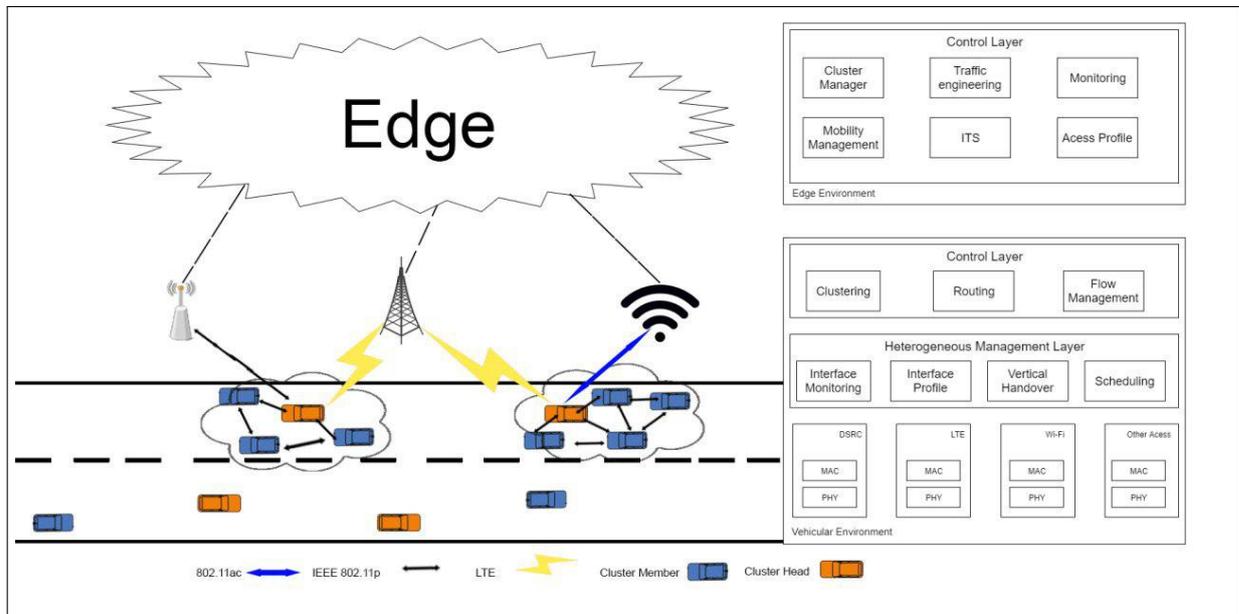
- **Utiliza uma técnica de clusterização:** Com isso, a arquitetura é capaz de disseminar informações por toda a rodovia evitando sobrecarregar uma única interface de comunicação. Além disso, é capaz de manter a rede funcionando, mesmo que ela esteja esparsa.
- **Utiliza uma interface de baixo alcance para comunicações intra-cluster:** Desta forma, a formação e manutenção do cluster, bem como, a disseminação de informação dentro do agrupamento é realizado localmente, e.g. DSRC, não interferindo na rede de alto alcance.
- **Utiliza a interface de alto alcance para comunicações inter-cluster:** Assim, o CH é responsável por encaminhar e receber mensagens através da rede de longo alcance, e.g. LTE, para outros clusters. De forma que o número de nós utilizando esta rede simultaneamente é mitigado.
- **Foi desenvolvida para cenários *highway*:** A arquitetura foi proposta para aprimorar a conectividade neste tipo de cenário, provendo mais confiabilidade para os serviços veiculares.

Nas seções seguintes essas características são detalhadas.

#### 3.1 ESTRUTURAS DO HETVCAR

A Figura 12 apresenta a organização das camadas inferiores à camada de serviço para HetVCAR. Na pilha de camadas, pode-se observar que são mantidas as camadas de acesso ao meio (MAC) e a camada física (PHY), bem como a camada de serviço. Todas as três possuem os papéis semelhantes das suas respectivas implementações do TCP/IP para cada tecnologia sem fio. Conforme a Figura 12, a camada de controle foi definida para os dois ambientes que compõem a arquitetura, o ambiente de borda e o ambiente veicular. Cada camada e seus módulos serão apresentados nas seções seguintes.

**Figura 12 – Pilha de camadas para HetVCAR**



Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.1.1 Camada de Serviço

A camada de aplicação, também chamada de camada de serviço, é a camada que está em contato direto com o usuário, em outras palavras, são os aplicativos que usamos para nos conectarmos na rede e usar seus serviços. Esta camada é estruturada modularmente para permitir a flexibilidade das funções e de forma, para se determinar os requisitos de comunicação de cada aplicação distribuída.

Esta camada na arquitetura HetVCAR é a camada superior em ambos ambientes veicular e de borda, sendo responsável por prover diversos serviços veiculares para os usuários veiculares, seja motorista ou passageiro, dentro das duas categorias já definidas anteriormente. A seguir são apresentados alguns possíveis serviços veiculares suportados pela arquitetura proposta:

- **Infotainment:** Fornecem informações adicionais ou entretenimento para os passageiros e/ou motoristas, e.g, serviços multimídia, canais de rádio ou publicidade de comércio local, postos de gasolina, etc. Bem como, informações climáticas e turísticas.
- **Gerência de tráfego:** Visam aumentar a eficiência do tráfego em determinadas regiões, utilizando mecanismos como análise do fluxo de veículos, otimização de semáforos em cruzamentos e definir novas rotas a partir de informações de acidentes e perigos nas vias.
- **Aplicações de segurança:** Visam garantir a integridade dos passageiros, visto que as mensagens de alerta ou emergência sejam transmitidas entre os veículos, tais informações

são ainda apresentadas aos motoristas para que ele tenha tempo suficiente para reagir a determinado evento, e.g. alerta de colisões, alertas sobre locais perigosos, veículo de emergência passando, assistente de ultrapassagem, etc.

- **Acesso a Internet:** Um passageiro que quer se conectar à Internet envia uma requisição para encontrar um nó que tenha tal acesso (uma RSU, ou outros dispositivos de outras tecnologias como LTE). O nó que tem tal acesso responde à requisição e, assim, começa a interação para o acesso à Internet.

### 3.1.2 Ambiente veicular

As camadas e seus respectivos módulos que são embarcados nos veículos são denominadas na arquitetura proposta de ambiente veicular. Conforme a Figura 12 são definidas três camadas: controle, gerenciamento heterogêneo e acesso ao meio. Esta última composta pela camada MAC e física de cada tecnologia sem fio disponível no veículo.

#### 3.1.2.1 Camada de Controle

Esta camada é responsável pelo gerenciamento e controle das trocas de mensagens da arquitetura HetVCAR, definindo fluxos de mensagens. Além da formação e manutenção de agrupamento de veículos. A camada de controle é composta dos seguintes módulos:

- **Clusterização:** *Clusters* ou agrupamentos são estruturas que organizam hierarquicamente a rede e visam facilitar o gerenciamento de sistemas complexos e a escalabilidade de informações trafegadas na rede. Nos agrupamentos, diversos nós se organizam em um grupo, em torno de um representante, momentaneamente selecionado e denominado líder (*Cluster Head*). Este nó assume a responsabilidade de coordenar os restantes dos nós do agrupamento. Na maioria das abordagens de agrupamentos para VANETs um nó identificado como líder é responsabilizado pela formação e manutenção do agrupamento. Este módulo é responsável pela formação, manutenção e separação de agrupamentos de veículos. Entretanto, a arquitetura HetVCAR foi desenvolvida sem a dependência de um único algoritmo específico de clusterização, de forma que é possível ser implementada com qualquer algoritmo de agrupamento proposto na literatura.
- **Roteamento:** Redes *ad hoc* são redes sem fio de múltiplos saltos, que têm como características serem auto-configuráveis e suportarem mobilidade. Este tipo de rede se opõe às redes sem fio estruturadas, onde existem pontos de acesso fixos que intermediam toda a

comunicação dos nós clientes. Em uma rede estruturada, se um nó cliente deseja enviar uma informação a um outro cliente, os pacotes deverão ser transmitidos diretamente a um ponto de acesso, que por sua vez irá redirecioná-los ao nó de destino. Já em uma rede *ad hoc* não há necessidade desta infra-estrutura, já que a transmissão entre dois clientes se dá de forma direta, ou através de múltiplos saltos, onde os nós intermediários são outros clientes da mesma rede, atuando como roteadores encaminhando os pacotes até o destino final. As redes *ad hoc* apresentam custo menor que as estruturadas, já que não é necessária a utilização de pontos de acesso. Além disso, uma rede *ad hoc* é altamente escalável, já que cada cliente é potencialmente um roteador de pacotes para outros nós. Por outro lado, o roteamento neste tipo de rede não é trivial, já que não existe a priori um conjunto de nós com a missão de encaminhar pacotes, fazendo com que seja necessário que cada cliente descubra as rotas até o seu destino. Existe ainda as características de mobilidade que fazem com que as rotas sejam dinâmicas, uma vez que os nós estão em constante movimento. Este módulo é responsável pelo roteamento dos pacotes entre os veículos, respeitando as regras definidas pelo HetVCAr, onde um nó que não é CH não pode utilizar a interface LTE para encaminhar seus pacotes.

- **Gerenciamento de fluxo:** Este módulo é responsável pelo tratamento dos diferentes fluxos de dados que são transmitidos pela a arquitetura HetVCAr. Dentre eles podemos destacar o fluxo de controle, que é responsável pelas mensagens de formação e manutenção do agrupamento de veículos. Fluxo de segurança, composto pelas mensagens relativas a aplicações de segurança e por fim, o fluxo de não-segurança, composto por mensagens relacionadas a aplicações de conforto e *infotainment*. Neste módulo é realizada a hierarquia de prioridade para cada fluxo definido, onde, e.g., o fluxo de controle tem maior prioridade que o fluxo de não segurança.

### 3.1.2.2 Camada de Gerenciamento Heterogêneo

Esta camada é responsável pelo gerenciamento e controle das interfaces de comunicação disponíveis nos veículos que utilizam a arquitetura HetVCAr, definindo qual melhor meio de comunicação sem fio no momento. Além do monitoramento e *vertical handover*. A camada de gerenciamento heterogêneo é composta dos seguintes módulos:

- **Monitoramento de Interface:** Este módulo é responsável por monitorar o meio para cada interface de comunicação disponível no nó. Analisando critérios como QoS, potência

de sinal recebida, consumo de energia, interferência, ruído, entre outros. De maneira que a escolha da interface de comunicação seja realizada com maior eficiência.

- **Perfil de Interface:** Este módulo é responsável por catalogar as interfaces de comunicação sem fio disponíveis no nó. De forma que ele possa informar aos seus vizinhos quais possíveis interfaces eles poderão utilizar para se comunicar, auxiliando a escolha da interface de comunicação ideal para o determinado momento e região.
- **Handover Vertical:** Devido a alta mobilidade dos nós pertencentes a redes veiculares, muitas vezes os veículos se desassocia de uma rede para conectar-se a outra. Esse fenômeno é conhecido como *handover*. Existem duas modalidades de *handover*: horizontal e vertical. O *handover* horizontal é aquele que envolve as mesmas tecnologias de rede, enquanto que o *handover* vertical abrange diferentes tecnologias. Uma das principais exigências no gerenciamento de *handover* vertical é fazer com que o *handover* seja realizado de forma imperceptível ao usuário. Em ambientes onde há diversas tecnologias de acesso surge o conceito *Always Best Connected* (ABC), o qual se refere a um terminal móvel estar sempre conectado a melhor rede candidata, ou seja, a que melhor atenda às suas necessidades. Critérios como parâmetros de QoS, potência de sinal recebida, custo financeiro, consumo de energia e outros poderão ser utilizados para manter essa política.
- **Escalonamento:** Este módulo é responsável pelo controle de tráfego dos pacotes trocados utilizando a arquitetura HetVCAr, ou seja, é composto pelos mecanismos de escalonamento através dos quais os pacotes são recebidos ou transmitidos nos nós da rede. Isto inclui tanto as decisões sobre quais os pacotes a aceitar e a que taxa, na entrada de uma interface, como a determinação de quais pacotes a transmitir e com que débito, na saída de uma interface. Na situação mais simples, o controle de tráfego reduz-se a uma única fila de espera que recebe os pacotes e os "libera" o mais rápido possível, este tipo de fila de espera é denominada FIFO (*Fist In Fist Out*). As filas de espera são locais onde os pacotes de uma rede esperam para ser processados, ou seja, são uma forma de organização de dados pendentes com a qual se pretende gerir os fluxos de dados que circulam na rede. Os algoritmos de escalonamento decidem qual o próximo pacote que será servido na fila de espera, sendo assim, um dos mecanismos responsáveis por distribuir a largura de banda do *link* pelos diferentes fluxos.

### 3.1.2.3 Camada de Acesso ao Meio

Esta camada é responsável pelo acesso ao meio dos veículos que utilizam a arquitetura HetVCAR. Conforme já discutido na subseção 2.3.3 existem vários desafios em utilizar diferentes tecnologias de comunicação. Por este motivo esta camada é composta pelo conjunto de camadas MAC e Física de cada tecnologia sem fio disponível no veículo. Conforme podemos ver na Figura 12, as camadas são referentes a tecnologia DSRC, LTE, Wi-Fi e a outras tecnologias sem fio, de modo que a arquitetura pode se adaptar a diferentes cenários com disponibilidade de diversas tecnologias.

### 3.1.3 Ambiente de borda

As camadas e seus respectivos módulos que são embarcados nas infraestruturas nas margens da rodovia são denominadas na arquitetura proposta de ambiente de borda. Conforme a Figura 12 é definida a camada de controle composta pelos seguintes módulos:

- **Gerente de Agrupamento:** Este módulo é responsável por controlar os agrupamentos ativos na sua área de cobertura. Este módulo troca informações com o módulo de Clusterização do ambiente veicular, de modo que a formação dos agrupamentos é realizada de maneira descentralizada, mas o seu gerenciamento de modo centralizado. Desta forma, a infraestrutura tem conhecimento de quais nós ela receberá mensagens do ambiente veicular, pois o ID de cada CH pertencente a sua região de cobertura é gerenciado neste módulo.
- **Gerenciamento de Mobilidade:** Este módulo é responsável por controlar a mobilidade dos agrupamentos entre regiões de cobertura de diferentes infraestruturas. Através deste módulo uma infraestrutura pode informar a próxima as informações relevantes (ID do cluster, ID do CH, número de nós, etc.) de um *cluster* que entrará na sua região. Desta forma o agrupamento já estará operável na nova região sem a necessidade de trocar pacotes de controle.
- **Sistemas de transporte inteligente (ITS):** Este módulo é responsável por coletar e disseminar informações relevantes para aplicações de ITS. Este módulo foi projetado para dar suporte a diversos serviços veiculares que são realizados de forma centralizada. e.g, *Infotainment* e gerência de tráfego.
- **Perfil de acesso:** Este módulo é responsável por catalogar as interfaces de comunicação sem fio disponíveis em determinada região. De forma que ele possa informar aos nós veiculares pertencentes aquela região quais possíveis interfaces eles poderão utilizar para

se comunicar, auxiliando a escolha da interface de comunicação ideal para o determinado momento e região.

- **Monitoramento:** Este módulo é responsável por monitorar o meio para cada interface de comunicação disponível em determinada região. Analisando critérios como QoS, potência de sinal recebida, interferência, ruído, entre outros. De maneira que a escolha da interface de comunicação seja realizada com maior eficiência.
- **Engenharia de Tráfego:** Este módulo é responsável por otimizar o desempenho da rede, analisando dinamicamente, prevendo e regulando o comportamento dos dados transmitidos através da rede. A engenharia de tráfego trabalha o tráfego a fim de ajustá-lo aos recursos de uma rede. O foco é a medida do tráfego e seu controle. Seus objetivos são a melhoria das redes e de seu desempenho, tendo como principal objetivo minimizar a perda de pacotes, minimizar o atraso, minimizar a variação do atraso (*jitter*), diminuir a probabilidade de bloqueio e maximizar a capacidade de transferência.

### 3.2 PROTÓTIPO

Este protótipo consiste de um mecanismo heterogêneo baseado em agrupamentos para melhorar a conectividade de ambientes esparsos que foi publicado na Conferência *IEEE Symposium on Computers and Communications 2018 (ISCC 2018)* com Qualis A2.

O mecanismo visa melhorar a conectividade em cenários esparsos de ambientes veiculares, aprimorando a confiabilidade e disponibilidade de serviços veiculares, reduzindo as desconexões. Para este propósito, o mecanismo utiliza cada tecnologia de comunicação de acordo com suas características, ou seja, cada interface de rede do veículo tem um comportamento específico.

A interface DSRC é utilizada para comunicações V2V, possibilitando a criação e manutenção de agrupamentos, bem como, troca de mensagens entre o CH e os membros do agrupamento. Assim, mensagens realizadas pela interface DSRC são classificadas como comunicação intra-cluster.

Já a rede LTE é utilizada para comunicações V2I, disseminando informações entre os *clusters* ativos na via. Esta estratégia utiliza a alta cobertura do LTE para aprimorar a área de disseminação das mensagens. Assim, as mensagens realizadas pela interface LTE são classificadas como comunicação inter-cluster.

Os veículos são clusterizados sempre que possível na rodovia. Se um veículo não

possui vizinhos, ele se elege como CH e pode se comunicar com a estação base LTE. Senão, o veículo troca mensagens de controle com seus vizinhos e o algoritmo *Dynamic Means* é aplicado. O CH utiliza a rede LTE somente quando necessário, por exemplo, para disseminar uma mensagem de *infotainment* através da via.

### 3.2.1 Algoritmo de Clusterização

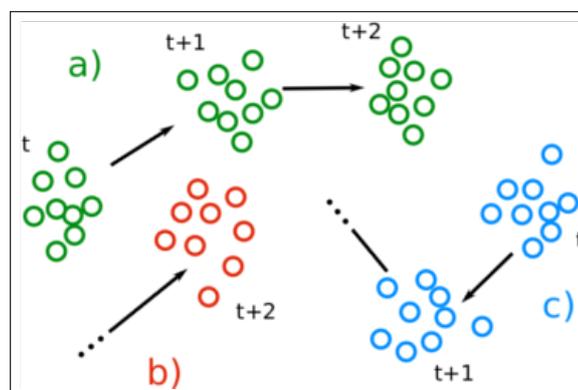
Conforme já discutido, a arquitetura HetVCAR é independente de uma única abordagem de clusterização. Para validação do protótipo foi escolhido e implementado o algoritmo *Dynamic Means* (DM) (CAMPBELL *et al.*, 2013).

O DM é um algoritmo baseado no *dependent Dirichlet process mixture model* (DDPMM) (LIN; GRIMSON; FISHER, 2010), para clusterização dados contendo um número desconhecido de agrupamentos em evolução. O algoritmo se deriva via uma análise da baixa variância assintótica do algoritmo de amostragem de Gibbs para o DDPMM, fornecendo um agrupamento forte com convergência garantida similar à aquelas do algoritmo K-Means.

Este algoritmo é uma abordagem adequada para ambientes veiculares, visto que não podemos determinar com precisão o número de agrupamentos para um período de tempo já que os veículos estão em constante movimento.

O algoritmo *Dynamic Means* pode tomar três decisões em cada *time step*: criação (a), separação (b) e ressurreição (c) de agrupamentos baseado em rótulos e parâmetros de *time steps* passados. A Figura 13 ilustra cada um desses casos.

**Figura 13 – Funcionamento do Dynamic Means**



Fonte: Campbell *et al.* (2013)

Desta forma se há necessidade de um agrupamento na via, um agrupamento formado anteriormente e separado, pode ser revivido e ser operacional evitando os custos de *overhead* de

criação de um novo agrupamento.

Para que este algoritmo possa ser utilizado no nosso mecanismo proposto, é necessário eleger um *Cluster Head* para cada agrupamento formado pelo DM, já que o CH é responsável pelas comunicações LTE. Para a seleção do CH, foi identificado e selecionado o nó mais central de cada agrupamento utilizando a técnica da distância Euclidiana. Entretanto, após a execução do algoritmo DM o *cluster* já é funcional, estando pronto para disseminar pacotes utilizando a interface DSRC.

## 4 TRABALHOS RELACIONADOS

A viabilidade de utilizar redes celulares para prover serviços veiculares é um assunto recorrente na literatura (PERDANA; MUNADI; MANURUNG, 2017) (GIMENEZ; MICHAELSEN; PEDERSEN, 2016) (LING *et al.*, 2015) (OU *et al.*, 2015). Já foram propostos diversos mecanismos que levam em consideração as restrições deste tipo de rede.

O trabalho realizado em Sadek et al. (2015), apresenta uma arquitetura veicular híbrida *LTE/Wi-Fi* que suporta aplicações de *infotainment* e controle de tráfego ITS. Cada tecnologia possui um objetivo distinto e a integração aprimora o sistema em ambientes urbanos.

A tecnologia *Wi-Fi* fornece uma alta capacidade, baixo custo e alta penetração de mercado. Entretanto, possui uma baixa área de cobertura comparada com a tecnologia *LTE*. De modo que o *Wi-Fi* seja adequado para uso como uma rede de acesso dentro do veículo. Em contra partida, *LTE* oferece alta cobertura e melhor *QoS*. Porém é necessário um espectro licenciado de alto custo e pouco escalável.

O trabalho divide a comunicação veicular em dois tipos, *Infrastructure-to-Vehicle* (I2V) e *On-board Vehicle Communication* (OVC). A rede I2V fornece acesso a rede *LTE*, já a rede OVC consiste de um *Access Point* (AP) *Wi-Fi*, dispositivos móveis dos passageiros e a OBU para dados ITS. Neste cenário *LTE* é o *link* usado para acesso de Internet e a conectividade é compartilhada através do *Wi-Fi*. Ambos os tráfegos ITS e *infotainment* são enviados via *LTE* e roteados distintamente dentro do veículo baseado no destino desejado.

A arquitetura *HetVCAr* proposta nesta dissertação também divide a comunicação veicular em duas categorias, porém a finalidade das comunicações *DSRC* são para criação e manutenção do cluster e disseminação de dados intra-cluster, conforme será apresentado no Capítulo 3.

Em Ucar et al. (2016) é apresentada uma arquitetura chamada *VMaSC-LTE* que integra um algoritmo de clusterização multihop utilizando o protocolo IEEE 802.11p e sistemas celulares (4G). Os veículos são clusterizados utilizando o algoritmo *Vehicular Multi-hop algorithm for Stable Clustering and 3GPP networks* (VMaSC).

O VMaSC elege o *Cluster Head* (CH) utilizando como métrica a mobilidade relativa entre os veículos e seus vizinhos. O algoritmo reduz o *overhead* introduzindo uma conexão de cluster direta entre o CH vizinho ou membro de um cluster, evitando a comunicação com o CH em múltiplos saltos. A manutenção do *cluster* é feita de maneira reativa, onde é enviado *hello packets* periódicos disseminando informações dos membros. Através da troca de informações do

*cluster* entre CHs. Por fim, cada CH opera com uma interface dupla com funcionalidades do IEEE 802.11p e LTE, de modo que os CHs são *links* entre as redes VANET e LTE. Entretanto, o VMaSC não foi desenvolvido para ambientes esparsos.

A arquitetura HetVCAR também utiliza técnica de agrupamentos, porém não é limitada por apenas uma única técnica, podendo implantar qualquer abordagem proposta na literatura, incluindo o VMaSC. A HetVCAR também define várias camadas e módulos para fornecer comunicação heterogênea de forma transparente para o usuário e com maior eficiência.

Inacio et al. (2017) introduz uma estratégia de distribuição de conteúdo usando Redes tolerantes a atrasos (DTN) e filtros de Blom. Entretanto, para garantir um taxa de entrega satisfatória a abordagem DTN requer que cada nó periodicamente transmita pacotes de controle com informações sobre a disponibilidade dos seus recursos para seus vizinhos.

Este grande número de pacotes de controle causam uma sobrecarga na rede, para superar este problema, o trabalho propõe propõe uma estratégia baseada no filtro de Blom. Nesta pesquisa a arquitetura proposta utiliza a já existente e implantada rede LTE para superar as restrições de ambientes veiculares esparsos. É proposto uma arquitetura heterogênea que suporta diversas tecnologias sem fio em vez de utilizar DTN.

Rémy et al. (2012) apresenta duas extensões do LTE4V2X (REMY *et al.*, 2011), um *framework* para organização centralizada de redes veiculares. A primeira extensão utiliza comunicação *multi-hop* para suprimir áreas sem cobertura LTE. Já a segunda extensão lida com a adaptação do *framework* LTE4V2X para aplicações de disseminação com foco em entrega de mensagens específicas em uma determinada área geográfica.

Nikolovski et al. (2017) propõe um protocolo de disseminação baseado em encontro de eventos, chamado de E-BED. Explorando a distância e a probabilidade de encontro dos veículos com o evento, o protocolo proposto pode ser utilizado em ambos cenários urbanos e de rodovias. O objetivo do E-BED é disseminar informações específicas em uma determinada região com um número mínimo de retransmissão de pacotes.

A arquitetura proposta neste trabalho utiliza uma abordagem baseada em agrupamentos para disseminar informações entre os veículos e com o suporte das redes celulares que poderá viabilizar entrega mensagens através de toda a rodovia.

Em Tung et al. (2013)(TUNG *et al.*, 2013) é proposta uma arquitetura baseada em cluster utilizando ambos canais LTE e DSRC para fornecer um serviço de prevenção de colisões em cruzamentos. Onde a comunicação DSRC é utilizada para formação e manutenção do cluster, e a comunicação LTE é utilizada para disseminar *Cooperative Awareness Messages* (CAMs)

entre os clusters.

Foi desenvolvido um algoritmo de clusterização específico para prevenção de colisões em cruzamentos, com o seguinte funcionamento: o veículo mais próximo da interseção será eleito como CH e assume a responsabilidade de manutenção e troca de CAMs via estação base (BS). Veículos na mesma estrada e sentido estarão no mesmo cluster. As CAMs contém a posição de início e fim do cluster na via, que é utilizado na prevenção de colisões.

Para o serviço de prevenção de colisões em cruzamentos não é necessário a manutenção da estrutura do cluster o tempo todo. Foi definido como *Cluster Region* (CR) a região que os veículos enviam mensagens *beacons* para formação do cluster e *Service Region* (SR) como a região em que os CHs mandam CAMs para a estação base.

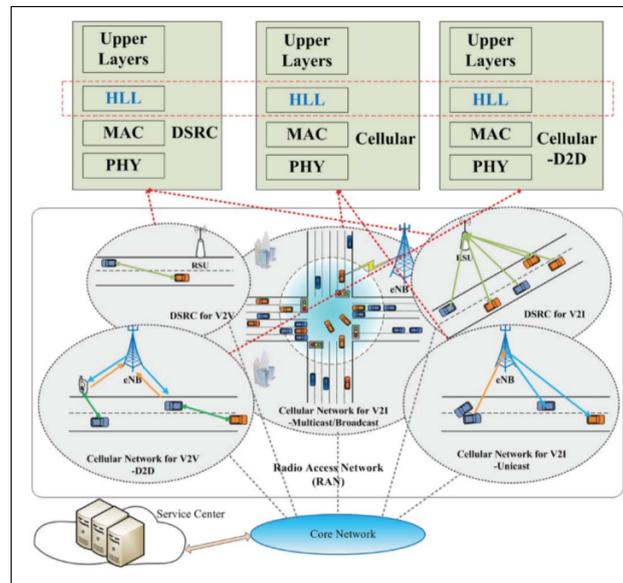
De forma que um veículo ao se aproximar da interseção, ele primeiro dissemina mensagens *beacons* para formar, caso seja o veículo mais próximo, ou participar de um cluster. Após a formação do cluster, o CH encaminha CAMs para a estação base que se encarrega de disseminar as mensagens para as outras vias. Os demais CHs são responsáveis por disseminar as informações para os demais membros do cluster. O CH mantém o envio de CAMs até o seu cluster atravessar o cruzamento, por fim com a travessia completa o cluster é dissolvido e mensagens *beacons* e CAMs não são mais transmitidas.

A arquitetura HetVCAR também utiliza cada tecnologia de comunicação com uma determinada finalidade, porém foi desenvolvida para ambientes de *highways* e não de cruzamentos.

Zheng et al. (2015) sugeriu uma arquitetura inicial para HetVNets e suas possíveis tecnologias de comunicação. Uma rede veicular heterogênea é composta por três componentes principais, chamados *Radio Access Network* (RAN), *Core Network* (CN), e *Service Center* (SC), conforme a Figura 14. Provedores de serviços (SC) fornecem uma variedade de serviços veiculares através do SC. A CN é um componente chave das HetVNETs, pois provê importantes funções, como agregação, autenticação, *switching*, etc.

O principal desafio de uma rede veicular heterogênea é dar suporte dinâmico e instantâneo a diferentes composições de redes e permitir utilização de rádio de maneira eficiente e flexível. Para este fim, na arquitetura proposta em (ZHENG *et al.*, 2015) foi apresentada uma nova camada chamada *Heterogeneous Link Layer* (HLL) que opera acima da camada MAC em cada RAN, como pode ser visto na Figura 14.

A camada HLL permite um processamento unificado oferecendo uma interface unificada, que pode se adaptar a diversas técnicas de acesso, para as camadas superiores. Os

**Figura 14 – Arquitetura HetVNET**

Fonte: (ZHENG *et al.*, 2015)

principais objetivos da camada HLL são fornecer um gerenciamento global de recursos de rede, e garantir os requisitos de QoS dos serviços facilitando a coordenação entre as várias interfaces de rede.

O Quadro 4 resume os trabalhos descritos, enfatizando a diferença entre eles e a proposta deste trabalho. Cada coluna do Quadro 4 especifica as características dos trabalhos: *Contexto* apresenta o ambiente de rede em que cada trabalho aborda, enquanto *Foco* é a tarefa realizada pelo trabalho.

**Quadro 4 – Trabalhos Relacionados**

Referência	Contexto	Foco
Zheng et al. (2015)	Redes Celulares e DSRC	Suporte a redes heterogêneas
Sadek et al. (2015)	DSRC e WiFi	Suporte a entrega de serviços
Ucar et al. (2016)	IEEE 802.11p e Cellular	Economia de recursos de rede
Tung et al. (2013)	DSRC e LTE	Prevenção de colisões em interseções
Rémy et al. (2012)	IEEE 802.11p e 3GPP LTE	Gerência de tráfego
Nikolovski et al. (2017)	DSRC	Prevenção de colisão de pacotes
Inacio et al. (2017)	DSRC e DTN	Distribuição de conteúdo
Arquitetura proposta	DSRC e LTE	Suporte a serviços veiculares

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Este Capítulo apresenta as simulações realizadas para avaliar o protótipo inicial da arquitetura. A performance do mecanismo proposto foi comparado com duas abordagens de comunicação em VANETs: DSRC e LTE. As simulações foram realizadas utilizando o *Network Simulator* (NS-3, versão 3.26)<sup>1</sup> com auxílio do *Simulation of Urban Mobility* (SUMO)<sup>2</sup> para geração de mobilidade realística de veículos.

### 5.1 CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO

Os experimentos foram realizados utilizando uma topologia de rodovia de mão dupla composta de duas faixas cada, o comprimento da via foi de 5km. A inserção de veículos na via foi feita baseada em um processo de Poisson e o tempo total para cada simulação foi de 300 segundos.

Foram definidas duas classes de veículos com diferentes faixas de velocidade máxima, de forma que o cenário simulado fosse mais realista com veículos distintos na via, como carros, motocicletas, ônibus e caminhões. A primeira classe de veículos possui velocidade máxima de 10m/s. Já a segunda classe possui velocidades máximas entre 10m/s a 30m/s.

O cenário possui uma estação base LTE com cobertura de todo o cenário, ou seja, todos os veículos são capazes de utilizar a tecnologia LTE. Além disso, cada veículo possui a interface DSRC com raio de transmissão de 300m. Outras informações das simulações realizadas são apresentadas no Quadro 5.

**Quadro 5 – Parâmetros da simulação**

Parâmetro	Configuração
Tipo	Rodovia de mão dupla com duas faixas
Comprimento	5km
Velocidade máxima	variando entre 10m/s a 30m/s
Cobertura de transmissão DSRC	300m
Cobertura de transmissão LTE	5km
Modelo de propagação	Nakagami
Modelo de Mobilidade	carFollowing-Krauss (SUMO standart)
Tempo de simulação	300s
Número de simulações	33
Intervalo de confiança	95%

Fonte: Elaborado pelo autor

<sup>1</sup> <https://www.nsnam.org/>

<sup>2</sup> <http://sumo.dlr.de/>

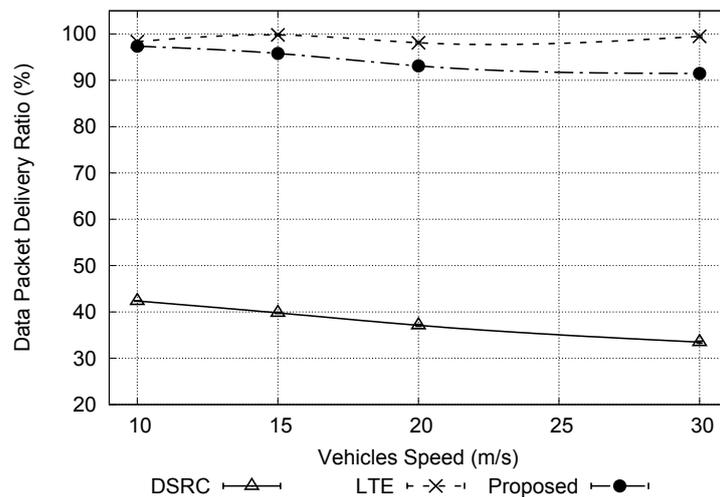
## 5.2 RESULTADOS

A performance do mecanismo foi comparado com abordagens utilizando somente a interface DSRC chamada de DSRC-only e utilizando somente a interface LTE chamada de LTE-only. Os resultados são ilustrados nas figuras 15, 16, 17 e 18, onde foram avaliadas as seguintes métricas:

- *Data Packet Delivery Ratio* (DPDR): corresponde a porcentagem de pacotes entregues com sucesso para outros veículos no cenário.
- *Average Delay* (Atraso Médio): corresponde a média do atraso dos pacotes enviados de um veículo de origem para os demais veículos no cenário.

A Figura 15 apresenta a informação de DPDR quando diferentes velocidades máximas são aplicadas a um número fixo de veículos. A abordagem LTE-only alcançou o melhor resultado levando em consideração a DPDR, visto que a torre LTE tem cobertura de toda a via. Portanto, quando a LTE-only é aplicada, os veículos não sofrem desconexões. Por outro lado, a abordagem DSRC-only tem a pior performance visto que seu pequeno alcance de comunicação causa constantes desconexões.

**Figura 15 – DPDR de 30 veículos com diferentes velocidades máximas**

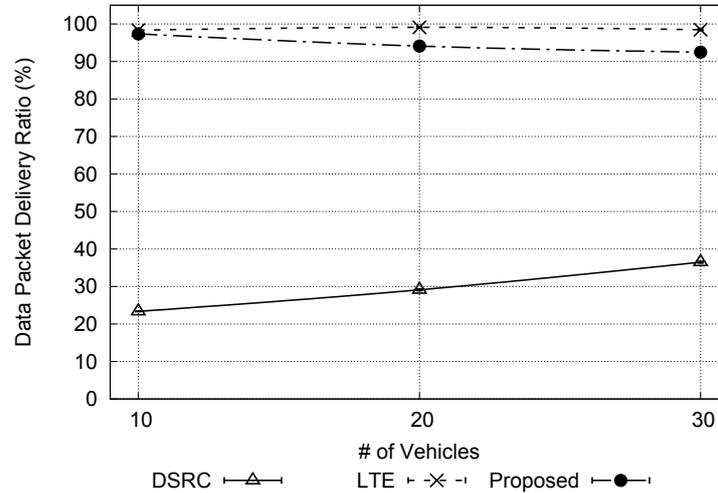


Fonte: Elaborado pelo autor

O Mecanismo proposto neste trabalho alcançou um desempenho superior a 90% em todos os casos testados para diferentes velocidades máximas. O mecanismo utiliza a alta cobertura da rede LTE para disseminar pacotes de dados através da via (através dos CHs selecionados pelo algoritmo de clusterização), enquanto suporta troca de pacotes de dados

localmente com baixa latência utilizando a interface DSRC.

**Figura 16 – DPDR com diferentes números de veículos**



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 16 ilustra os resultados de DPDR quando diferentes números de veículos estão simultaneamente na rodovia. O desempenho da DSRC-only é comprometida quando poucos veículos circulam na via, devido as constantes desconexões. Entretanto quando o número de veículos cresce, a sua performance melhora. Porém, ainda sofre de problemas de *broadcast storm*.

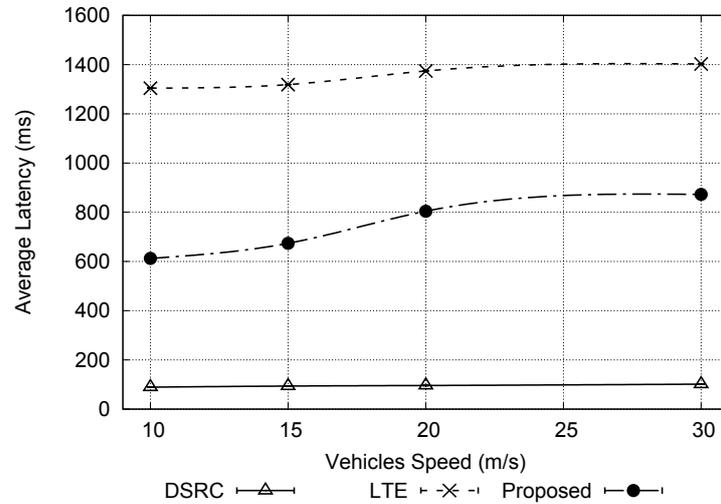
Além disso, é possível observar na Figura 16 que a abordagem proposta e a LTE-only aprimoram o desempenho da rede como um todo, resultando em uma alta DPDR, ao contrário da abordagem DSRC-only para qualquer quantidade de veículos simuladas. Este fato ocorre em virtude da cobertura fornecida pela tecnologia LTE.

A Figura 17 e a Figura 18 apresentam o atraso médio com diferentes velocidades máximas e diferentes número de veículos, respectivamente.

Podemos notar que a abordagem LTE-only tem maiores atrasos, uma vez que os pacotes de dados precisam passar por toda a infraestrutura LTE para chegar aos nós desejados (veículos destino). Em contrapartida, nossa proposta restringe o uso da interface LTE somente para os CHs, como consequência o *overhead* introduzido pelo LTE é reduzido. Já a abordagem DSRC-only possui o menor atraso comparado com as demais, devido a sua natureza de comunicação de curto alcance.

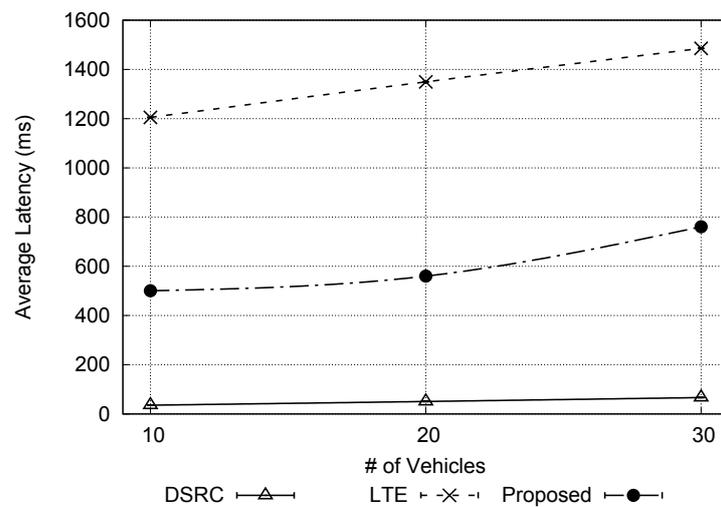
Os resultados obtidos indicam que o mecanismo proposto é capaz de aprimorar a

**Figura 17 – Atraso médio de 30 veículos com diferentes velocidades máximas**



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 18 – Atraso médio com diferentes números de veículos**



Fonte: Elaborado pelo autor

taxa de entrega de pacotes (DPDR) das HetVNs. Nossa proposta alcançou o equilíbrio mais adequado entre a DPDR e o atraso médio quando comparado com as abordagens somente LTE e DSRC. Portanto, o mecanismo conquistou altas taxas de DPDR, pelo menos 90% para todos os cenários testados e um baixo atraso, em torno de 50% menos que a LTE-only em todos os casos simulados.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Nos últimos anos, VANETs tornaram-se populares por entregar serviços através de aplicações de entretenimento e segurança. No entanto, ainda existem diversas questões em aberto, devido às dificuldades em estabelecer uma comunicação eficiente entre veículos (desconexões constantes). Para superar esse problema, a ideia tradicional de VANET está evoluindo para um cenário heterogêneo, onde mais de uma tecnologia de rede é usada pelos veículos.

Nesse contexto, este trabalho propôs a arquitetura HetVCAR para melhorar a conectividade de ambientes veiculares esparsos utilizando uma abordagem heterogênea e técnica de agrupamentos. Na arquitetura foi definido um módulo chamado *clustering*, onde pode ser inserido e adaptado qualquer algoritmo de clusterização, visto que a arquitetura não depende de um único algoritmo de clusterização.

Nas avaliações dos experimentos foi desenvolvido um mecanismo para validação da arquitetura, o mecanismo usa clusterização para melhorar o uso de recursos das tecnologias aplicadas superando abordagens existentes, tendo o equilíbrio mais adequado entre taxa de entrega e o atraso da rede. No geral, o mecanismo proposto conseguiu cerca de 50% menos atraso e no mínimo 90% de taxa de entrega em todos os cenários avaliados. Este mecanismo foi publicado na Conferência *IEEE Symposium on Computers and Communications 2018 (ISCC 2018)* com Qualis A2.

Como trabalho futuro, novos algoritmos de agrupamentos que leve em consideração as características de ambientes veiculares heterogêneos podem ser desenvolvidos e comparados com os já implementados. Novos cenários podem ser elaborados para novos testes. Além disso, podem ser propostos novos módulos que complementem a arquitetura, como um novo módulo de segurança da informação.

## REFERÊNCIAS

- ALI-YAHIYA, T. **Understanding LTE and its Performance**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.
- ALMALAG, M. C. W. M. S.; OLARIU, S. Mac protocols for vanet. In: BASAGNI, S.; CONTI, M.; GIORDANO, S.; STOJMENOVIC, I. (Ed.). **Mobile Ad Hoc networking: the cutting edge directions**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. v. 35, cap. 17.
- ALVES, R.; CAMPBELL, I.; COUTO, R.; CAMPISTA, M.; MORAES, I.; RUBINSTEIN, M.; COSTA, L.; DUARTE, O.; ABDALLA, M. Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. **Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, SBRC**, 2009.
- ARANITI, G.; CAMPOLO, C.; CONDOLUCI, M.; IERA, A.; MOLINARO, A. Lte for vehicular networking: a survey. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 51, n. 5, p. 148–157, 2013.
- ATAT, R.; YAACOUB, E.; ALOUINI, M.-S.; FILALI, F. Delay efficient cooperation in public safety vehicular networks using lte and ieee 802.11 p. In: IEEE. **Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2012 IEEE**. [S.l.], 2012. p. 316–320.
- BALDESSARI, R.; BÖDEKKER, B.; DEEGENER, M.; FESTAG, A.; FRANZ, W.; KELLUM, C. C.; KOSCH, T.; KOVACS, A.; LENARDI, M.; MENIG, C. *et al.* Car-2-car communication consortium-manifesto. 2007.
- BRAIN, M.; GRABIANOWSKI, E. **How WiMAX Works**. 2004. Acessado em: 26/07/2017. Disponível em: <<http://computer.howstuffworks.com/wimax1.htm>>.
- CAMP, T.; BOLENG, J.; DAVIES, V. A survey of mobility models for ad hoc network research. **Wireless communications and mobile computing**, Wiley Online Library, v. 2, n. 5, p. 483–502, 2002.
- CAMPBELL, T.; LIU, M.; KULIS, B.; HOW, J. P.; CARIN, L. Dynamic clustering via asymptotics of the dependent dirichlet process mixture. In: **Advances in Neural Information Processing Systems 26**. [S.l.: s.n.], 2013.
- CAVALCANTI, E. R.; SOUZA, J. A. R. de; SPOHN, M. A.; GOMES, R. C. d. M.; COSTA, A. F. B. F. d. Vanets' research over the past decade: overview, credibility, and trends. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, ACM, v. 48, n. 2, p. 31–39, 2018.
- CUNHA, F. D. D.; VILAS, L. A.; VIANA, A. C.; LOUREIRO, A. A. F. **Data Communication in VANETs: A Survey, Challenges and Applications**. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://hal.inria.fr/hal-00926959>>.
- DAR, K.; BAKHOUYA, M.; GABER, J.; WACK, M.; LORENZ, P. Wireless communication technologies for its applications [topics in automotive networking]. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 48, n. 5, p. 156–162, 2010.
- FCC. **The FCC DSRC web site**. 2013. Acessado em: 04/07/2017. Disponível em: <<http://wireless.fcc.gov/services/its/dsrc/>>.
- GIMENEZ, L. C.; MICHAELSEN, P. H.; PEDERSEN, K. I. Analysis of data interruption in an lte highway scenario with dual connectivity. In: IEEE. **Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2016 IEEE 83rd**. [S.l.], 2016. p. 1–5.

INÁCIO, D.; SENNA, C.; SARGENTO, S. Content distribution in vehicular networks through information filtering. In: IEEE. **Computers and Communications (ISCC), 2017 IEEE Symposium on**. [S.l.], 2017. p. 390–397.

IRSHAD, W.; CHAUDHRY, S. A. Future generations of mobile communication networks. **Academy of Contemporary Research**, p. 15, 2013.

JIANG, D.; DELGROSSI, L. Ieee 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments. In: IEEE. **Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE**. [S.l.], 2008. p. 2036–2040.

KENNEY, J. B. Dedicated short-range communications (dsrc) standards in the united states. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 99, n. 7, p. 1162–1182, 2011.

KIHL, M.; BÜR, K.; MAHANTA, P.; COELINGH, E. 3gpp lte downlink scheduling strategies in vehicle-to-infrastructure communications for traffic safety applications. In: IEEE. **Computers and Communications (ISCC), 2012 IEEE Symposium on**. [S.l.], 2012. p. 000448–000453.

KOROWAJCZUK, L. **LTE, WiMAX and WLAN network design, optimization and performance analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

KUMAR, S.; POORNIMA, T. A study of wireless mobile technology. **International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering**, p. 470–471, 2014.

LEHR, W.; MCKNIGHT, L. W. Wireless internet access: 3g vs. wifi? **Telecommunications Policy**, Elsevier, v. 27, n. 5, p. 351–370, 2003.

LEI, L.; LIN, C.; ZHONG, Z. Performance analysis of device-to-device communications with dynamic interference using spns. In: **Stochastic Petri Nets for Wireless Networks**. [S.l.]: Springer, 2015. p. 41–78.

LIN, D.; GRIMSON, E.; FISHER, J. W. Construction of dependent dirichlet processes based on poisson processes. In: **Advances in neural information processing systems**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1396–1404.

LING, J.; KANUGOVI, S.; MARCE, O.; VASUDEVAN, S. Performance gains of a hybrid wi-fi/lte architecture. In: IEEE. **Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2015 IEEE 81st**. [S.l.], 2015. p. 1–6.

MAIA, A. M. **Um Mecanismo para o Escalonamento de Pacotes no Uplink da Rede LTE no Contexto da Comunicação Máquina-A-Máquina**. 2013. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Departamento de Computação.

MOUSTAFA, H.; ZHANG, Y. **Vehicular networks: techniques, standards, and applications**. [S.l.]: Auerbach publications, 2009.

NIKOLOVSKI, T.; PAZZI, R. W.; AKABANE, A. T.; VILLAS, L. A. Efficient encounter-based event dissemination protocol (e-bed) for urban and highway vehicular ad hoc networks. In: IEEE. **Computers and Communications (ISCC), 2017 IEEE Symposium on**. [S.l.], 2017. p. 1085–1090.

OU, S.; LEI, L.; ZHENG, K.; LI, Y. Stochastic delay analysis of an architecture integrating vanet with lte networks. In: IEEE. **Computing, Networking and Communications (ICNC), 2015 International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 298–302.

PERDANA, D.; MUNADI, R.; MANURUNG, R. C. Performance evaluation of gauss-markov mobility model in hybrid lte-vanet networks. **Telkonnika**, v. 15, n. 2, 2017.

REMY, G.; SENOUCI, S.-M.; JAN, F.; GOURHANT, Y. Lte4v2x: Lte for a centralized vanet organization. In: IEEE. **Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), 2011 IEEE**. [S.l.], 2011. p. 1–6.

RÉMY, G.; SENOUCI, S.-M.; JAN, F.; GOURHANT, Y. Lte4v2x—collection, dissemination and multi-hop forwarding. In: IEEE. **Communications (ICC), 2012 IEEE International Conference on**. [S.l.], 2012. p. 120–125.

SADEK, N. M.; HALAWA, H. H.; DAOUD, R. M.; AMER, H. H.; ALI, N. A. Heterogeneous lte/wi-fi architecture for its traffic control and infotainment. In: IEEE. **Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS), 2015 International Conference on**. [S.l.], 2015. p. 1–6.

SCHMIDT-EISENLOHR, F.; TORRENT-MORENO, M.; MITTAG, T.; HARTENSTEIN, H. Simulation platform for inter-vehicle communications and analysis of periodic information exchange. In: IEEE. **Wireless on Demand Network Systems and Services, 2007. WONS'07. Fourth Annual Conference on**. [S.l.], 2007. p. 50–58.

SEZIA, S.; BAKER, M.; TOUFIK, I. **LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011.

SHARMA, P. Evolution of mobile wireless communication networks-1g to 5g as well as future prospective of next generation communication network. **International Journal of Computer Science and Mobile Computing**, v. 2, n. 8, p. 47–53, 2013.

SHUKLA, S.; KHARE, V.; GARG, S.; SHARMA, P. Comparative study of 1g, 2g, 3g and 4g. **Journal of Engineering, Computers & Applied Sciences**, v. 2, n. 4, p. 55–63, 2013.

TALIWAL, V.; JIANG, D.; MANGOLD, H.; CHEN, C.; SENGUPTA, R. Empirical determination of channel characteristics for ds-ss vehicle-to-vehicle communication. In: ACM. **Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks**. [S.l.], 2004. p. 88–88.

TUNG, L.-C.; MENA, J.; GERLA, M.; SOMMER, C. A cluster based architecture for intersection collision avoidance using heterogeneous networks. In: IEEE. **Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET), 2013 12th Annual Mediterranean**. [S.l.], 2013. p. 82–88.

UCAR, S.; ERGEN, S. C.; OZKASAP, O. Multihop-cluster-based ieee 802.11 p and lte hybrid architecture for vanet safety message dissemination. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 65, n. 4, p. 2621–2636, 2016.

VIEIRA, A. S. S. **Uma Aplicação de Auxílio à Mudanças de Faixa em Redes Veiculares**. 2010. Graduação - Universidade Estadual do Ceará, UECE.

VILARDEBÓ, P. L. B. **Investigation on vehicular ad hoc networks: 802.11p vs LTE architecture**. 2016. Graduação - Faculty of Electrical Engineering and Information Technology of Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

VINEL, A. 3gpp lte versus ieee 802.11 p/wave: Which technology is able to support cooperative vehicular safety applications? **IEEE Wireless Communications Letters**, IEEE, v. 1, n. 2, p. 125–128, 2012.

WU, Y.; YUAN, H.; CHEN, H.; LI, J. A study on reaction time distribution of group drivers at car-following. In: IEEE. **Intelligent Computation Technology and Automation, 2009. ICICTA'09. Second International Conference on.** [S.l.], 2009. v. 3, p. 452–455.

YOUSEFI, S.; MOUSAVI, M. S.; FATHY, M. Vehicular ad hoc networks (vanets): challenges and perspectives. In: IEEE. **ITS Telecommunications Proceedings, 2006 6th International Conference on.** [S.l.], 2006. p. 761–766.

ZHENG, K.; ZHENG, Q.; CHATZIMISIOS, P.; XIANG, W.; ZHOU, Y. Heterogeneous vehicular networking: a survey on architecture, challenges, and solutions. **IEEE communications surveys & tutorials**, IEEE, v. 17, n. 4, p. 2377–2396, 2015.