

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

Um estudo sobre as aplicações da tecnologia 5G em redes veiculares

Arthur Boechat Mazzi

JUIZ DE FORA
FEVEREIRO, 2022

Um estudo sobre as aplicações da tecnologia 5G em redes veiculares

ARTHUR BOECHAT MAZZI

Universidade Federal de Juiz de Fora
Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação
Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador: Luciano Jerez Chaves

JUIZ DE FORA
FEVEREIRO, 2022

UM ESTUDO SOBRE AS APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA 5G EM REDES VEICULARES

Arthur Boechat Mazzi

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Luciano Jerez Chaves
Doutor em Ciência da Computação

Edelberto Franco Silva
Doutor em Ciência da Computação

Luciana Conceição Dias Campos
Doutora em Engenharia Elétrica

JUIZ DE FORA
18 DE FEVEREIRO, 2022

Resumo

As redes 5G se destacam em relação às anteriores em múltiplos aspectos, principalmente na velocidade, estabilidade e confiabilidade. Em paralelo, as redes veiculares vêm sendo amplamente utilizadas nos contextos de segurança, otimização e também no desenvolvimento sustentável das cidades inteligentes. Neste trabalho abordamos as aplicações da tecnologia 5G em redes veiculares. Para isso, apresentamos um comparativo do 5G as com gerações anteriores, destacando os principais diferenciais que favorecem a utilização dessa nova tecnologia no contexto das redes veiculares. Além disso, analisamos algumas ferramentas de simulação que são comumente utilizadas para a validação rápida de novas propostas nesta área. Por fim, ilustramos esta integração através de uma simulação de exemplo que envolve uma rede veicular com comunicação 5G.

Palavras-chave: Redes veiculares, redes móveis, redes 5G, softwares para simulação.

Abstract

5G networks stand out from the previous ones in multiple aspects, mainly speed, stability, and reliability. In parallel, vehicular networks have been widely used in security, optimization, and the sustainable development of smart cities. In this work, we approach the applications of 5G technology in vehicular networks. In order to do that, we present a comparison of 5G with previous generations, highlighting the main differentials that favor the use of this new technology in the context of vehicular networks. In addition, we analyze some simulation tools that are commonly used for the fast validation of new proposals in this area. Finally, we illustrate this integration through an example simulation involving a vehicular network with 5G communication.

Keywords: Vehicular networks, mobile networks, 5G networks, simulation software.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, pela minha vida e possibilidade de estar cursando a faculdade.

Agradeço aos meus pais pelo apoio e incentivo em cada etapa concluída, sempre dispostos a ajudar no que for preciso.

Agradeço ao meu irmão, Felipe, pelo tempo que estudamos juntos na UFJF, pela parceria de sempre e contribuição para a minha formação.

Agradeço à minha namorada, Bruna, pelo companheirismo e compreensão durante essa trajetória, participando de cada conquista e me mantendo sempre motivado.

Agradeço ao meu amigo que posso chamar de irmão, Gustavo, por sempre estar presente nessa amizade de tantos anos.

Agradeço ao meu orientador, Luciano Chaves, pela mentoria, paciência, passagem de conhecimento e amizade que desenvolvemos.

Por fim, agradeço aos professores, colegas e funcionários da UFJF por serem parte de tudo isso.

Conteúdo

Lista de Figuras	5
Lista de Tabelas	6
Lista de Abreviações	7
1 Introdução	8
2 Fundamentação teórica	11
2.1 Redes veiculares	11
2.2 Redes móveis de telecomunicação	14
3 Revisão da literatura	20
3.1 Redes veiculares e suas aplicações	20
3.2 Comunicação veicular 5G	22
3.3 Ferramentas e simuladores	23
4 Redes veiculares e a tecnologia 5G	25
4.1 Protocolos para comunicação sem fio	25
4.2 Fatiamento da rede 5G	31
4.3 Desafios e perspectivas futuras	34
5 Ferramentas de software para avaliação	35
5.1 Simuladores de rede	35
5.2 Simuladores de mobilidade	37
5.3 Simuladores de redes veiculares	38
5.4 Suporte às tecnologias emergentes	40
5.5 Exemplo prático	41
6 Conclusão	44
Bibliografia	46

Lista de Figuras

1.1	Comparação ilustrativa entre as redes 4G e 5G	9
2.1	Categorias básicas de comunicação em VANETs	11
2.2	Comunicação V2X entre veículos e qualquer coisa	12
2.3	Aplicações de redes veiculares	14
2.4	Diferentes casos de uso da tecnologia 5G	17
2.5	Disponibilidade de redes 5G no mundo	18
2.6	Suporte às de redes 5G no mundo	18
4.1	Pilha de protocolos WAVE	26
4.2	Arquitetura do NR-V2X	28
4.3	Comunicação DSRC, C-V2X e heterogênea	29
4.4	Múltiplos protocolos de comunicação em VANETs	30
4.5	Fatiamento da rede lógica no 5G	31
4.6	Exemplo de fatiamento da rede	32
4.7	Fatiamento de rede veicular	33
5.1	Funcionalidades suportadas pelo Simu5G	36
5.2	Interface de navegação do OpenStreetMap	38
5.3	Arquitetura do Veins	39
5.4	Mapa da simulação no SUMO	42
5.5	Simulação em execução no OMNeT++	43

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa entre as gerações de rede móveis	19
4.1	Comparativo entre protocolos de comunicação	31
5.1	Comparativo entre os simuladores de redes veiculares	40
5.2	Suporte dos simuladores veiculares às tecnologias emergentes	40

Lista de Abreviações

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
C-V2X	<i>Cellular V2X</i>
D2D	<i>Device-to-Device</i>
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communication</i>
eNB	<i>Enhanced Node B</i>
eV2X	<i>Enhanced V2X</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
NR	<i>New Radio</i>
RSU	<i>Road-Side Unit</i>
SDN	<i>Software Defined Networking</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle to Everything</i>
VANET	<i>Vehicular Network</i>
VLC	<i>Visible light communication</i>
WAVE	<i>Wireless Access Vehicular Environment</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
WSMP	<i>Wave Short-Message Protocol</i>

1 Introdução

As redes de telecomunicação estão em constante evolução, incorporando novas tecnologias para atender às necessidades das aplicações que demandam cada vez mais qualidade de serviço. No contexto das redes móveis, as tecnologias de quarta geração (4G) (RANA; KUMAR; RANA, 2021) são as mais utilizadas no momento, oferecendo acesso de banda larga móvel capaz de viabilizar serviços com requisitos elevados, como é o caso do *streaming* de vídeo.

A grande maioria dos dispositivos móveis conectados às redes 4G são *smartphones*, *notebooks*, *tablets* e semelhantes. Entretanto, com a chegada da Internet das Coisas (IoT, do Inglês *Internet of Things*) (DING et al., 2020) e sua aplicação direta na construção das cidades inteligentes, novos dispositivos estão se conectando à Internet, como os eletrodomésticos, sistemas de iluminação, sistemas de segurança, câmeras, veículos, entre muitos outros. Esse aumento no número de dispositivos associado ao requisito cada vez mais restrito das aplicações resultam em nova demanda que as redes móveis terão que atender no futuro próximo.

A quinta geração (5G) (NOOHANI; MAGSI, 2020) de tecnologias para as redes móveis surge como uma solução promissora para esse novo cenário, com evolução significativa na velocidade das conexões, no suporte ao grande número de dispositivos e na baixa latência da comunicação. Espera-se que o 5G seja utilizado nos mais variados sistemas inteligentes, como redes de saúde, entretenimento e também nas redes que são o foco deste trabalho: as redes veiculares.

Uma rede veicular pode ser definida como uma rede de comunicação em que os elementos da rede estão relacionados ao contexto de um cenário veicular: carros, motos, pedestres, semáforos, radares, entre outros. As aplicações que surgem nesse contexto podem ter muita utilidade no dia a dia das pessoas, principalmente em áreas de saúde e segurança, viabilizando respostas mais rápidas no atendimento de acidentes de trânsito e alertas de perigo nas vias.

Os desafios técnicos que as redes veiculares impõem às tecnologias de comunicação

normalmente incluem a estabilidade da conexão, a qualidade da transmissão sem fio, a cobertura sem pontos cegos, a grande quantidade de dispositivos conectados e também o baixo tempo de resposta. Este último requisito é fundamental para viabilizar aplicações mais sensíveis, como aquelas destinadas à detecção de colisão.

No atual momento de transição entre o 4G e o 5G, muitas redes veiculares ainda utilizam tecnologias 4G em suas implementações e, por isso, encaram desafios devido à limitações intrínsecas destas redes. Dentre os principais problemas podemos destacar o atraso significativo na comunicação sem fio e também a baixa capacidade relacionada ao número de dispositivos ativos por célula da rede. Por sua vez, o 5G promete superar esses desafios, viabilizando a construção de redes veiculares eficientes e permitindo a comunicação com qualidade entre todos os elementos. A Figura 1.1 ilustra as principais diferenças nas características e aplicações das redes 4G e 5G, com destaque para o aumento significativo do número de células nas redes 5G.

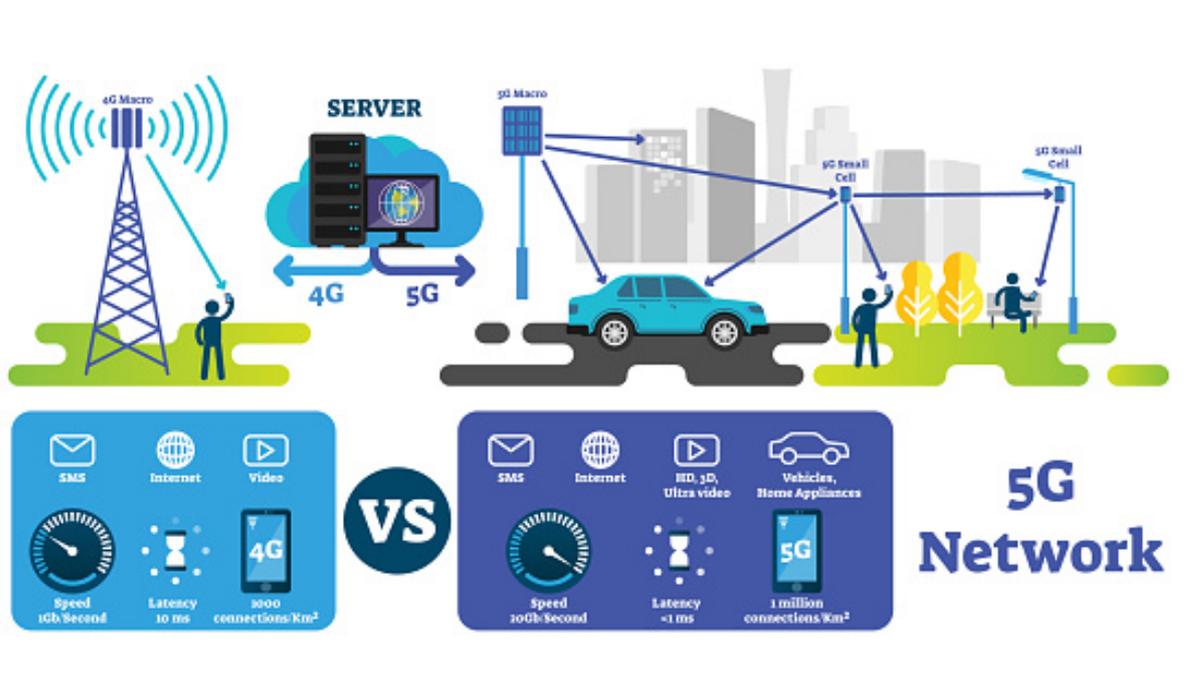


Figura 1.1: Comparação ilustrativa entre as redes 4G e 5G (WEBB, 2020).

As redes veiculares podem viabilizar uma quantidade significativa de aplicações, mudando significativamente o modo como o tráfego de veículos é gerenciado numa cidade inteligente. Com elas é possível otimizar rotas de motoristas, trazer mais segurança para pedestres e garantir um serviço de atendimento móvel de urgência que seja rápido e eficiente. Esses exemplos reforçam a importância de se estudar e buscar alternativas para

as limitações atuais das redes veiculares através da adoção de novas tecnologias. Entretanto, um dos fatores que atrasam a evolução destas redes está relacionado à dificuldade de se realizar experimentos reais, pois os mesmos são complexos e custosos devido à infraestrutura necessária. Nesse contexto, o uso de ferramentas de *software* para a simulação de redes veiculares mostra-se uma alternativa atrativa.

O objetivo deste trabalho é, portanto, realizar um estudo sobre as aplicações da tecnologia 5G no contexto das redes veiculares, apresentando seus avanços em relação às gerações anteriores de redes móveis. Além disso, esse trabalho objetiva listar as principais ferramentas de *software* utilizadas para simulação de redes veiculares, acompanhadas de um pequeno exemplo prático ilustrando o uso de algumas destas ferramentas.

Para alcançar os objetivos propostos, o restante deste documento está organizado como segue. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação básica pra a compreensão deste trabalho: as redes veiculares e as redes móveis de telecomunicação. O Capítulo 3 revisa a literatura em três frentes: redes veiculares e suas aplicações; comunicação veicular com o uso de tecnologias 5G; e ferramentas de *software* para simulação. Os detalhes envolvendo a utilização do 5G nas redes veiculares são descritos no Capítulo 4. Na sequência, o Capítulo 5 apresenta e compara as principais ferramentas de simulação disponíveis para a avaliação de novas propostas nestas redes. Este capítulo também apresenta um exemplo prático utilizando algumas das ferramentas citadas. Por fim, o Capítulo 6 encerra este trabalho com as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2 Fundamentação teórica

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre os principais tópicos abordados neste trabalho: as redes veiculares (Seção 2.1) e as redes móveis de telecomunicação (Seção 2.2). A integração entre essas duas áreas é o principal foco deste trabalho, por isso é importante compreendê-las separadamente primeiro.

2.1 Redes veiculares

Uma rede veicular (VANET, do Inglês *Vehicle Network*) pode ser definida como uma rede de comunicação criada de forma descentralizada em que veículos e outros dispositivos de comunicação trocam informações entre si utilizando tecnologia sem fio (TOMAR; PRATEEK; SASTRY, 2016).

Do ponto de vista técnico, as estratégias para comunicação sem fio em uma VANET são organizadas em três categorias básicas, como ilustrado na Figura 2.1:

1. Comunicação veículo para veículo (V2V, do Inglês *Vehicle to Vehicle*), também chamado de modo *ad hoc*, onde os veículos se organizam de maneira distribuída para trocar informações entre si;

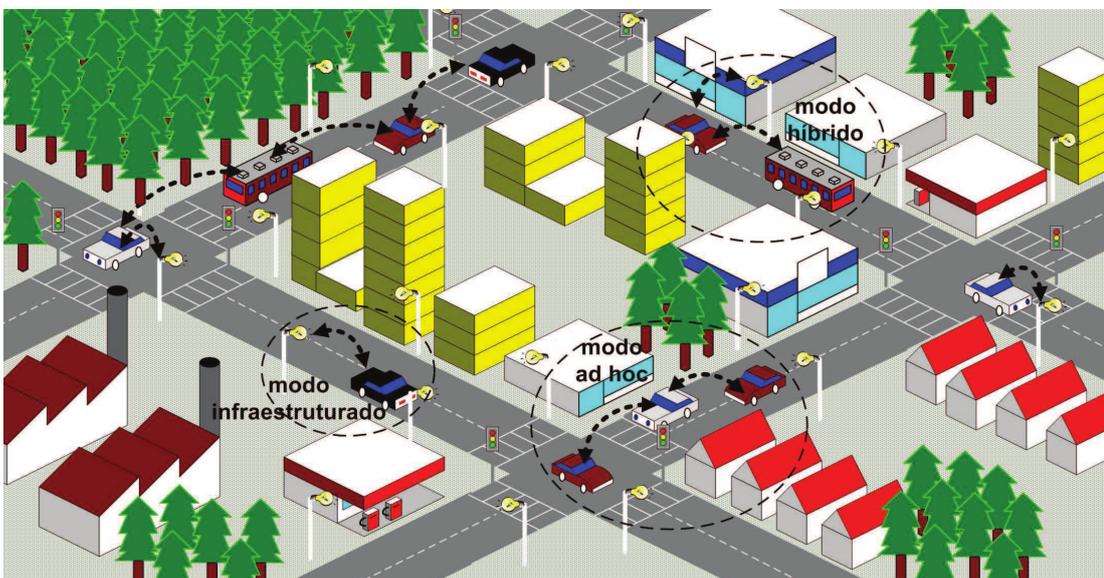


Figura 2.1: Categorias básicas de comunicação em VANETs (ALVES et al., 2009).

2. Comunicação veículo para infraestrutura (V2I, do Inglês *Vehicle to Infrastructure*), também chamado de modo infraestruturado, onde os veículos interagem diretamente com as unidades de rede que estão instaladas nas margens das rodovias (RSU, do Inglês *Road-Side Unit*);
3. Comunicação veículo para qualquer coisa (V2X, do Inglês *Vehicle to Everything*), também chamado de modo híbrido, que contempla os dois casos anteriores mas também inclui inúmeras novas possibilidades de comunicação como, por exemplo, veículo para pedestres, veículo para casas inteligentes, etc. A Figura 2.2 ilustra a comunicação V2X entre veículos e qualquer coisa.

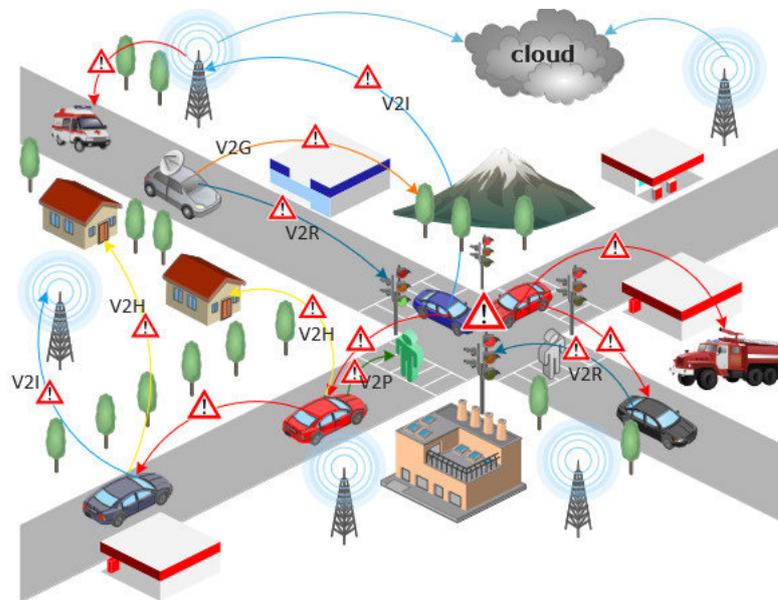


Figura 2.2: Comunicação V2X entre veículos e qualquer coisa (NADJET et al., 2021).

Já do ponto de vista das aplicações, as possibilidades são inúmeras. Neste contexto, a comunicação V2X é um componente essencial para viabilizar os sistemas de transporte inteligentes, facilitando a integração entre câmeras, antenas, pedestres, veículos e outros dispositivos (YANG; HUA, 2019).

Podemos dividir as aplicações de VANETs em três categorias principais: segurança, conveniência e entretenimento. As aplicações em segurança são as que ganham maior destaque, pois tem foco na prevenção de acidentes de trânsito e em salvar vidas. Nessa categoria de aplicações, a rede pode alertar os motoristas próximos dos riscos nas vias: clima desfavorável, pista molhada, risco de derrapagem, dentre outras. Além disso,

a rede pode detectar acidentes de trânsito de modo automático, fazendo com que os veículos comuniquem uns com os outros e também com a infraestrutura para acionar imediatamente os serviços de emergência (polícia e bombeiros, por exemplo), além de propagar a informação sobre o evento para outros veículos nas proximidades.

Na categoria de conveniência estão as aplicações que podem contribuir para melhorar a qualidade dos sistemas de transporte inteligentes. Essas aplicações podem ter foco na solução de problemas de congestionamento e poluição, reduzir o tempo dos usuários no trânsito, otimizar rotas, ajustar temporização de semáforos, etc. Aplicações de assistência ao motorista também podem ser incluídas nessa categoria, como aquelas que notificam sobre vagas de estacionamento nas proximidades e auxiliam os condutores nos cruzamentos de vias movimentadas.

Por fim, a categoria de aplicações de entretenimento envolve aquelas em que há troca de informações entre os veículos para descontração dos passageiros como, por exemplo, acesso à Internet, compartilhamento de músicas, vídeos e mensagens instantâneas, jogos *online*, video-chamadas, etc.

Para viabilizar as inúmeras aplicações de VANETs é necessária uma arquitetura capaz de coletar, tratar e analisar os dados trocados entre os veículos. A Figura 2.3 ilustra uma arquitetura genérica nesta direção. Na base do esquema proposto estão os nós da rede: veículos, antenas de comunicação sem fio, câmeras de segurança, sensores e diversos tipos de dispositivos móveis. Logo acima está especificado o tipo de ferramenta ou tecnologia utilizada nesses nós, que podem ser conversores, captadores de imagens, velocímetros, hodômetros, receptores do sistema de posicionamento global (GPS, do Inglês *Global Positioning System*), etc. No centro da figura é possível visualizar algumas das entidades da rede bem definidas no contexto de VANETs, como é o caso de veículos, câmeras e sensores. Todas estas entidades possuem informações específicas vinculadas a elas. Por fim, na parte superior, está o gerenciamento dos dados coletados pelas entidades, realizado através de interfaces de programação de aplicativos (APIs, do Inglês *Application Programming Interfaces*) ou outras ferramentas para análise de dados, de acordo com cada contexto. Na figura, temos como exemplos aplicações de otimização e segurança, que são muito comuns e importante na área de sistemas de transportes inteligentes.



Figura 2.3: Aplicações de redes veiculares.

A evolução das redes veiculares e suas aplicações são diretamente dependentes da evolução das redes de telecomunicação móvel, visto que é necessária uma estrutura com boa confiabilidade, estabilidade e alcance para que uma rede veicular seja sustentável e segura. No passado, era difícil imaginar um cenário com veículos conectados, tanto pelas limitações das redes móveis quanto pela tecnologia disponível nos veículos. Com a evolução das tecnologias em direção ao 4G, os estudos no campo de redes veiculares se intensificaram, despertando interesse da indústria e da academia. Atualmente estamos presenciando a transição das redes móveis 4G para o 5G, gerando uma expectativa significativa de viabilizar e otimizar diversas das aplicações em redes veiculares.

2.2 Redes móveis de telecomunicação

Desde a criação das redes de telefonia celular no início dos anos de 1980, as arquiteturas de telecomunicação móvel estão em constante evolução para atender aos serviços e aplicações cada vez mais exigentes.

A primeira geração (1G) de redes móveis oferecia apenas comunicação de voz

analógica. Essas redes não eram padronizadas mundialmente, e o uso do espectro eletromagnético era pouco eficiente. Com o advento da tecnologia digital, logo surgiram as primeiras arquiteturas de segunda geração (2G). As redes 2G, por sua vez, ofereciam três vantagens principais em relação à predecessora: comunicação de voz digital, utilização mais eficiente do espectro eletromagnético e o suporte ao envio de mensagens curtas de texto (SMS, do Inglês *Short Message Service*).

O sucesso das redes 2G veio ao mesmo tempo em que a Internet se popularizou. Isso motivou a transição para a terceira geração (3G) das redes móveis já no início dos anos 2000. As redes 3G ofereciam recursos capazes de sustentar a navegação em páginas da Web e o acesso ao correio eletrônico, algo bastante inovador para a época. Entretanto, foi apenas com a chegada da quarta geração (4G) das redes móveis no início da década de 2010 que a transmissão de dados foi colocada em primeiro plano, com uma arquitetura totalmente baseada no protocolo da Internet (IP, do Inglês *Internet Protocol*) para acesso à Web em banda larga.

As redes 4G apresentam melhorias significativas quando comparadas à geração anterior. A velocidade de pico alcançou 1 Gbps enquanto a latência diminuiu para algumas dezenas de milissegundos. Além disso, as conexões 4G permanecem estáveis mesmo quando o usuário está em movimento e sua localização é distante das torres de transmissão, próximo à borda das células (BHANDARKAR; KAMMAR, 2016). Com isso, a utilização das redes móveis 4G nos dispositivos como *smartphones* e *tablets* foi potencializada e isto, por sua vez, viabilizou a implementação de aplicativos e serviços dependentes de conexão com alta qualidade. Como exemplos temos as chamadas de vídeos, os recursos multimídia das redes sociais e diversas outras aplicações que são comuns hoje em dia.

Neste momento estamos vivenciando a transição do 4G para a quinta geração (5G) das redes móveis. Essa nova geração foi projetada para superar as limitações da anterior e permitir novos serviços em diferentes contextos (AKYILDIZ et al., 2016). As redes 5G oferecem uma gama de soluções de acesso e conectividade que atendem às necessidades e requisitos das comunicações móveis no futuro (YANG; HUA, 2019). Como principais característica do 5G, temos o aumento da velocidade de pico para próximo de 10 Gbps, a diminuição da latência para valores menores do que 10 ms e o aumento na capacidade

de conexões simultâneas em até 100 vezes quando comparado ao 4G. Essas melhorias configuram um cenário bastante otimista e revolucionário, com expectativa de que as redes 5G possam suportar com eficiência os requisitos das redes veiculares.

Em relação ao acesso sem fio, um dos aspectos que fazem do 5G uma tecnologia superior é o amplo uso de espectro eletromagnético. Nas redes atuais, as faixas de frequência utilizadas estão, em sua maioria, entre 300 MHz e 5 GHz. Entretanto, o 5G permite que novas frequências sejam exploradas, podendo chegar até 100 GHz com o uso das ondas milimétricas. Frequências maiores aumentam a capacidade da rede, refletindo em velocidade de acesso maior e mais conexões simultâneas (LUCCA; MAURO, 2020). Como consequência direta, haverá uma densificação na quantidade de células 5G, já que frequências maiores possuem cobertura menor. As pequenas células (*small cells*) também são consideradas uma vantagem do 5G, com foco na comunicação de curto e médio alcance para aumentar a qualidade da transmissão sem fio e reduzir a sobrecarga das grandes células (*macro cells*) utilizadas atualmente.

Outra tecnologia muito importante do 5G é o uso massivo de múltiplas antenas de entradas e saída (MIMO, do Inglês *Multiple-Input Multiple-Output*). O MIMO, que já é utilizado no 4G, aumenta a capacidade da rede sem fio explorando conjuntos de antenas nas estações base e nos clientes, acelerando a troca de dados. No 5G, o MIMO é combinado com o *beamforming*, que consiste em direcionar o sinal eletromagnético na direção do dispositivo de destino, aumentando a qualidade do sinal no momento da recepção, o que diminui erros causados por interferências na transmissão.

Já na parte de núcleo da rede 5G, é notável a presença de dois paradigmas: a virtualização das funções de rede (NFV, do Inglês *Network Function Virtualization*), e as redes definidas por software (SDN, do Inglês *Software Defined Networking*). O paradigma NFV se baseia na separação das funções de rede do *hardware* que as executa. Em outras palavras, consiste na implementação das funções da rede em *software*, que serão executadas em máquinas virtuais e contêineres. Por sua vez, o SDN explora a separação entre os planos de controle e de dados dos dispositivos de rede. Com isso, consegue-se maior facilidade no gerenciamento centralizado da rede por *software*. A combinação do NFV com o SDN é de grande importância para o 5G, tornando essas redes mais flexíveis e facilitando o

gerenciamento centralizado dos recursos disponíveis.

Por fim, quando pensamos na arquitetura como um todo, um dos principais diferenciais do 5G é o fatiamento da rede (*network slicing*), viabilizado diretamente pelo conjunto das tecnologias e funcionalidades apresentadas anteriormente. O fatiamento da rede permite que a rede 5G seja dividida em fatias, sendo que cada fatia é configurada especificamente para o contexto das aplicações em execução. Isso claramente torna a rede mais flexível e eficiente em termos de compartilhamento de recursos.

A Figura 2.4 ilustra algumas das principais aplicações que serão viabilizadas pelo 5G. Como destaque, temos os casos de uso envolvendo a infraestrutura de transportes inteligentes com comunicação V2X, além de aplicações de segurança e serviços de emergência em redes veiculares. Podemos entender que cada uma dessas categorias poderia ser implementada em uma fatia distinta, com configurações específicas para atender aos requisitos das aplicações.

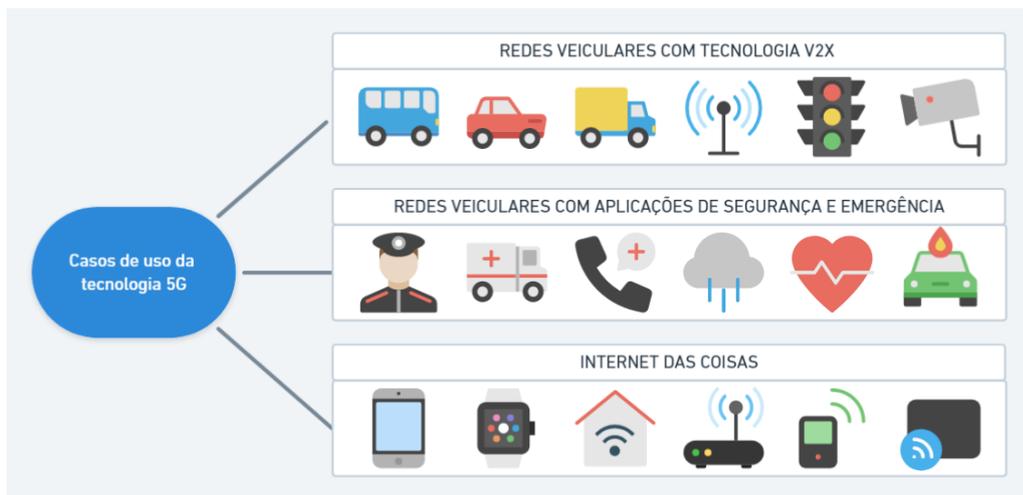


Figura 2.4: Diferentes casos de uso da tecnologia 5G.

Há de se destacar que, apesar dos inúmeros benefícios do 5G em relação ao seu antecessor, o processo de transição entre as tecnologias é incremental e lento. A Figura 2.5 mostra os países onde a tecnologia 5G tem maior disponibilidade, fazendo um comparativo com a cobertura da geração anterior. Por essa figura é possível perceber que os países mais avançados na cobertura 5G estão pouco acima de 25% de disponibilidade, o que contrasta com a alta disponibilidade das redes 4G ainda predominantes. No Brasil, a data prevista de implantação do 5G nos grandes centros urbanos é julho de 2022 e ainda não está tão avançado quanto no resto do mundo, como é possível ver na Figura 2.6.

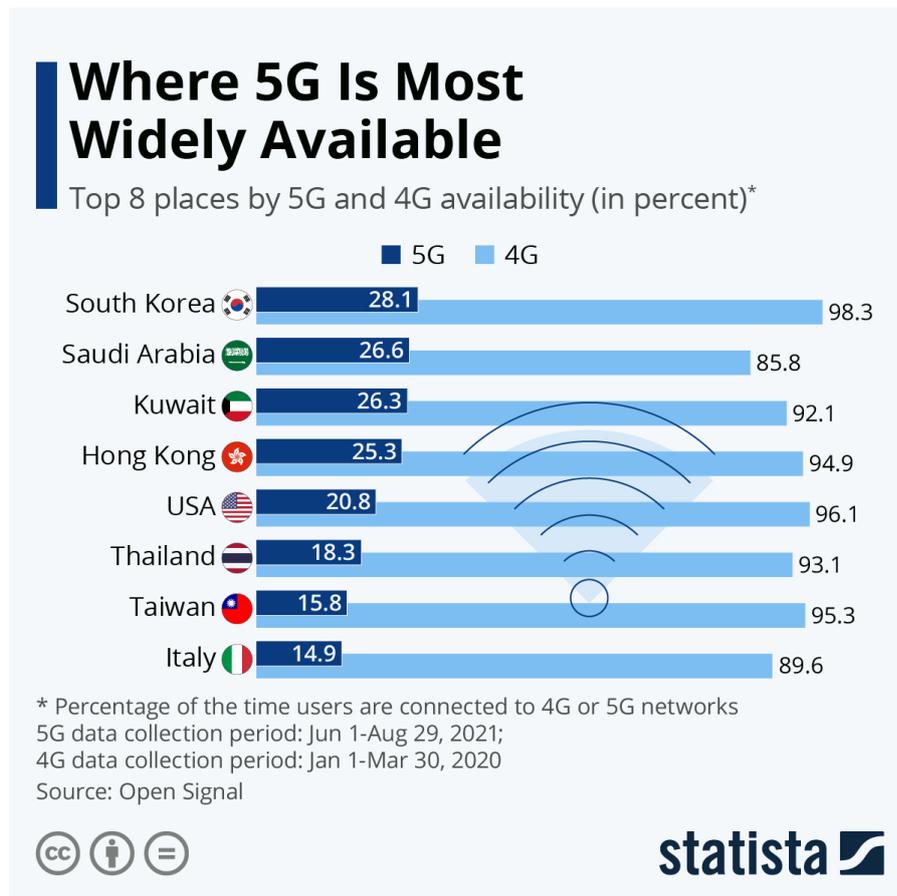


Figura 2.5: Disponibilidade de redes 5G no mundo (SOUZA, 2021).

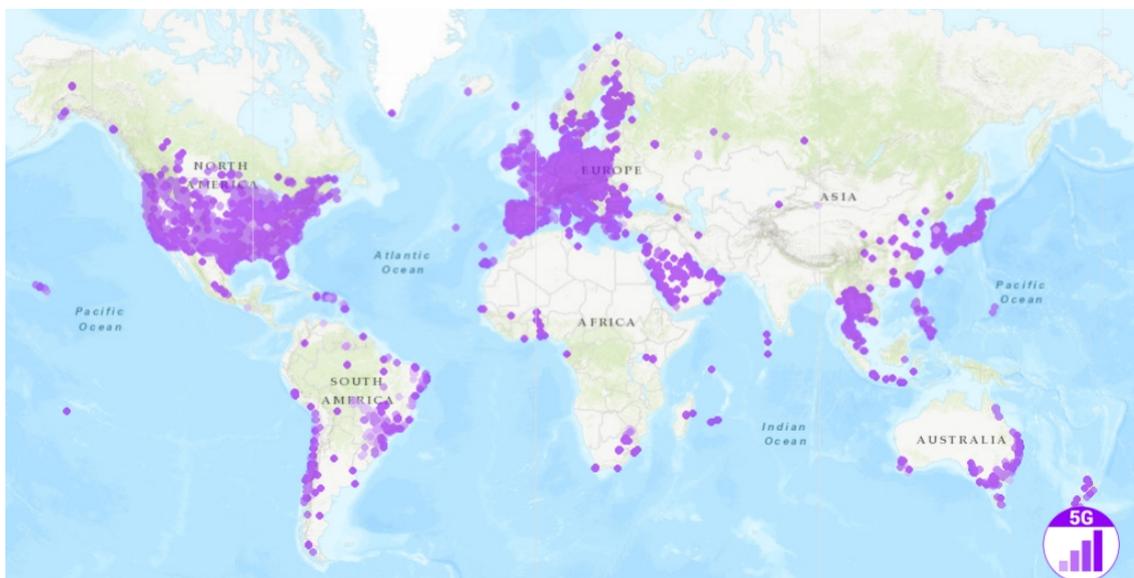


Figura 2.6: Disponibilidade de redes 5G no mundo (NPERF, 2022).

Para finalizar, apresentamos a Tabela 2.1 com um comparativo entre as principais características das redes móveis de telecomunicação. Podemos observar que o ciclo de vida entre as gerações gira em torno de uma década e que novas gerações sempre aumentam a

velocidade de pico e diminuem a latência no acesso sem fio. A latência se define como o tempo entre a saída de um pacote de dados da origem e o início da resposta no servidor de destino.

Tabela 2.1: Tabela comparativa entre as gerações de rede móveis.

Geração	Década	Velocidade pico	Latência	Tecnologia	Casos de uso
1G	1980	N/A	N/A	Analógica	Chamadas de voz
2G	1990	300 Kbps	500 - 1000 ms	Digital	SMS, E-mail
3G	2000	42 Mbps	100 - 500 ms	Digital	Acesso à Web
4G	2010	1 Gbps	20 - 30 ms	Digital	Serviços em nuvem
5G	2020	10 Gbps	1 - 10 ms	Digital	VANETs, IoT

3 Revisão da literatura

Existem na literatura diversos trabalhos relacionados ao universo de redes veiculares. Neste amplo campo de estudo, muitos autores tem como foco as aplicações práticas destas redes na solução de problemas cotidianos como congestionamentos, poluição, etc. (Seção 3.1). Em todos os casos há um consenso de que a infraestrutura das redes móveis de telecomunicação é fundamental para viabilizar as redes veiculares. Entretanto, muitos trabalhos apresentam resultados experimentais utilizando redes 3G ou 4G, que sabidamente possuem limitações para este tipo de aplicação.

Neste trabalho damos uma atenção maior ao uso da tecnologia 5G como principal habilitadora das redes veiculares (Seção 3.2). Como a tecnologia 5G ainda está em estágio inicial de implantação, há poucos trabalhos na literatura que trazem resultados experimentais nesta direção. Desta forma, abordamos também como as ferramentas de softwares para simulação podem acelerar o processo de proposta e avaliação dos novos trabalhos de pesquisa nesta área (Seção 3.3).

3.1 Redes veiculares e suas aplicações

As aplicações mais abordadas para redes veiculares estão relacionadas aos sistemas de transportes inteligentes, tornando o deslocamento urbano mais econômico, seguro e sustentável. No contexto de segurança, a comunicação entre os veículos pode alertar motoristas em regiões próximas sobre algum evento inesperado no trânsito e, com isso, evitar acidentes. Em (BEZZERA et al., 2019), o autor apresenta uma proposta em que os veículos são equipados com câmeras e sensores para captura e transmissão de vídeos em tempo real. Dessa forma, as imagens de acidentes ou emergências no trânsito podem ser previamente transmitidas para os serviços de saúde e segurança (como ambulâncias e policiais), viabilizando uma preparação prévia às operações de atendimento.

O trabalho de (SILVA; SOARES, 2019) aborda a relevância de se obter soluções inteligentes para minimizar os congestionamento de veículos, já que estes afetam tanto a

mobilidade urbana, o meio ambiente, assim como a saúde das pessoas. Nesta direção, os autores apresentam um algoritmo aprimorado para o controle de semáforos que utiliza as redes veiculares como ferramenta de comunicação.

No que se refere à otimização de rotas, o trabalho de (MACEDO et al., 2013) apresenta uma abordagem experimental, com a parte prática do estudo realizada dentro do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, utilizando computadores dentro de automóveis que funcionam como nós de rede. Foram analisados cenários estáticos e móveis e com três trajetos diferentes. Mesmo com as limitações e os desafios de um cenário experimental reduzido, o estudo faz uma comparação entre um protocolo multi-caminho, que é um protocolo que aceita outras rotas além da rota ótima, e um de melhor caminho para comunicação entre veículos e infraestrutura, e aponta que o primeiro possui uma taxa menor de perda de pacotes para ambos os cenários.

Dentre os inúmeros trabalhos relacionados à mobilidade urbana, o artigo de (GOMIDES et al., 2019) propõe um sistema de gerenciamento de tráfego totalmente distribuído para reorganizar o fluxo de veículos. A abordagem utiliza como base a velocidade máxima das vias e a relaciona com as distâncias percorridas e esperadas pelos veículos para que seja feita a distribuição destes por rotas alternativas. Os autores também comparam a solução com outras abordagens de literatura e confirmam que a proposta obteve resultados semelhantes ou superiores.

Em (PEREIRA et al., 2019) é apresentada uma solução o *Speed*: uma solução inter-veicular para maximizar o fluxo de veículos e minimizar os congestionamentos. Para isso, a proposta utiliza um sistema capaz de identificar e classificar níveis de congestionamento diferentes e, por consequência, otimizar o fluxo de veículos. Os autores validam a solução comparando-a com outras soluções da literatura e relatam um resultado positivo na redução de emissão de poluentes e no tempo de viagem.

Em (AKABANE et al., 2019) é apresentado o MAESTRO, um sistema que tem como foco a gerência de mobilidade urbana. Nesse projeto é aplicada uma técnica para agrupar os veículos e minimizar o congestionamento através de sugestões de rotas alternativas. A proposta foi avaliada através de simuladores nos aspectos de escalabilidade e da qualidade do gerenciamento do tráfego. Os resultados indicam que o sistema é

escalável e possui eficiência satisfatória.

3.2 Comunicação veicular 5G

No campo de novas soluções para atender ao contexto de redes veiculares integradas à tecnologia 5G, o estudo de (YANG; HUA, 2019) traz um comparativo entre as tecnologias que estão em crescimento. Os autores dividem os elementos de uma rede veicular em três grupos: o primeiro grupo de performance dos nós da rede, o segundo de redes locais e o terceiro relacionado à IoT. Dentro de cada um desses grupos são detalhados diferentes tipos de tecnologia, como comunicação V2X e redes SDN, além de outras tecnologias relacionadas à eficiência e segurança.

O artigo de (GE; LI; LI, 2017) discute sobre a evolução das gerações de redes móveis e o impacto no desempenho de aplicações que já existem ou que estão em desenvolvimento. Os autores apresentam uma arquitetura para redes veiculares integrada ao 5G. Essa arquitetura é composta por três camadas: uma camada de dados, onde estão as antenas e os veículos; uma camada de controle, responsável pelo monitoramento e armazenamento de informações; e uma camada de aplicação, onde está a parte da interface que conta com serviços de eficiência, segurança e entretenimento. O estudo conclui que as redes veiculares aliadas à computação em nuvem e às tecnologias de comunicação 5G serão capazes de atender novas aplicações que demandam por confiabilidade e baixo tempo de reposta, como, por exemplo, carros autônomos.

No trabalho de (ALJERI; BOUKERCHE, 2020), os autores dividem as aplicações das redes veiculares em dois grupos. O primeiro é o grupo relacionado à segurança, com aplicações críticas que contém serviços de alertas, segurança no trânsito e serviços de saúde. Já o segundo grupo compreende as demais aplicações (não críticas), como serviços de entretenimento, monitoramento, entre outros. Como esperado, as aplicações do primeiro grupo demandam por eficiência e confiabilidade. Já as aplicações do segundo grupo não necessitam da mesma confiabilidade, mas demandam pela transmissão de grande volumes de dados. O estudo também apresenta um comparativo de trabalhos relacionados ao tópico de gerenciamento de mobilidade com a tecnologia 5G.

3.3 Ferramentas e simuladores

Assim como as redes móveis e as redes veiculares estão em constante evolução, as ferramentas de software que auxiliam no processo de desenvolvimento e teste de novas propostas para estas redes também evoluem ao longo do tempo. Por isso, é de grande importância conhecê-las e entender qual é a mais adequada para cada cenário de estudo.

O trabalho mais antigo que encontramos é o de (MARTINEZ et al., 2011). Neste trabalho, os autores apresentam tabelas de comparação entre os diferentes tipos de simuladores mais utilizados na época. Especificamente, são três tabelas: uma para os simuladores de rede, outra para os simuladores de mobilidade e uma última tabela com simuladores de redes veiculares (que combinam os dois tipos citados anteriormente). Nestas comparações são abordadas várias métricas para os simuladores: escalabilidade, facilidade de uso, protocolos suportados, tipo de licença, tamanho de mapa suportado, etc.

O trabalho de (KABIR et al., 2014) traz uma discussão detalhada sobre 14 simuladores de redes veiculares. Os autores apresentam comparações entre eles através de tabelas com informações sobre a linguagem de programação utilizada em cada um, a qualidade da documentação disponível, a dificuldade de uso, o tipo de licença e a escalabilidade da ferramenta.

O estudo de (MUHLBAUER, 2014) aborda com profundidade a parte prática de uma simulação de redes veiculares. Além de introduzir os conceitos básicos e os simuladores que podem ser utilizados, os autores apresentam imagens de diversos cenários analisados. O trabalho apresenta também uma tabela comparativa entre os simuladores, incluindo tanto os simuladores de rede quanto os de mobilidade. Nessa tabela é possível verificar, dentre outras informações, o tipo de licença, o grau de atualização e o nível de utilização de cada ferramenta.

O trabalho mais recente nesta direção é o de (WEBER; NEVES; FERRETO, 2021). Os autores fazem uma revisão das ferramentas atuais que também está categorizada em simuladores de mobilidade, simuladores de rede e simuladores de VANETs. O trabalho apresenta detalhes técnicos de cada simulador, assim como as vantagens e desvantagens de cada um deles. Uma tabela com as diferentes possibilidades de combinação entre os simuladores para compor cenários de redes veiculares também é apresentada. Nosso

trabalho se diferencia no aspecto de que nele é feita toda a análise e fundamentação teórica das redes móveis e das redes veiculares e é estudado como a tecnologia 5G pode ser utilizada nas redes veiculares. Referente aos simuladores, o foco é no grupo de ferramentas mais atualizadas e com foco no suporte ao 5G.

Após a análise dos estudos em ordem cronológica, é possível perceber que alguns simuladores deixaram de receber atualização e suporte ao longo dos anos e por isso não são mais tão utilizados. Dente eles, podemos citar o ns-2 e o GrooveNet. Por outro lado, alguns simuladores se sustentaram por toda a década, como é o caso do ns-3, do OMNet++ e do SUMO. Sem distinção entre os simuladores de rede e os de mobilidade, os mais utilizados atualmente são: OMNeT++, ns-3, NetSim, SUMO, Veins, Eclipse MOSAIC e VENTOS. É comum que esses simuladores e ferramentas sejam integrados para gerar um ambiente de rede veicular, e uma combinação clássica é a utilização do OMNeT++ como simulador de rede, do SUMO como simulador de mobilidade e do Veins como ferramenta de integração e comunicação entre os dois.

4 Redes veiculares e a tecnologia 5G

Este capítulo aborda em detalhes o papel fundamental da tecnologia 5G nas redes veiculares do futuro. Inicialmente descrevemos os conjuntos de protocolos comumente utilizados para comunicação sem fio em redes veiculares (Seção 4.1). Na sequência, apresentamos como as evoluções arquiteturais das redes móveis impactam na implantação das redes e no desenvolvimento de novas aplicações para VANETs (Seção 4.2). Por fim, concluímos com desafios e perspectivas futuras nesta área (Seção 4.3).

4.1 Protocolos para comunicação sem fio

Existem duas abordagens para a comunicação V2X: a comunicação dedicada de curto alcance (DSRC, do inglês *Dedicated Short-Range Communication*) e a comunicação celular (C-V2X, do Inglês *Cellular V2X*), sendo esta segunda a de maior interesse neste trabalho.

4.1.1 Comunicação DSRC

A comunicação DSRC para o acesso sem fio em ambientes veiculares (WAVE, do Inglês *Wireless Access Vehicular Environment*) é suportada por uma família de protocolos que incluem o IEEE 802.11p nas camadas inferiores operando em conjunto com os padrões IEEE 1609.1 – IEEE 1609.4, estes últimos relacionados à segurança e serviços nas camadas superiores da arquitetura. A organização destes protocolos está ilustrada na Figura 4.1.

Nas camadas inferiores (física e enlace), o protocolo IEEE 802.11p opera de maneira semelhante às redes Wi-Fi, coordenando a comunicação entre os veículos de maneira distribuída (NOOR-A-RAHIM et al., 2022). Nas camadas superiores (rede e transporte), as pilhas de protocolos suportadas são o TCP/UDP sobre IPv6 e o protocolo proprietário do WAVE para mensagens curtas (WSMP, do Inglês *WAVE Short-Message Protocol*). Enquanto as aplicações não críticas operam sobre os protocolos TCP/UDP sobre IPv6, o WSMP foi especificamente projetado para suportar as aplicações voltadas à segurança viária (MUHLBAUER, 2014).

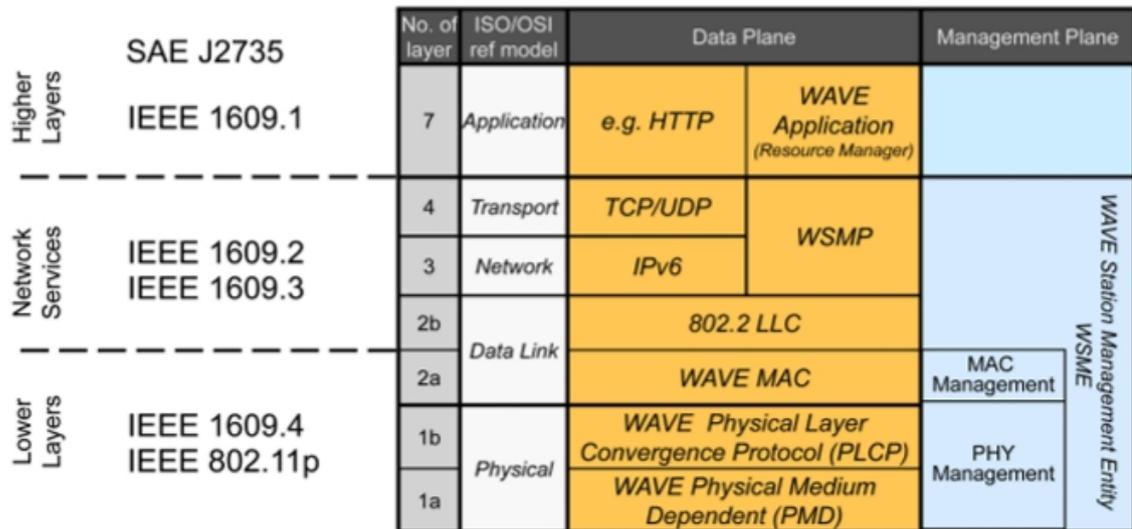


Figura 4.1: Pilha de protocolos WAVE (URMENETA, 2010).

Apesar de ainda ser muito utilizada atualmente, as limitações de alcançabilidade do WAVE e a baixa vazão de dados desfavorecem sua utilização exclusiva para aplicações veiculares avançadas (ALALEWI; DAYOUB; CHERKAOUI, 2021). Alguns estudos recentes apontam novos protocolos que podem superar seus antecessores, como é o caso do padrão IEEE 802.11bd em substituição ao padrão IEEE 802.11p. Dentre as principais vantagens do IEEE 802.11bd podemos destacar a maior velocidade alcançada por conta da transmissão sem fio através de ondas milimétricas (NAIK; CHOUDHURY; PARK, 2019).

4.1.2 Comunicação C-V2X

O projeto de parceria da terceira geração (3GPP, do Inglês *3rd Generation Partnership Project*), organização internacional responsável pela padronização das redes móveis de telecomunicação, tem trabalhado ativamente em soluções C-V2X para comunicação celular em redes veiculares. Essas soluções foram projetadas para operar inicialmente sobre a rede sem fio de quarta geração, chamada de evolução à longo prazo (LTE, do Inglês *Long Term Evolution*). Entretanto, hoje também existe suporte para a rede sem fio de quinta geração, chamada de novo rádio (NR, do Inglês *New Radio*). Os termos LTE-V2X e NR-V2X são comumente encontrados na literatura para definir essas soluções.

O LTE-V2X foi introduzido pelo 3GPP em 2016, no *Release 14*. Ele surge como um substituto ao DSRC, sendo baseado na interface de rádio 4G LTE Uu para

comunicação entre veículos e estações base (eNB, do Inglês *Enhanced Node B*). Seus principais diferenciais estão no gerenciamento dos recursos de radio, onde o escalonador centralizado no eNB é capaz de coordenar a transmissão de informações entre os veículos para otimizar o uso do espectro eletromagnético (ANWAR; FRANCHI; FETTWEIS, 2019). Outra característica marcante do LTE-V2X foi a inclusão de uma nova interface de comunicação denominada PC5. Essa interface, também chamada de *sidelink*, permite a comunicação direta entre os veículos, eliminando a necessidade dos dados passarem pelas estações base e reduzindo o atraso na comunicação.

Uma característica importante da comunicação C-V2X é que o 3GPP estabeleceu especificações focadas em serviços e aplicações (GARCIA-ROGER et al., 2020). Para o LTE-V2X, os casos de uso incluem:

- Segurança na via para redução de colisões: os serviços de segurança rodoviária fazem uso de mensagens curtas transmitidas periodicamente aos vizinhos em nível geográfico local.
- Eficiência de trânsito através da otimização de rotas e redução dos congestionamentos: os sensores nos veículos coletam dados e os enviam em tempo real para servidores em centrais de gerenciamento que são responsáveis por planejar as rotas.
- Entretenimento: melhorar a experiência do usuário durante o deslocamento do veículo através do acesso à Internet para, por exemplo, conexão com redes sociais e compartilhamento de vídeos.

O NR-V2X foi introduzido pelo 3GPP em 2018, junto com a especificação do 5G no *Release 16*. Comparado ao LTE, o NR suporta taxas de dados mais rápidas, menor latência, maior confiabilidade e novas bandas de espectro eletromagnético (KIM et al., 2019). O NR-V2X foi projetado para complementar o LTE-V2X, permitindo interoperabilidade entre as diferentes gerações de redes móveis (ALALEWI; DAYOUB; CHERKAOUI, 2021). Dentre as principais características do NR-V2X, destacamos a nova interface NR-PC5, que além de suportar os casos de uso do LTE-V2X, suporta também transmissão em grupo, *roaming* entre diferentes operadoras e o gerenciamento granular da qualidade da conexão entre os veículos. A Figura 4.2 ilustra diversos exemplos de conectividade C-V2X.

4.1.3 Comunicação híbrida

Tanto a comunicação DSRC quanto a comunicação C-V2X têm suas respectivas vantagens e limitações quando adotadas em ambientes veiculares. Como resultado, a integração destas tecnologias em redes veiculares heterogêneas é sugerida na literatura para explorar os benefícios exclusivos de cada uma ao mesmo tempo em que supera suas desvantagens individuais (NOOR-A-RAHIM et al., 2022).

A Figura 4.3 ilustra diferentes cenários de comunicação. No primeiro caso temos comunicação DSRC V2V entre veículos e DSRC V2I entre veículos e RSUs. Já no segundo caso comunicação celular V2V entre veículos e celular V2X entre veículos e estações base. Na última imagem é possível ver os casos anteriores em um mesmo cenário.

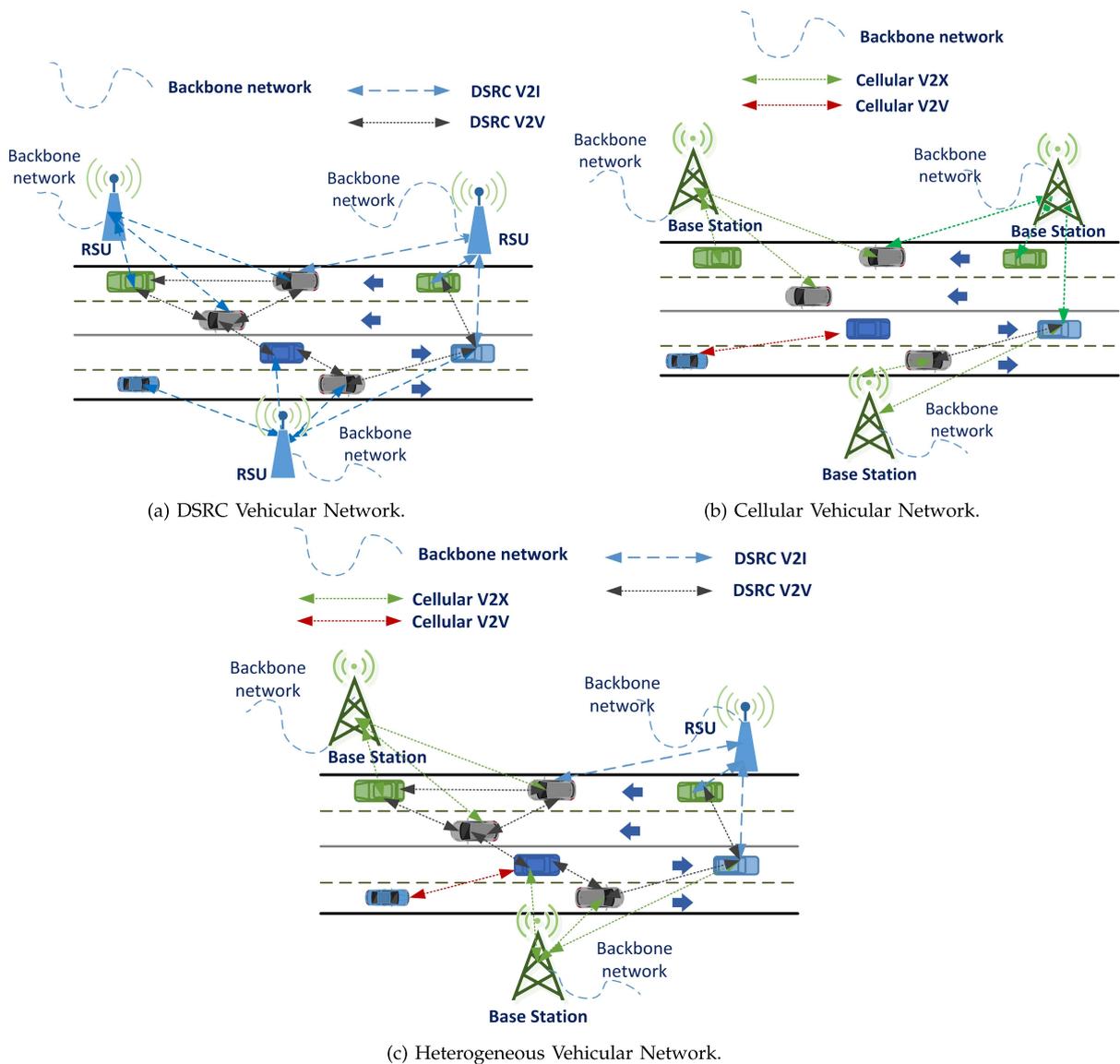


Figura 4.3: Comunicação DSRC, C-V2X e heterogênea (NOOR-A-RAHIM et al., 2022).

Tabela 4.1: Comparativo entre protocolos de comunicação.

Caso de uso	DSRC	LTE-V2X	NR-V2X	VLC
Alertas de emergência veicular	✓✓	✓✓	✓✓	–
Alerta de colisão veicular	✓✓	✓✓	✓✓	✓
Sistema de visão transparente	✓	✓	✓✓	✓
Compartilhamento de sensores	✓	✓	✓✓	✓
Comboio	✓	✓✓	✓✓	✓
Eficiência de tráfego	✓	✓✓	✓✓	–
Controle de interseções	✓	✓	✓✓	–

- ✓✓ Suporte ao caso de uso na maioria dos contextos
- ✓ Suporte ao caso de uso em contextos específicos
- Não oferece suporte ao caso de uso

4.2 Fatiamento da rede 5G

Um dos grandes diferenciais da quinta geração de redes móveis é o suporte ao fatiamento da rede (*network slicing*), como mostra a Figura 4.5. Nela é possível ver que a arquitetura 4G utiliza sempre as mesmas funções de rede sobre uma infraestrutura comum para todos os tipos de serviços e aplicações. Essa falta de flexibilidade é considerada uma das maiores limitações do 4G para a Internet do futuro e também para as redes veiculares, pois serviços com diferentes requisitos de qualidade, muitas vezes conflitantes entre si, têm que operar sobre uma configuração padrão única. Por sua vez, podemos ver que a arquitetura do

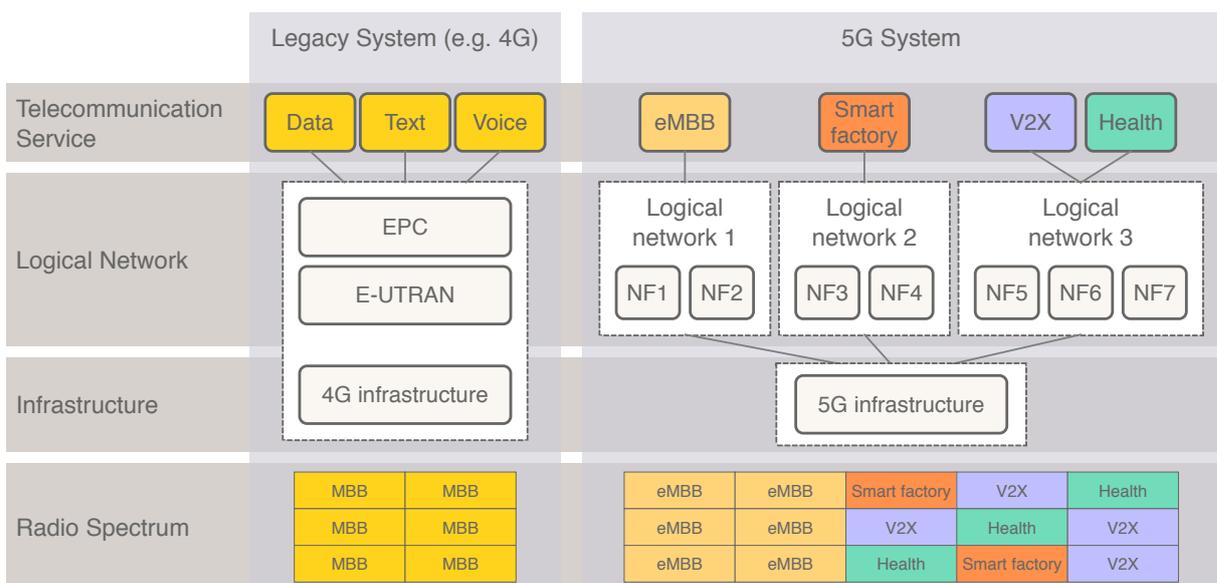


Figura 4.5: Fatiamento da rede lógica no 5G (GERLA; GRUTESER, 2011).

5G permite configurações lógicas distintas sobre uma infraestrutura comum, ao qual damos o nome de fatias de rede. Cada fatia é configurada com funções de rede adequadas aos serviços que ela suporta. A figura exemplifica essa customização com o serviço de comunicação V2X utilizando as funções NF5, NF6 e NF7, que se diferem das funções NF1 e NF2 empregadas na fatia de acesso móvel à banda larga.

Dentre as tecnologias habilitadoras do fatiamento das redes 5G podemos destacar as SDN e a NFV, já apresentadas na Seção 2.2. A integração das SDN e da NFV facilita o gerenciamento de recursos e possibilita o controle centralizado da rede. Isso permite a implementação de fatias de redes abertas, programáveis, flexíveis, escaláveis e sensíveis à aplicativos (ALALEWI; DAYOUB; CHERKAOUI, 2021). Além disso, a computação em borda é outra tecnologia presente no fatiamento da rede, que pode ser considerada complementar às tecnologias NFV e SDN. A computação em borda permite o processamento dos dados e informações próximo ao usuário móvel, diminuindo o atraso na comunicação e melhorando a qualidade do serviço oferecido.

O fatiamento de rede permite que as operadoras de rede criem instâncias de serviços flexíveis em fatias lógicas individuais sobre uma infraestrutura compartilhada (LI et al., 2018). Na Figura 4.6 fica claro o processo de fatiamento da rede, em que a base da imagem contempla a camada de infraestrutura enquanto as camadas superiores representam as fatias que foram divididas para atender a serviços específicos. O fatiamento

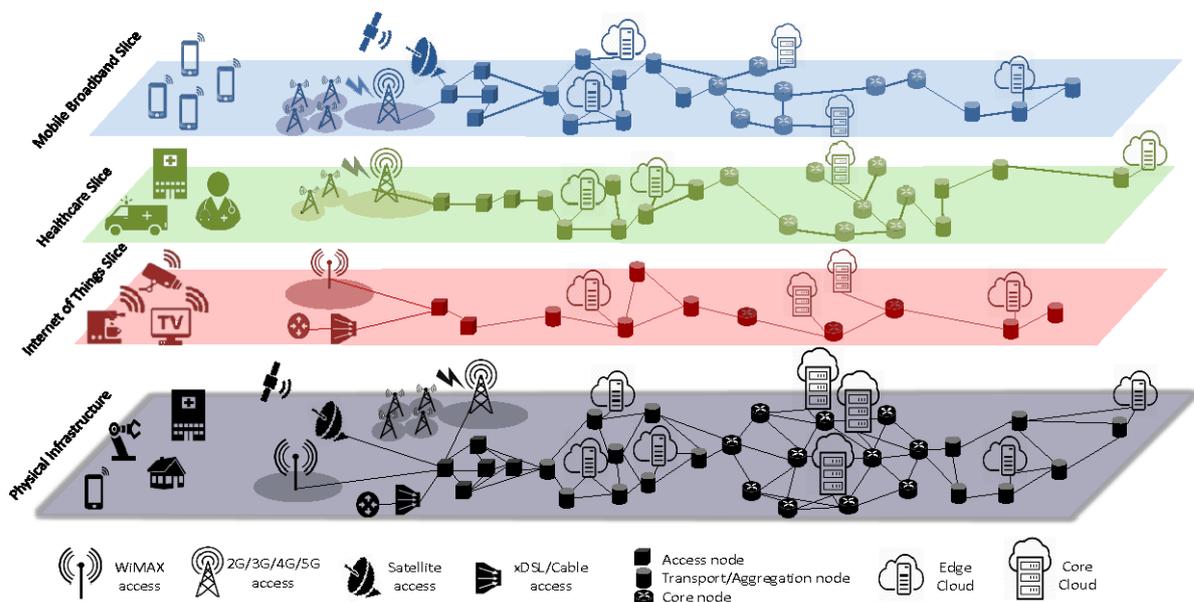


Figura 4.6: Exemplo de fatiamento da rede (ORDÓÑES et al., 2017)

da rede 5G traz flexibilidade mas também aumenta a complexidade no gerenciamento de rede. Assim, existe uma necessidade maior de projetar soluções de gerenciamento automatizadas para lidar com tal complexidade (ORDÓÑES et al., 2017). O desempenho e o monitoramento das fatias de rede podem ser melhorados por meio de algoritmos adaptativos e estratégias de otimização. Como complemento para as SDN e a NFV, a automação da rede pode ser também incrementada com o uso de inteligência artificial.

A Figura 4.7 ilustra como o fatiamento da rede e o uso de suas tecnologias habilitadoras pode ser empregado no contexto das redes veiculares e da comunicação V2X. Neste cenário, cada fatia pode ser configurada para suportar classes de aplicações distintas, de modo que a fatia dos serviços relacionados à segurança tenha maior prioridade no uso de recursos quando comparado à fatia dos serviços de entretenimento.

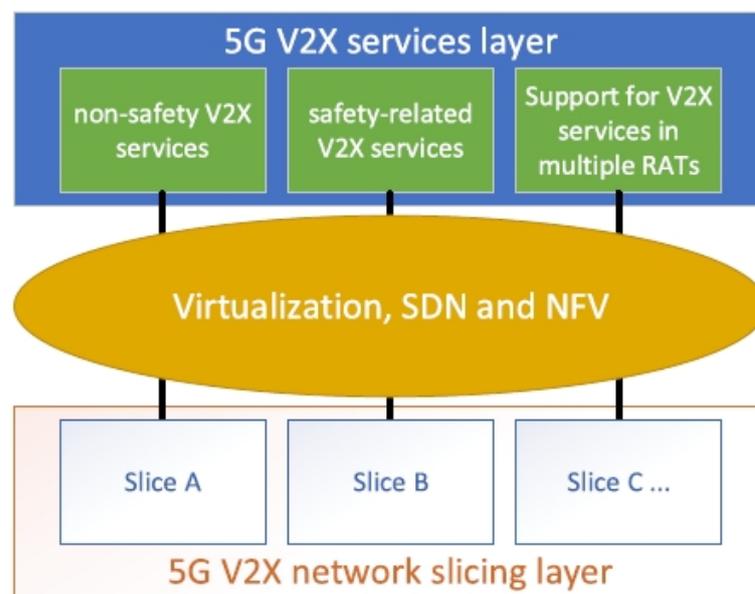


Figura 4.7: Fatiamento de rede veicular (ALALEWI; DAYOUB; CHERKAOU, 2021).

No ecossistema V2X, o fatiamento da rede 5G pode lidar, efetivamente, com uma ampla variedade de casos de uso com demandas divergentes. Nesse contexto, além de provedores tradicionais de Internet e serviços, novas organizações, como autoridades rodoviárias, municípios e fabricantes de veículos, também entrarão como atuantes no universo das redes veiculares. De fato, a grande quantidade de mercados que possuem indústrias ou setores específicos, visados pelas redes 5G, exigem o suporte ao fatiamento da rede sobre uma infraestrutura comum e programável (CAMPOLO et al., 2017).

4.3 Desafios e perspectivas futuras

Embora existam dados e estudos que comprovem a eficiência e a viabilidade que o 5G proporciona no contexto de redes veiculares, ainda assim há desafios que precisam ser superados. A latência imposta pela comunicação sem fio, por exemplo, é um dos fatores que ainda necessita de estudos, pois alguns dos cenários de redes veiculares exigem uma precisão e tempo de resposta quase imediatos como é o caso de aplicações de prevenção de acidentes. À medida que o número de carros conectados nas estradas continuam a aumentar, o 5G exigirá estratégias inovadoras, como mecanismos de gerenciamento de nós e sensoriamento de espectro para aumentar a capacidade de transmissão (SHAH et al., 2018).

Uma tecnologia que promete ser grande aliada das redes veiculares é a comunicação dispositivo à dispositivo (D2D, do Inglês *Device-to-Device*). O D2D pode aumentar o desempenho na comunicação de curto alcance uma vez que a conexão é direta de um dispositivo para o outro, sem passar pelas estações base. Por esse motivo, o D2D pode resolver problemas de latência, visto que a informação percorre um caminho mais curto. Em uma rede veicular densa, os nós móveis são muitos e a distância de comunicação entre os veículos torna-se pequena, o que contribui para o sucesso da comunicação D2D. Entretanto, para o caso de redes pouco densas, a perda rápida de conexão após movimentação dos veículos torna-se um grande desafio para o D2D (YANG; HUA, 2019).

Um outro desafio para as redes veiculares está relacionado à segurança. Devido ao grande número de nós na rede, uma mensagem pode facilmente ser interceptada ou emitida de forma maliciosa, comprometendo a confiabilidade dos serviços. Portanto, é necessário ter um sistema de segurança robusto, com validações de autenticidade e garantia de privacidade aos usuários (WANG et al., 2020).

Concluimos destacando que a implementação prática do 5G ainda é muito recente e, por isso, o 4G ainda será uma opção bastante utilizada em aplicações mais básicas de redes veiculares. No entanto, para as novas demandas tecnológicas e cenários mais complexos, serão cada vez mais comuns estudos e propostas que utilizam a tecnologia 5G como principal meio de comunicação (BOBAN et al., 2018).

5 Ferramentas de software para avaliação

As redes veiculares com comunicação 5G são um campo ainda em desenvolvimento, com novos estudos surgindo a todo momento. Para testar e validar novas propostas nesta área é comum utilizar ferramentas de *software* que conseguem simular com bastante precisão alguns cenários específicos, como vias congestionadas, acidentes de trânsito, etc. Este capítulo apresenta os principais simuladores que são utilizadas nesse contexto. As ferramentas estão organizadas em três grupos: os simuladores de rede (Seção 5.1), os simuladores de mobilidade (Seção 5.2) e simuladores de redes veiculares (Seção 5.3). Na sequência, discutimos sobre o suporte dos simuladores à outras tecnologias emergentes que são empregadas frequentemente junto às redes veiculares (Seção 5.4). Por fim, concluímos com um exemplo prático de simulação de uma VANET com comunicação 5G (Seção 5.5).

5.1 Simuladores de rede

O OMNeT++¹ (*Objective Modular Network Testbed in C++*) é uma plataforma para simulação de eventos discretos que pode ser configurada para simular tanto redes de computadores como redes veiculares. Os cenários são programados na própria ferramenta, a descrição da rede é feita em arquivos e a simulação é executada de fato. O OMNeT++ é baseado na linguagem C++ mas oferece integração com diversos *frameworks* e bibliotecas que serão apresentados na sequência, como o INET, SimuLTE, Simu5G e Veins. A documentação do simulador é extensa e ele recebe constantes atualizações. A principal vantagem do OMNeT++ é sua extensa capacidade de integração com outras ferramentas. Por outro lado, um dos pontos negativos do simulador é que os tutoriais e exemplo contemplam apenas simulações muito simples, o que prejudica a curva de aprendizado.

O INET² é uma biblioteca de código aberto que trabalha junto ao OMNeT++. Através dele é possível simular inúmeros protocolos de rede e definir modelos de comunicação para criar ou validar cenários específicos.

¹<https://omnetpp.org/>

²<https://inet.omnetpp.org/>

O SimuLTE³ também é uma biblioteca de código aberto para o OMNeT++, oferecendo suporte à simulações do plano de usuário de redes móveis 4G LTE. Com esta biblioteca é possível programar e executar simulações envolvendo a transmissão de pacotes entre diferentes aplicações nos usuários móveis e nas estações base. O SimuLTE é completamente modular e customizável, possuindo uma interface que facilita sua integração com outras bibliotecas do OMNeT++.

O Simu5G⁴ é a evolução do SimuLTE para incluir suporte ao novo rádio do 5G. Nele é possível encontrar todos os modelos e interfaces que a biblioteca do INET oferece, viabilizando a construção de cenários complexos e personalizados aliado à possibilidade de utilização da tecnologia 5G. Com o Simu5G também é possível criar cenários com o 4G e o 5G funcionando juntos na mesma rede. Dessa forma, esta ferramenta torna-se muito importante para os estudos da transição do 4G para o 5G nas redes veiculares.

O Simu5G permite que os usuários simulem com precisão o plano de dados do 5G NR, em uma perspectiva de ponta a ponta e incluindo todas as camadas de protocolo. Por isso, torna-se uma ferramenta valiosa para pesquisadores e profissionais interessados na avaliação de desempenho de redes e serviços 5G (NARDINI et al., 2020). A Figura 5.1 mostra algumas das aplicações que são suportadas pelo Simu5G, como é o caso de comunicações D2D e mobilidade veicular.

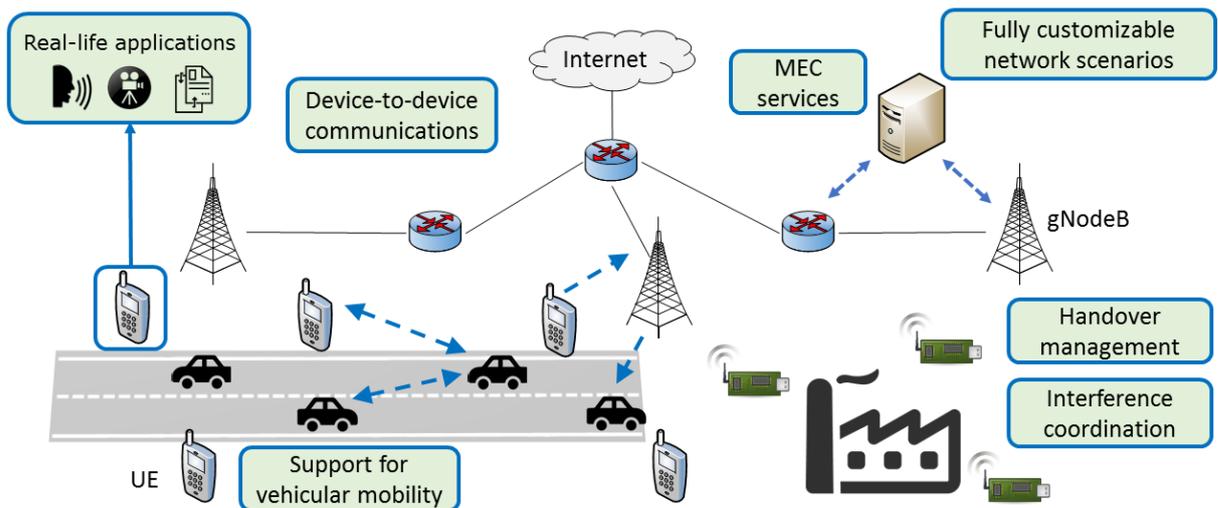


Figura 5.1: Funcionalidades suportadas pelo Simu5G (VIRDIS; NARDINI, 2020).

³<https://simulte.com/>

⁴<http://www.simu5g.org/>

Por fim, temos o ns-3⁵ (*Network Simulator 3*), que é um simulador de rede que também pode ser utilizado no contexto de redes veiculares. O ns-3 é um software de código aberto, bastante utilizado no meio acadêmico e com uma documentação de qualidade. Pode ser integrado à outros módulos para simular diferentes ambientes de rede. Com relação às redes móveis, podemos destacar os módulos LENA e 5G-LENA, oferecendo suporte à comunicação 4G e 5G, respectivamente.

5.2 Simuladores de mobilidade

O SUMO⁶ (*Simulation of Urban Mobility*) é um *software* de código aberto para simulação de mobilidade urbana, capaz de modelar o tráfego de veículos e pedestres com precisão, mesmo em cenários de grande complexidade. Dependendo do nível de informações disponíveis no mapa usado na simulação, é possível modelar com precisão a sinalização nas interseções, o sentido e a velocidade do tráfego nas vias, dentre outros. No SUMO também é possível definir a rota dos veículos, a movimentação dos pedestres e ciclistas, etc. O SUMO é compatível com a maioria dos simuladores de redes, possui boa documentação e recebe atualizações regularmente.

Outro simulador de mobilidade muito utilizado é o PTV Vissim⁷, que oferece suporte às simulações complexas com possibilidades de interação com veículos, bicicletas, pedestres, entre outras entidades. Pode ser usado inclusive para aplicações de cálculo de emissão de poluentes, por exemplo. No entanto, ele é mais restrito no aspecto de integração com simuladores de redes quando comparado ao SUMO.

Os simuladores de mobilidade normalmente utilizam mapas extraídos de ferramentas auxiliares. Entre essas ferramentas está o OpenStreetMap⁸, que possibilita exportar mapas de qualquer região desejada através de recortes manuais. O OpenStreetMap é capaz de fornecer mapas diretamente para o SUMO, visto que a exportação do mapa gera um arquivo compatível que pode ser lido pelo simulador. A Figura 5.2 mostra a página de navegação do OpenStreetMap, que possui uma interface simples e intuitiva.

⁵<https://www.nsnam.org/>

⁶<https://www.eclipse.org/sumo/>

⁷<https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim/>

⁸<https://www.openstreetmap.org/>

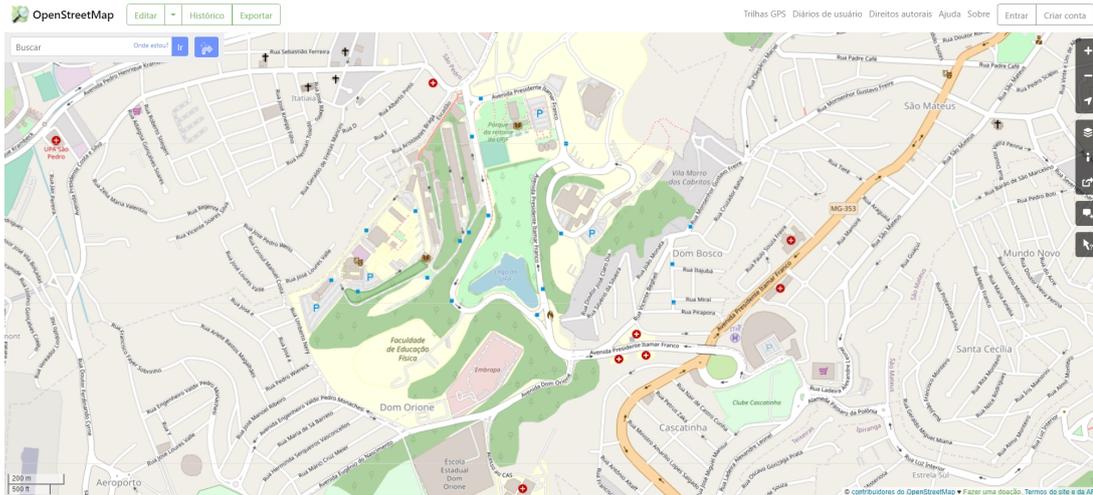


Figura 5.2: Interface de navegação do OpenStreetMap.

Para editar um mapa exportado do OpenStreetMap é possível utilizar o JOSM⁹ (*Java OpenStreetMap Editor*). Com esta ferramenta é possível adicionar informações detalhadas no mapa e, com isso, contribuir para a melhoria do serviço.

5.3 Simuladores de redes veiculares

O Veins¹⁰ (*Vehicles in Network Simulation*) é um dos principais *frameworks* de código aberto que tem como papel fazer a integração do SUMO com o OMNeT++. Ele trabalha como um facilitador dessa integração, automatizando toda a parte de configuração, otimização e interação. A Figura 5.3 mostra a arquitetura do Veins, destacando como ele controla a comunicação do OMNeT++ (responsável pela simulação da comunicação entre os veículos) com o SUMO (responsável pela simulação da mobilidade dos veículos). É dentro do Veins que estão posicionadas as aplicações relacionadas as sistemas de transporte inteligentes.

Uma outra ferramenta que oferece grande compatibilidade com os simuladores de rede e mobilidade é o Eclipse MOSAIC¹¹. Este simulador possui uma boa documentação e diversos tutoriais de uso. Um diferencial do Eclipse MOSAIC é a possibilidade de utilizar um simulador externo qualquer em sua infraestrutura, o que pode ser muito útil para diversas aplicações. Além disso, este é um *software* de código aberto que também suporta ambientes de simulações que utilizam 5G em redes veiculares.

⁹<https://josm.openstreetmap.de/>

¹⁰<https://veins.car2x.org/>

¹¹<https://www.eclipse.org/mosaic/>

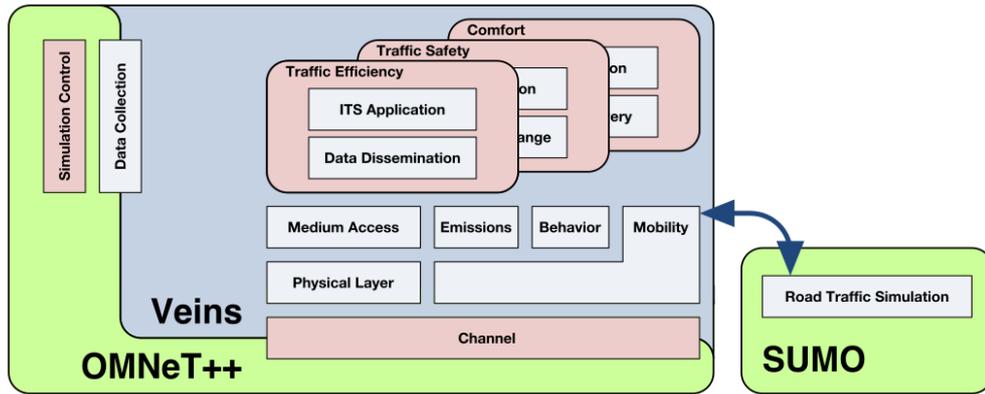


Figura 5.3: Arquitetura do Veins (SOMMER, 2020)

O NetSim¹² (*Network Simulator*) é uma ferramenta que utiliza seu próprio simulador de rede e pode utilizar o SUMO como simulador de mobilidade. Ele é um software proprietário que oferece uma aplicação mais completa e profissional, com documentação extensa e diversos treinamentos e certificações disponíveis no mercado. É um dos principais simuladores no que se refere à utilização do 5G e suas aplicações em redes veiculares.

Outro ambiente dessa lista é o EstiNet¹³ que, diferente dos outros simuladores já apresentados, possui o ambiente de simulação completo, tanto com a parte de redes como com a parte de mobilidade. Além disso, o EstiNet também oferece suporte ao uso de tecnologia 5G. O fato de ser uma ferramenta única pode ser vantajoso pela praticidade, mas limita sua expansão.

O ezCar2X¹⁴ é outro simulador veicular semelhante ao Veins, com a diferença que utiliza o ns-3 como simulador de rede em conjunto com o SUMO como simulador de mobilidade. O ezCar2X é um software flexível, desenvolvido em C++, e que viabiliza a construção rápida de aplicações e permite que setores de mobilidade urbana e telecomunicações possam testar novos conceitos facilmente. No entanto, este simulador ainda não oferece suporte ao 5G.

Por fim, o VENTOS¹⁵ (*Vehicular NeTwork Open Simulator*) é uma plataforma semelhante ao Veins que também trabalha em conjunto com o OMNeT++ e o SUMO. Porém, sua última atualização foi em 2018 e sua documentação não é muito completa. Isso faz com que este simulador seja pouco utilizado hoje em dia.

¹²<https://www.boson.com/netsim-cisco-network-simulator>

¹³<http://www.estinet.com/ns/>

¹⁴<https://www.ezcar2x.fraunhofer.de/en.html>

¹⁵<https://maniam.github.io/VENTOS/>

Tabela 5.1: Comparativo entre os simuladores de redes veiculares.

Simulador	Licença	Simulador de rede	Simulador de mobilidade	Atualização
Veins	Livre	OMNeT++	SUMO	Sim
MOSAIC	Livre	OMNeT++ , ns-3	SUMO, PTV Vissim	Sim
NetSim	Proprietário	NetSim	SUMO, NetSim	Sim
EstiNet	Proprietário	EstiNet	EstiNet	Sim
ezCar2X	Livre	NS-3	SUMO	Sim
VENTOS	Livre	OMNeT++	SUMO	Não

A Tabela 5.1, adaptada de (WEBER; NEVES; FERRETO, 2021), resume as principais características dos simuladores veiculares que foram apresentados nesta seção. Destaque para a licença do *software*, sua integração com os simuladores de rede e mobilidade, e o status atual de desenvolvimento.

5.4 Suporte às tecnologias emergentes

O uso de ferramentas de *software* para simulação tem se mostrado uma das alternativas mais viáveis para a avaliação de novas propostas e aplicações para redes veiculares. A Tabela 5.2, adaptada de (WEBER; NEVES; FERRETO, 2021), compara o suporte dos simuladores veiculares com as principais tecnologias emergentes. O primeiro destaque é para o simulador veicular ezCar2X, o único dentre os apresentados na seção anterior que não possui suporte para comunicação 5G.

O SDN permite o controle e o gerenciamento das redes de forma centralizada através de *softwares*, desacoplando o plano de controle do plano de dados. Este paradigma é prevalente no contexto das redes 5G e muito importante para a evolução das redes veiculares. No entanto, poucos simuladores veiculares possuem suporte ao SDN. Apenas o Veins, o NetSim e o EstiNet suportam essa tecnologia atualmente.

Tabela 5.2: Suporte dos simuladores veiculares às tecnologias emergentes.

Tecnologia	Veins	MOSAIC	NetSim	EstiNet	ezCar2X	VENTOS
Comunicação 5G	✓	✓	✓	✓		✓
Redes SDN	✓		✓	✓		
Computação em borda	✓				✓	✓
Veículos autônomos	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Outra tecnologia muito relevante para as redes veiculares é a computação em borda, que melhora o desempenho e estabilidade das aplicações ao posicionar os serviços próximo aos usuários móveis. Dos simuladores analisados, apenas o Veins, o ezCar2X e o VENTOS oferecem suporte à esta tecnologia.

Por fim, os carros autônomos são um exemplo motivador de aplicação das redes veiculares. Eles se beneficiam diretamente da computação em borda, já que os veículos precisam de um tempo de resposta muito baixo para evitar acidentes. Todos os simuladores de redes apresentados oferecem suporte aos carros autônomos.

Alguns simuladores veiculares são mais utilizados do que outros, como é o caso do Veins e do Eclipse MOSAIC que são livres e de código aberto. O NetSim também é uma ferramenta muito utilizada, apesar de sua licença proprietária. Logicamente, todos os simuladores possuem vantagens e desvantagens dependendo do contexto e demanda de quem está desenvolvendo e testando a aplicação. No entanto, é possível destacar o Veins, que suporta todas as tecnologias apresentadas nesta seção.

5.5 Exemplo prático

Para finalizar este trabalho, apresentamos aqui um experimento prático que consiste em uma simulação construída com algumas das principais ferramentas citadas. O ambiente de execução dessa simulação foi a máquina virtual disponibilizada pelo Simu5G em seu site. Essa máquina vem configurada com o sistema operacional Ubuntu, o simulador de redes OMNeT++, o framework INET em conjunto com a biblioteca Simu5G, o simulador de mobilidade SUMO e o simulador de redes veiculares Veins.

Inicialmente, utilizamos o OpenStreetMap para exportar o mapa da Universidade Federal de Juiz de fora (UFJF) e seus arredores (Figura 5.2). O mapa já exportado e que será utilizado pelo simulador SUMO é apresentado na Figura 5.4.

Através do *script randomtrips* que é disponibilizado pelo SUMO, geramos rotas aleatórias e determinamos o número de veículos que percorrerem essas rotas. Para essa simulação foram utilizados mil veículos. Outro parâmetro que definimos foi o tempo de simulação, que nesse caso foi fixado em uma hora. Com isso, a configuração da mobilidade dos veículos foi concluída.

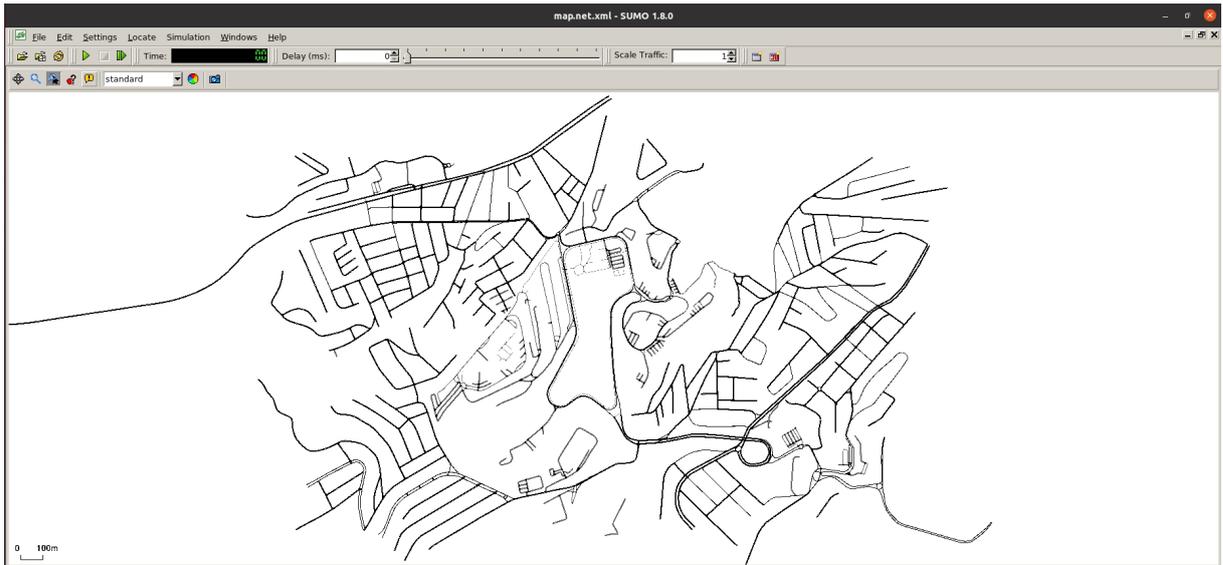
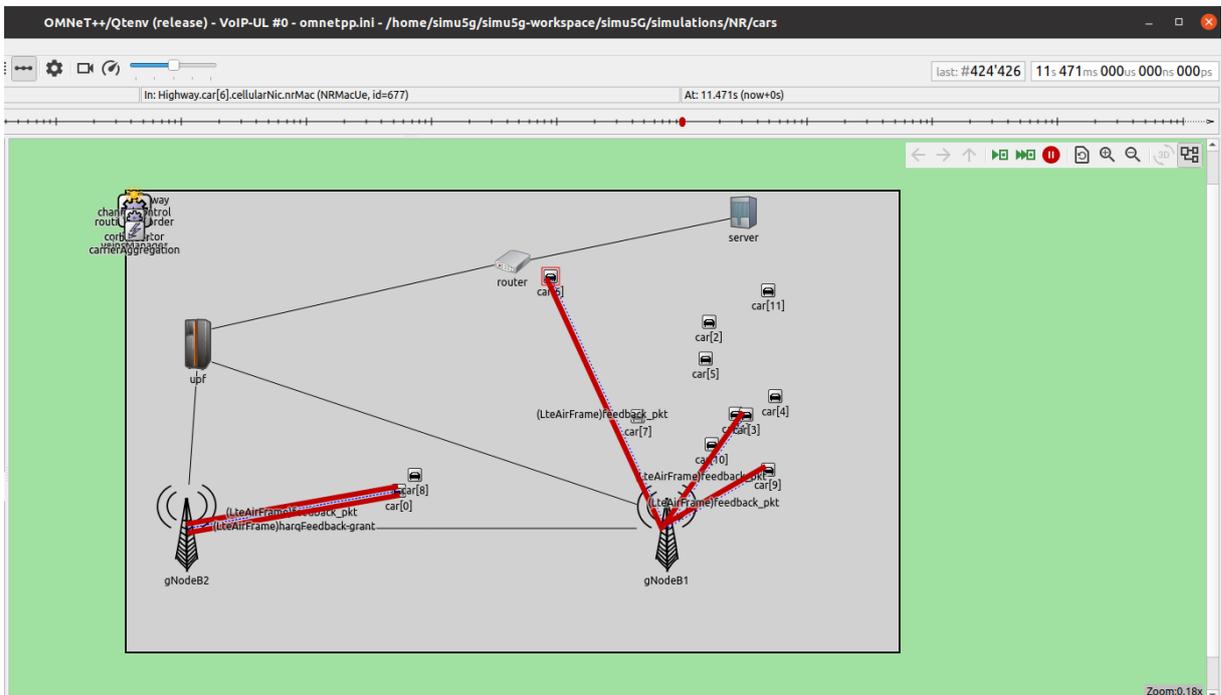


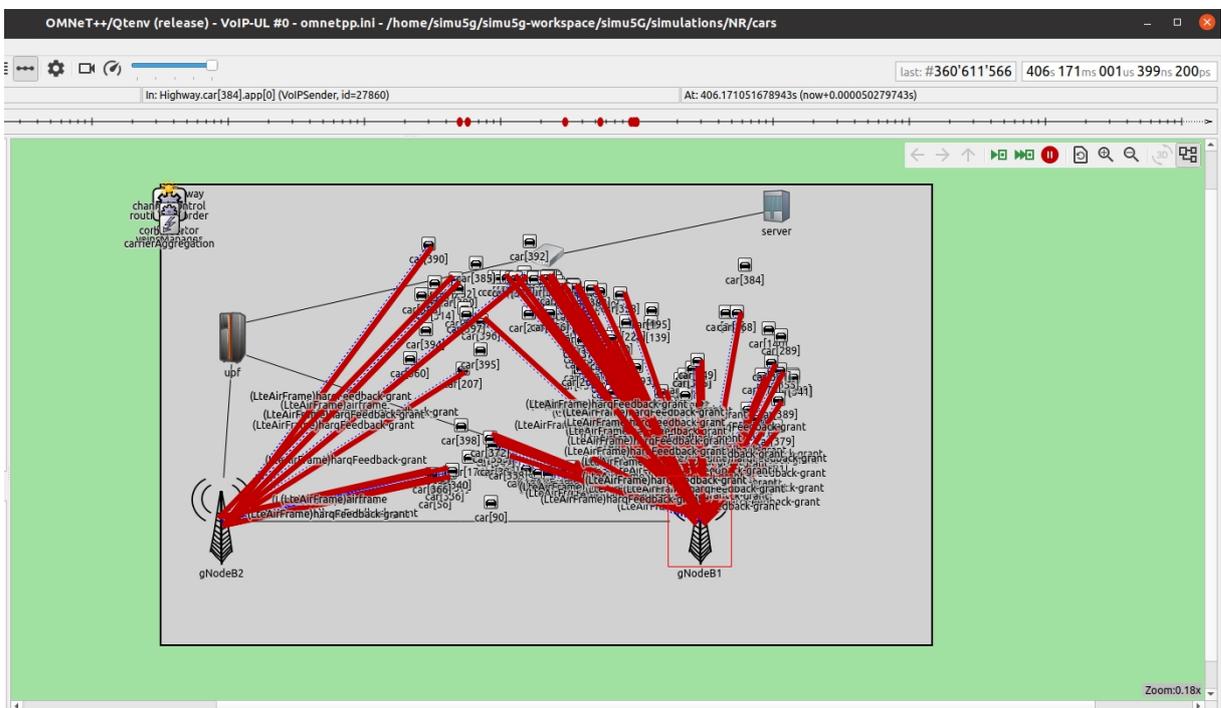
Figura 5.4: Mapa da simulação no SUMO.

A execução da simulação é feita no ambiente do simulador OMNeT++. Para isso, é necessário configurar o arquivo de inicialização da simulação no OMNeT++ para que se utilize o cenário de mobilidade previamente configurado no SUMO. Além disso, nesse mesmo arquivo de inicialização é necessário configurar a aplicação que será executada pelos veículos da rede. Como o objetivo dessa simulação é ilustrar um caso básico, utilizamos um cenário padrão fornecido pelo Veins em que um veículo vítima de um acidente envia informações sobre o ocorrido para os veículos próximos.

Os elementos de rede utilizados nesta simulação foram duas estações base do 5G (gNB) interconectadas por uma função de plano de usuários (UPF, do Inglês *User Plane Function*). O UPF atua como um *gateway*, encaminhando o tráfego oriundo das estações base para o servidor na Internet. Além disso, foram utilizados um roteador e um servidor para completar a topologia da rede. A Figura 5.5 ilustra o cenário adotado em dois momentos distintos durante a execução da simulação. As linhas em vermelho indicam as mensagens que estão sendo trocadas entre os veículos e os gNBs, distribuindo a informação sobre o acidente para outros veículos na redondeza. O cenário adotado para este exemplo é relativamente simples, mas consegue ilustrar o uso das ferramentas de simulação no contexto de uma rede veicular com comunicação 5G.



(a) Estágio inicial da simulação



(b) Estágio avançado da simulação

Figura 5.5: Simulação em execução no OMNeT++.

6 Conclusão

As aplicações de redes veiculares prometem ser excelentes alternativas para a resolução de problemas de mobilidade, segurança e entretenimento. Este trabalho apresentou o quanto as tecnologias de redes móveis tem desempenhado um papel fundamental em oferecer recursos para suprir as demandas dessas aplicações. Foi dado um destaque à tecnologia 5G que é, no momento, a solução mais promissora para resolver as limitações existentes na comunicação móvel. Conhecer e compreender sobre o uso de simuladores e outras ferramentas de *software* também tem grande importância no contexto de redes veiculares, já que são responsáveis por viabilizar toda a parte de validação e teste de aplicações em cenários variados com agilidade e baixo custo.

O objetivo traçado para este trabalho foi o de avaliar a integração entre a tecnologia 5G e as redes veiculares. Para alcançá-lo, inicialmente foi feita uma revisão detalhada da literatura, que aborda tanto a parte de redes móveis de telecomunicação quanto as redes veiculares e seus simuladores. Além disso, foram apresentados os principais aspectos tecnológicos e arquiteturais da tecnologia 5G, e como esses aspectos se relacionam e beneficiam as redes veiculares. Por fim, foi feito um estudo sobre as ferramentas de *software* e os simuladores que permitem que essa integração entre o 5G e as redes veiculares seja validada de maneira ágil, acompanhado de um exemplo prático que utiliza um dos principais conjuntos de simuladores da atualidade.

Em relação ao 5G, nota-se que essa tecnologia é realmente promissora para o contexto das redes veiculares. Sua arquitetura contempla o fatiamento da rede, a flexibilidade no posicionamento das funções de rede, o suporte à comunicação veicular com o LTE-V2X e o NR-V2X, a diminuição da latência, o aumento da largura de banda e a maior capacidade em relação ao número de dispositivos conectados por célula.

Através da revisão da literatura também foi possível perceber a evolução das ferramentas e simuladores utilizados para o estudos das redes veiculares, desde os mais antigos que hoje estão obsoletos até os que estão bem estabelecidos há mais de uma década. A partir desse levantamento foram apresentados os principais simuladores em cada um dos

seguintes grupos: os simuladores de rede, os simuladores de mobilidade e os simuladores de redes veiculares (que integram os dois primeiros).

O exemplo prático que compreende uso dessas ferramentas ajuda a ilustrar a importância e a relevância que elas tem no estudo das redes veiculares. No cenário simulado foi utilizado um grupo muito bem estabelecido de simuladores e que prevalece até hoje: o OMNeT++, o SUMO e o Veins. O Simu5G também foi utilizado e foi responsável por simular a comunicação 5G, viabilizando um cenário de exemplo ideal para esse trabalho: uma aplicação de rede veicular no contexto de segurança que utiliza a tecnologia 5G para transmissão de mensagens de alerta.

Através deste trabalho foi possível compreender como o 5G se destaca em relação ao 4G, e como isso é evidenciado no contexto de redes veiculares. Em relação aos trabalhos futuros, pretende-se fazer uma análise quantitativa entre o desempenho do 4G e do 5G em redes veiculares simuladas. Outra sugestão seria estudar um cenário mais específico de aplicações de prevenção à acidentes, e detalhar sua integração com a tecnologia 5G através de simulações e análise de resultados, apontando suas principais vantagens e limitações.

Bibliografia

- AKABANE, A. et al. Aplicando redes sociais veiculares para aprimorar o gerenciamento da mobilidade urbana. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 1070–1083. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7423>.
- AKYILDIZ, I. et al. 5G roadmap: 10 key enabling technologies. *Computer Networks*, v. 106, 06 2016.
- ALALEWI, A.; DAYOUB, I.; CHERKAOUI, S. On 5G-V2X use cases and enabling technologies: A comprehensive survey. *IEEE Access*, v. 9, p. 107710–107737, 2021.
- ALJERI, N.; BOUKERCHE, A. Mobility management in 5G-enabled vehicular networks: Models, protocols, and classification. *ACM Computing Surveys*, v. 53, p. 1–35, 10 2020.
- ALVES, R. et al. Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. In: _____. [S.l.: s.n.], 2009. p. 199–254.
- ANWAR, W.; FRANCHI, N.; FETTWEIS, G. Physical layer evaluation of V2X communications technologies: 5G NR-V2X, LTE-V2X, IEEE 802.11bd, and IEEE 802.11p. In: _____. [S.l.: s.n.], 2019.
- BEZZERA, P. et al. A collaborative routing protocol for video streaming with fog computing in vehicular ad hoc networks. In: _____. [S.l.: s.n.], 2019. v. 15(3).
- BHANDARKAR, S.; KAMMAR, R. 4G technology. 01 2016.
- BOBAN, M. et al. Connected roads of the future: Use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, v. 13, n. 3, p. 110–123, 2018.
- CAMPOLO, C. et al. 5G network slicing for vehicle-to-everything services. *IEEE Wireless Communications*, v. 24, p. 38–45, 12 2017.
- DING, J. et al. Iot connectivity technologies and applications: A survey. *IEEE Access*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 67646–67673, 2020. ISSN 2169-3536. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985932>.
- GARCIA, M. et al. A tutorial on 5G NR V2X communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, PP, p. 1–1, 02 2021.
- GARCIA-ROGER, D. et al. V2X support in 3GPP specifications: From 4G to 5G and beyond. *IEEE Access*, v. 8, p. 190946–190963, 2020.
- GE, X.; LI, Z.; LI, S. 5G software defined vehicular networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 7, p. 87–93, 2017.
- GERLA, M.; GRUTESER, M. Vehicular networks: Applications, protocols, and testbeds. *Emerging Wireless Technologies and the Future Mobile Internet*, p. 201–241, 01 2011.

- GOMIDES, T. et al. SGTD: Sistema de gerenciamento de tráfego distribuído para redes veiculares. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 1042–1055. ISSN 2177-9384. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7421>.
- KABIR, M. et al. Detail comparison of network simulators. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v. 5, p. 203–218, 2014. ISSN 2229-5518.
- KIM, Y. et al. New radio (NR) and its evolution toward 5G-advanced. *IEEE Wireless Communications*, v. 26, n. 3, p. 2–7, 2019.
- LI, X. et al. Network slicing for 5G: Challenges and opportunities. *IEEE Internet Computing*, PP, p. 1–1, 08 2018.
- LIU, C.; SADEGHI, B.; KNIGHTLY, E. Enabling vehicular visible light communication (V2LC) networks. In: . [S.l.: s.n.], 2011. p. 41–50.
- LUCCA, J. de; MAURO, P. S. G. Desafios da tecnologia 5G. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 1, p. 29–39, ago. 2020. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/708>.
- MACEDO, R. et al. Uma avaliação experimental de desempenho do roteamento multicaminhos em redes veiculares. In: . [S.l.: s.n.], 2013.
- MARTINEZ, F. et al. A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs). *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 11, p. 813 – 828, 07 2011.
- MUHLBAUER, R. VANET (vehicular ad hoc network) simulators. 05 2014.
- NADJET, A. et al. Towards optimal dissemination of emergency messages in internet of vehicles: A dynamic clustering-based approach. *Electronics*, v. 10, p. 979, 04 2021.
- NAIK, G.; CHOUDHURY, B.; PARK, J.-M. IEEE 802.11bd amp; 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications. *IEEE Access*, v. 7, p. 70169–70184, 2019.
- NARDINI, G. et al. Simu5G—an OMNeT++ library for end-to-end performance evaluation of 5G networks. *IEEE Access*, v. 8, p. 181176–181191, 2020.
- NOOHANI, M. Z.; MAGSI, K. U. A review of 5g technology: Architecture, security and wide applications. v. 07, p. 3440–3471, 05 2020.
- NOOR-A-RAHIM, M. et al. A survey on resource allocation in vehicular networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 23, n. 2, p. 701–721, 2022.
- NPERF. *Mapa de cobertura 5G em todo o mundo*. 2022. Disponível online em: <https://www.nperf.com/pt/map/5g>. Último acesso: 24/01/2022.
- ORDÓÑES, J. et al. Network slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, architectures and challenges. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, 03 2017.
- PEREIRA, G. et al. Speed: Uma solução inter-veicular para detectar e controlar vias congestionadas no TMS. In: *Anais do III Workshop de Computação Urbana*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 43–56. ISSN 2595-2706. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/courb/article/view/7467>.

- RANA, A.; KUMAR, A.; RANA, J. S. An overview of 4g wireless technologies. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, South Asian Academic Research Journals, v. 11, n. 10, p. 640–647, 2021.
- SHAH, S. et al. 5G for vehicular communications. *IEEE Communications Magazine*, v. 56, p. 117, 01 2018.
- SILVA, A.; SOARES, A. Controle adaptativo de semáforo com pelotões veiculares mais acurados. In: *Anais do XXXVII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2019. p. 1056–1069. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbrc/article/view/7422>).
- SOMMER, C. *Veins*. 2020. Disponível online em: <https://veins.car2x.org/documentation/>. Último acesso: 24/01/2022.
- SOUZA, K. *Estes são os países onde o 5G é mais popular*. 2021. Disponível online em: <https://exame.com/tecnologia/estes-sao-os-paises-onde-o-5g-e-mais-popular/>. Último acesso: 24/01/2022.
- TOMAR, R.; PRATEEK, M.; SASTRY, G. H. Vehicular Adhoc Network (VANET) - An Introduction. *International Journal of Control Theory and Applications*, International Science Press, v. 9, n. 18, p. 8883–8888, 2016. Disponível em: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01496806>).
- URMENETA, P. Simulation and improvement of the handover process in IEEE 802.11p based VANETs (vehicle ad-hoc networks). In: . [S.l.: s.n.], 2010.
- VIRDIS, A.; NARDINI, G. *What is Simu5G: simulator for 5G New Radio networks*. 2020. Disponível online em: <http://www.simu5g.org/index.html>. Último acesso: 24/01/2022.
- WANG, P. et al. HDMA: Hybrid D2D message authentication scheme for 5G-enabled VANET. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, p. 1–10, 08 2020.
- WEBB, A. *Utility Technology: 5G Network, 5G PPE, and Breathable FR Clothing*. 2020. Disponível online em: <https://www.mcrcsafety.com/blog/utility-technology-5g-network-5g-ppe-and-breathable-fr-clothing>. Último acesso: 26/01/2022.
- WEBER, J. S.; NEVES, M.; FERRETO, T. C. VANET simulators: an updated review. *Journal of the Brazilian Computer Society*, v. 27, p. 1–31, 2021.
- YANG, Y.; HUA, K. Emerging technologies for 5G-enabled vehicular networks. *IEEE Access*, v. 7, p. 181117–181141, 2019.