



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

EVELIN HELENA SILVA CARDOSO

**ANÁLISE DO IMPACTO DO ALGORITMO DE
ESCALONAMENTO DE RECURSOS NO DESEMPENHO DE
REDES VEICULARES UTILIZANDO O LTE COMO
TECNOLOGIA DE ACESSO**

DM: 17/2016

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

EVELIN HELENA SILVA CARDOSO

**ANÁLISE DO IMPACTO DO ALGORITMO DE
ESCALONAMENTO DE RECURSOS NO DESEMPENHO DE
REDES VEICULARES UTILIZANDO O LTE COMO
TECNOLOGIA DE ACESSO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como quesito a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, com ênfase em Computação Aplicada.

**UFPA/ITEC/PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2016**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**ANÁLISE DO IMPACTO DO ALGORITMO DE
ESCALONAMENTO DE RECURSOS NO DESEMPENHO DE
REDES VEICULARES UTILIZANDO O LTE COMO
TECNOLOGIA DE ACESSO**

AUTORA: EVELIN HELENA SILVA CARDOSO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA COM ÊNFASE EM COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM: 11/08/2016

Professor. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês - UFPA
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Professor Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Avaliador Interno – PPGEE/UFPA)

Professora Dra. Jasmine Priscyla Leite de Araújo
(Avaliadora Externa ao Programa – FCT/UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dedico este trabalho aos meus amados avós: Darci e José Mendes, Dilhermano e Aurora
Amaro (*in memoriam*).

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, por sua misericórdia e amor infinito.

Aos meus pais, Dulce e Evandro Cardoso, por todo o incentivo, sabedoria, amor e compreensão que sempre posso encontrar em seus conselhos e abraços. Ao meu irmão, Rodrigo, único e preferido, que sempre me encorajou e nunca me deixou faltar um colo amigo.

A todos os meus familiares, pela presença e apoio constante. Agradeço, especialmente, os meus tios Raimundo e Darcirema Costa, pelo acolhimento em sua casa e em suas vidas.

Ao meu prezado orientador Carlos Renato Lisboa Francês, pela confiança e gentileza com as quais sempre me recebe. Pela oportunidade de participar das atividades do Laboratório de Planejamento de Redes de Alto Desempenho (LPRAD) e pelo exemplo a ser seguido.

A todos os amigos do LPRAD, especialmente, a Flávia, Eulália, Ketyllen, Priscila, Cindy, Jorge e Delsinho, pelo carinho e companhia diária. Agradeço também todo o apoio e incentivo dos queridos Patrick, Carlose Tássio.

Aos professores do PPGEE, pela a honra de tê-los como mestres. A eles que contribuíram não somente para a minha formação técnica, mas também pessoal. A todos os colegas de mestrado, pela troca de conhecimento e apoio mútuo.

Agradeço também a todos os meus amigos pelo carinho e incentivo. Em especial, a Bruna, Suzane, Aline e Juan, companheiros para toda a vida.

Ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, e a Universidade Federal do Pará, pelo apoio financeiro e técnico, desde a graduação até os dias atuais.

“Aprender é a única coisa de que a mente nunca se cansa, nunca tem medo e nunca se arrepende.”

Leonardo da Vinci

Sumário

Lista de Abreviaturas e Siglas	VIII
Lista de Figuras	XI
Lista de Tabelas	XII
Resumo	XIII
Abstract	XIV
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Motivação	18
1.2 Objetivo	19
1.3 Organização da Dissertação	20
2. TÓPICOS EM REDES MÓVEIS VEICULARES E SISTEMAS LTE	21
2.1 Considerações Iniciais	21
2.2 Redes Móveis Veiculares.....	21
2.2.1. Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS).....	24
2.2.2. Arquitetura.....	24
2.2.3. Roteamento.....	25
2.2.4. Padrões	26
2.2.5. Canal de comunicação sem-fio.....	27
2.2.6. Segurança.....	27
2.2.7. Principais Aplicações	29
2.3 Sistemas LTE – Uma breve revisão.....	32
2.3.1. Arquitetura.....	33
2.3.2. Tecnologias de Transmissão.....	36
2.3.2.1. OFDMA	37
2.3.2.2. SC-FDMA.....	38
2.3.2.3. MIMO	39
2.3.2.4. Modulação e Codificação Adaptativa.....	41
2.3.3. Estrutura de Quadros	42
2.3.4. CLASSES de Qos e <i>Bearers</i> EPS	43
2.4 Considerações Finais	46
3. ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO DE RECURSOS EM REDES LTE ...	47
3.1 Considerações Iniciais	47
3.2 Escalonamento de recursos de rádio em sistemas LTE	47
3.2.1 Operação básica do escalonador.....	47
3.3 Algoritmos de escalonamento de recursos.....	51
3.3.1 <i>Round Robin</i>	52

3.3.2	<i>Proportional Fair</i>	53
3.3.3	<i>Throughput to Average</i>	53
3.3.4	<i>Priority Set</i>	54
3.3.5	<i>Channel and QoS Aware</i>	55
3.4	Considerações Finais	56
4.	TRABALHOS RELACIONADOS	57
4.1	Considerações Iniciais	57
4.2	Redes Veiculares Integradas com LTE.....	58
4.3	Escalonamento de Recursos em Redes Veiculares.....	61
4.4	Considerações Finais	66
5.	ANÁLISE DO IMPACTO DO ALGORITMO DE ESCALONAMENTO DE RECURSOS NO DESEMPENHO DE REDES VEICULARES UTILIZANDO O LTE COMO TECNOLOGIA DE ACESSO	68
5.1	Considerações iniciais.....	68
5.2	Simulação.....	68
5.2.1	NS-3.....	70
5.2.2	Estudo de caso	71
5.3	Metodologia de Simulação Proposta	72
5.3.1	Estudo do Sistema	73
5.3.2	Definição do(s) objetivo(s).....	74
5.3.3	Definição do modelo do Sistema.....	74
5.3.4	Definição das métricas de desempenho.....	75
5.3.5	Definição das classes de tráfego e seus critérios de QoS	76
5.3.6	Escolha do Simulador.....	78
5.3.7	Implementação do modelo no simulador.....	79
5.3.7.1.	Integração SUMO/NS-3	79
5.3.8	Criação dos cenários	81
5.3.9	Definição da estratégia de execução.....	82
5.3.10	Execução dos experimentos	82
5.3.11	Análise e interpretação dos resultados.....	83
5.4	Análise dos Resultados	84
5.5	Considerações Finais	94
6.	CONCLUSÃO	95
6.1	Contribuições da Dissertação.....	96
6.2	Trabalhos Futuros	97
6.3	Dificuldades Encontradas	98

Referências	100
ANEXO A -<i>Script</i> para a criação do modelo da rede.....	109

Lista de Abreviaturas e Siglas

3G	Terceira Geração de Telefonia Móvel
4G	Quarta Geração de Telefonia Móvel
5G	Quinta Geração de Telefonia Móvel
3GPP	Third Generation Partnership Project
AMC	Adaptative Modulation and Coding
BET	Blind Equal Throughput
BLER	Block Error Rate
CA	Certification Authority
CAM	Cooperative Awareness Messages
CDMA	Code Division Multiple Access
CQA	Channel and QoS Aware
CQI	Channel Quality Indicator
C-RNTI	Cell Radio Network Temporary Identifier
D2D	Device To Device
DCI	Data Control Indication
DENM	Decentralized Environmental Notification Messages
DFT	Discrete Fourier Transform
DL-SCH	Downlink Scheduler
DRX	Discontinuous Reception
ELP	Electronic License Plate
eNB	Enhanced NodeB
EPC	Evolved Packet Core
EPS	Evolved Packet System
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
FCD	Floating Car Data
FD	Frequency Domain
FDD	Frequency Division Duplex
GBR	Guaranteed Bit Rate
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile
H2H	Human To Human
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest
HSS	Home Subscriber Server
I2V	Infrastructure to Vehicle
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardization
ITS	Intelligent Transportation System

LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MAC	Media Access Control
MANET	Mobile Ad-hoc Networks
MCS	Modulation and Coding Scheme
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
NS-3	Network Simulator
OBU	On-Board Unit
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCRF	Policy and Charging Resource Function
PDCCH	Physical Downlink Control CHannel
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PF	Proportional Fair
P-GW	Packet Data Network Gateway
PSS	Priority Set
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RLC	Radio Link Control
RNC	Radio Network Controller
RR	Round Robin
RRC	Radio Resource Control
RRC	Radio Resource Control
RSU	Road Side Unit
SAE	System Architecture Evolution
SC-	
FDMA	Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access
SCS	Scheduling Candidate Set
S-GW	Serving Gateway
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SR	Scheduling Request
SUMO	Simulation of Urban Mobility
TB	Transport Block
TCP	Trasnmission Control Protocol
TD	Time Domain
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TTA	Throughput to Average
TTI	Trasnmission Time Interval

TTI	Transmission Time Interval
UE	User Equipment
UL-SCH	Uplink Scheduler
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
V2I	Vehicle To Infrastructure
V2V	Vehicle To Vehicle
VANET	Vehicular Ad-hoc Network
VoIP	Voice over Internet Protocol
WAVE	Wireless Access in Vehicular Environments

Lista de Figuras

Figura 1. Mapa <i>mundi</i> do congestionamento.....	21
Figura 2. Arquitetura VANET.....	25
Figura 3. Protocolos de roteamento para VANET.....	26
Figura 4. Arquitetura básica do LTE.....	34
Figura 5. Arquitetura completa do LTE.....	35
Figura 6. Disposição das portadoras na modulação FDM e OFDM.	37
Figura 7. OFDMA no domínio do tempo e da frequência.....	38
Figura 8. Transmissão utilizando OFDMA x SC-FDMA.....	39
Figura 9. MIMO utilizando a configuração 2x2.....	40
Figura 10. Exemplo da estrutura de um quadro LTE.	42
Figura 11. Tipos de <i>Bearers</i> em redes LTE.....	45
Figura 12. Transmissão uplink.	48
Figura 13. Operação genérica do escalonador de recursos.....	50
Figura 14. Classificação geral dos algoritmos.....	51
Figura 15. Fluxograma da metodologia proposta.	73
Figura 16. Tráfegos da rede.	77
Figura 17. Diagrama da integração SUMO/NS-3.	78
Figura 18. <i>Layout</i> da rede, <i>Manhattan Grid 5x5</i>	80
Figura 19. Justiça – tráfegos (a) <i>uplink</i> e (b) <i>downlink</i> da rede.....	85
Figura 20. Vazão – tráfegos (a) <i>uplink</i> e (b) <i>downlink</i> da rede.....	87
Figura 21. Eficiência Espectral – tráfegos (a) <i>uplink</i> e (b) <i>downlink</i> da rede.....	88
Figura 22. Atraso – tráfegos (a) <i>uplink</i> e (b) <i>downlink</i> da rede.	89
Figura 23. Razão de Perda de Pacotes – tráfegos (a) <i>uplink</i> e (b) <i>downlink</i> da rede.....	89

Lista de Tabelas

Tabela 1. Principais projetos na área de ITS.	23
Tabela 2. Principais tecnologias sem fio utilizadas em VANET.....	28
Tabela 3. Aplicações veiculares e suas características	31
Tabela 4. Características dos principais sistemas móveis celulares	32
Tabela 5. Parâmetros utilizados na transmissão <i>downlink</i>	43
Tabela 6. Valores do QCI padronizados para o LTE.....	44
Tabela 7. Notações para as métricas de escalonamento.	52
Tabela 8. Síntese dos principais Trabalhos Correlatos.	63
Tabela 9. Parâmetros da Simulação.	81
Tabela 10. Resumo dos Resultados - <i>Uplink</i>	90
Tabela 11. Resumo dos Resultados - <i>Downlink</i>	91

Resumo

Sistemas de Transporte Inteligentes são as diversas tecnologias de informação e comunicação aplicadas no domínio dos transportes veiculares. Tais sistemas são chamados inteligentes devido à sua capacidade de memória, sensoriamento, comunicação, tratamento de informação e comportamento adaptativo. Dentro deste universo, encontram-se as redes veiculares *ad-hoc* (VANET), que fornecem comunicação entre veículos, bem como a infraestrutura de telecomunicações ao longo das vias. Para fornecer conectividade contínua com altas taxas de dados e baixa latência, a integração de redes móveis veiculares com as redes LTE é apontada como potencial solução de acesso. Muitos são os desafios encontrados para atingir os requisitos de QoS característicos das aplicações de entretenimento, segurança nas estradas e eficiência do tráfego. Neste sentido, esta dissertação propõe uma metodologia para o estudo do impacto dos algoritmos de escalonamento de recursos de rádio em redes veiculares, utilizando o LTE como tecnologia de acesso. Este estudo utiliza uma abordagem de simulação discreta, com o uso das ferramentas NS-3 e SUMO para avaliar cinco algoritmos de escalonamento: RR, PF, TTA, CQA e PSS. Os critérios utilizados na avaliação são vazão, atraso, perda de pacotes, eficiência espectral, justiça e análise qualitativa da complexidade computacional. Os resultados apontam que, para redes veiculares, os algoritmos mais apropriados são aqueles que garantem um alto nível de justiça entre os veículos conectados. As análises também confirmam a necessidade de utilização de algoritmos mais específicos, baseados no padrão de geração de dados desses tipos de aplicação, a fim de garantir um melhor desempenho para a rede.

Palavras-Chave: VANET, LTE, escalonamento de recursos, metodologia, simulação

Abstract

Intelligent Transport Systems are several information and communication technologies applied to vehicular transportation. It is called intelligent due to its memory capacity, sensing, communication, information processing and adaptive behavior. Within this universe, the Vehicular Ad-hoc Networks (VANET) provide communication between vehicles, as well as the telecommunications infrastructure over the roads. In order to achieve connectivity continues with high data rate and low latency, the integration of vehicular networks with LTE system is pointed as a potential access technology solution. There are many challenges found to reach the QoS requirements characteristic of entertainment applications, road safety and traffic efficiency. Therefore, this dissertation proposes a methodology for the study of the impact of radio resource scheduling algorithms for vehicular networks using LTE as the access technology. This study uses a discrete simulation approach, carried out with NS-3 and SUMO tools, to evaluate five scheduling algorithms: RR, PF, TTA, CQA and PSS. The criteria used in the analysis are throughput, delay, packet loss, spectral efficiency, fairness and qualitative analysis of computational complexity. The results indicate for vehicular networks is more appropriate to apply strategies that guarantee high level of fairness between connected vehicles. The evaluation also confirm the need to use algorithms more specific, taking into account the data generation pattern of these kind of application, with the aim to ensure the best performance for the network.

Key-words: VANET, LTE, resource scheduling, methodology, simulation.

1. INTRODUÇÃO

A rede celular é a rede móvel mais popular e acessível na atualidade e fornece um serviço estável e constante sob a maioria dos tipos de mobilidade. O aumento da diversidade de serviços e a facilidade de acesso são fatores que contribuem para o crescimento contínuo do número de usuários de comunicações móveis. A fim de atender essa demanda crescente de serviços de banda larga móvel, o *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) especificou a tecnologia *Long Term Evolution* (LTE). Segundo [3GPP, 2016], o projeto do LTE foi iniciado em 2004, porém os seus serviços só começaram a ser comercializados em 2009. As primeiras versões comerciais do LTE fazem parte das especificações do *Release 8* do 3GPP. O LTE é uma tecnologia de comunicação que oferece altas taxas de dados e um dos serviços que podem ser suportados por este tipo de rede são os que se referem às aplicações veiculares.

Para [ALIEIEV; KWOCZEK; HEHN, 2015], o uso de redes sem fio para fins de comunicação veicular tem se tornado cada vez mais importante para oferecer aplicações de segurança, suporte à condução de automóveis, entretenimento, bem como para controle e eficiência do tráfego nas cidades. Segundo [TUNG; GERLA, 2013], para suportar estes tipos de aplicação, cada veículo na rede transmite, uns para os outros, pequenos pacotes de dados chamados CAMs (*Cooperative Awareness Messages*), também conhecidas como *beacons*, à uma frequência que pode variar de 1 a 10 Hz, provendo informações tais como velocidade, localização, dentre outras. Essas informações são coletadas nos veículos por diferentes sensores, câmeras e computadores de bordo, responsáveis por detectar as condições da estrada, estado do veículo, condições meteorológicas, proximidade, limites de velocidade, radares e etc, com o objetivo de ajudar o motorista a tomar decisões e a contribuir para um tráfego mais eficiente e seguro.

A fim de evitar colisões, por exemplo, as estações fixas ao longo das estradas recebem essas mensagens vindas dos veículos e aplicam algoritmos apropriados a fim de identificar potenciais padrões de acidentes e enviar mensagens de aviso aos veículos em perigo. Por oferecer boa comunicação e uma vasta cobertura, o LTE aparece, dentro deste contexto, como uma alternativa para prover a infraestrutura de comunicação necessária para o estabelecimento dessa rede.

De maneira geral, as redes veiculares, também conhecidas como VANETs (*Vehicular Ad-hoc Network*), são redes nas quais os veículos se comunicam entre si e com pontos de acesso ao longo das vias [ELTAHIR; SAEED; MOKHTAR, 2014]. Em outras palavras,

uma VANET é uma rede na qual os nós móveis são veículos e criam uma conexão do tipo *ad-hoc*.

Segundo [MARQUES, 2014], para transformar o carro num nó da rede é necessário que exista no veículo unidades *on-board* (OBU, *On-Board Unit*), responsáveis pela recepção e transmissão das mensagens na rede. O padrão IEEE 802.11p, proposto em 2007, foi criado para adicionar acesso sem fio em ambientes veiculares e ficou conhecido como WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) [EICHLER, 2007]. Conforme [IEEE 802.11p, 2016], a capacidade nativa de suportar comunicação V2V (*Vehicle To Vehicle*), a facilidade de implementação e o baixo custo são algumas características que fazem deste padrão o mais utilizado para comunicação veicular.

Apesar de muitas vantagens, o padrão IEEE 802.11p apresenta problemas com escalabilidade, atraso e qualidade de serviço, além de recursos limitados de rádio. É dentro deste contexto que muitos estudos apontam o LTE como solução de acesso. Além disso, [ARANITI et al., 2013] também destaca que o uso das redes móveis celulares para atender o tráfego veicular pode abrir novas oportunidades de mercado para as operadoras de telecomunicações e fornecedores de serviços.

São muitos os benefícios que podem ser proporcionados pela consolidação das redes veiculares, sejam eles sociais e econômicos, tais como a redução do número de acidentes nas estradas, diminuição do tempo de viagem, estratégias de logística por parte da gerência do tráfego nas cidades, que poderão contar com informações atualizadas e dinâmicas sobre as condições de tráfego, entre outros. [Barros, 2014], no entanto, enfatiza a existência de mais de 1 bilhão de automóveis no mundo todo e, mesmo sabendo que a inserção completa desses veículos na internet deve acontecer de maneira gradual, ressalta que a introdução desse tráfego não era inicialmente esperado pelas redes celulares atuais e que, portanto, são muitos os desafios a serem superados para que os novos requisitos de qualidade exigidos por este tipo de aplicação sejam bem atendidos.

Assim, de uma maneira geral, a solução de comunicação veicular deve ser bastante flexível, a fim de atender os diferentes tipos de fluxos da rede, sejam eles H2H (*Human To Human*), V2V (*Vehicle To Vehicle*) e V2I (*Vehicle To Infrastructure*). Nesse sentido, [ALIEIEV; KWOCZEK; HEHN, 2015] salienta que a comunicação entre veículos é particularmente desafiadora devido à volatilidade das conexões e às constantes mudanças nas condições de canal dos veículos, graças à alta mobilidade dos mesmos, e que, portanto, é de suma importância utilizar um sistema de comunicação robusto, capaz de se adaptar às

mais diferentes situações de carga. Além deste requisito mais geral, é preciso ainda atender as exigências relacionadas à latência, confiabilidade e taxa de dados.

1.1 Motivação

Um dos grandes desafios das redes LTE atuais em atender as demandas oriundas das redes veiculares é decorrente da sua infraestrutura centralizada, na qual todas as mensagens passam pelo núcleo da rede antes de serem encaminhadas aos seus nós de destino, o que, principalmente em redes bastante densas, pode acarretar em problemas quanto ao atendimento dos requisitos de atraso. Vale ressaltar, porém, que a comunicação D2D (*Device To Device*) já foi proposta no *Release 12* do LTE e está emergindo como uma tecnologia chave para suportar aplicações de segurança e eficiência do tráfego em redes veiculares [ASADI; WANG; MANCUSO, 2014][PIRO et al., 2015].

Portanto, ao se considerar a arquitetura centralizada característica das redes LTE atuais, a política de escalonamento de recursos se revela crucial e é um dos principais desafios dentro deste contexto multitráfego. O escalonamento de recursos refere-se à atividade de alocação de recursos de rádio necessários para a transmissão de dados para os equipamentos de usuário (UE, *User Equipment*) e é realizado a cada intervalo de tempo de transmissão (TTI, *Trasmission Time Interval*) pelos algoritmos de escalonamento de recursos [DAHLMAN; PARKVALL; SKOLD, 2011].

Apesar de muitos trabalhos acerca da integração VANET-LTE já terem sido propostos, nota-se uma carência de estudos que investiguem o impacto da política de escalonamento na eNB na qualidade de serviço das aplicações nessas redes. Vale ressaltar que os algoritmos de escalonamento tradicionais do LTE foram originalmente criados para atender os requisitos das comunicações H2H. Diante disso, é de grande valia investigar como a aplicação destes algoritmos podem influenciar no desempenho das redes LTE veiculares. Deseja-se assim, não apenas fomentar a discussão sobre a integração das redes LTE como solução de acesso para redes veiculares, mas também identificar os possíveis pontos de robustez e fragilidade da rede quando aplicadas diferentes estratégias de escalonamento e identificar quais os tipos de algoritmos são mais adequados para este tipo de cenário.

1.2 Objetivo

Esta dissertação possui como objetivo precípuo propor uma metodologia para avaliação do impacto da política de escalonamento de recursos de rádio no desempenho de redes veiculares utilizando o sistema LTE como solução de acesso. A metodologia proposta é composta de 11 etapas, descritas ao longo deste trabalho, e é capaz de dar subsídios não só para este tipo de avaliação particular, mas também pode ser generalizada e aplicada em diversos outros problemas que possam ser modelados e avaliados por meio de simulação.

Para melhor entender o contexto deste estudo, primeiro são descritas algumas fundamentações teóricas sobre as VANETs, o sistema LTE e o processo de escalonamento de recursos de rádio. Quanto às VANETs e o sistema LTE, são abordados os principais conceitos, padrões, tecnologias de transmissão e arquitetura dessas redes. Quanto ao processo de escalonamento de recursos são apresentadas os conceitos básicos e as entidades envolvidas, bem como apresentam-se as estratégias dos algoritmos avaliados neste trabalho.

O presente estudo avalia cinco algoritmos escalonadores de recursos, são eles: *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF), *Throughput to Average* (TTA), *Priority Set* (PSS) e *Channel and QoS Aware* (CQA). Estes algoritmos, por sua vez, podem ser classificados em três categorias: não baseados em canal (RR), baseados em canal (PF e TTA) e baseados em canal e qualidade de serviço (PSS e CQA). Os desempenhos desses algoritmos são analisados por meio de critérios que avaliam justiça na distribuição de recursos, vazão de dados, eficiência espectral, atraso, perda de pacotes e complexidade computacional. São utilizadas aplicações de entretenimento, a partir da geração de tráfego de vídeo no sentido *downlink* da rede e também aplicação de segurança/eficiência de tráfego, por meio de mensagens CAMs no sentido *uplink*. O estudo se baseia em simulações computacionais, no qual se utiliza a ferramenta NS-3 (*Network Simulator*) [NS-3, 2016] para prover a dinâmica de rádio do sistema LTE e as rotas e padrões de movimentação dos veículos são gerados utilizando o *software* SUMO (*Simulation of Urban MObility*) [DLR, 2016]. A reprodução da rede VANET-LTE por meio de simulação visa contribuir no processo de validação da análise comparativa dos algoritmos de escalonamento de recursos de rádio avaliados nesta dissertação.

Apesar da integração VANET-LTE já ter sido alvo de muitos trabalhos, trata-se de um tema bastante plural e aberto, com um enorme potencial de pesquisa. Este estudo surge justamente da escassez de trabalhos na literatura no que se refere à investigação do impacto das políticas de escalonamento de recursos na estação rádio base. Os resultados obtidos por

meio desta metodologia reforçam a necessidade da criação de algoritmos mais específicos no que se refere às aplicações veiculares e acentuam que a simples utilização de algoritmos tradicionalmente utilizados na comunicação H2H pode não representar a melhor solução para a rede, sobretudo quanto ao canal *uplink*, no qual esta escolha se torna ainda mais crucial, principalmente em redes mais densas.

Espera-se, portanto, com este trabalho apresentar direções de estratégias de escalonamento que ajudem no desenvolvimento de novos algoritmos que melhor se adequem a este tipo de padrão de transmissão, a fim de melhorar a experiência obtida tanto para os usuários da rede quanto para as operadoras do sistema. Vale ressaltar ainda que não se pretende apontar soluções definitivas para o problema, mas, notadamente, contribuir para o aperfeiçoamento e evolução das diversas discussões a respeito do tema.

1.3 Organização da Dissertação

Este documento está dividido como segue:

- Capítulo 2: Neste capítulo é realizada uma revisão a respeito dos principais conceitos acerca das redes veiculares e do sistema LTE, bem como apresenta as tecnologias envolvidas, os padrões e requisitos das aplicações, provendo as informações necessárias para a boa compreensão do estudo realizado.
- Capítulo 3: Neste capítulo são introduzidos os conceitos fundamentais quanto ao escalonamento de recursos de rádio em redes LTE e apresenta as estratégias de cada um dos cinco algoritmos avaliados neste trabalho, bem como suas categorias.
- Capítulo 4: Apresentam-se os trabalhos relacionados ao estudo de caso desta dissertação, abordando-se, sobretudo, os desafios técnicos associados à integração das redes LTE como solução para redes veiculares.
- Capítulo 5: Este capítulo traz a metodologia proposta e o estudo de caso realizado. São apresentadas também as ferramentas de simulação e cada uma das etapas da metodologia é descrita de forma detalhada. Na parte final deste capítulo, são feitas as análises dos resultados obtidos, bem como as principais considerações.
- Capítulo 6: Neste capítulo, são feitas as considerações finais sobre os temas abordados na proposta do trabalho, apontando as dificuldades encontradas e os possíveis desdobramentos em trabalhos futuros.

2. TÓPICOS EM REDES MÓVEIS VEICULARES E SISTEMAS LTE

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo é realizada uma revisão a respeito dos principais conceitos acerca das redes veiculares e do sistema LTE. São apresentadas as tecnologias envolvidas, os padrões e requisitos das aplicações, provendo ao leitor as informações necessárias para a boa compreensão do estudo realizado.

2.2 Redes Móveis Veiculares

Muitas tecnologias têm sido implantadas para assistir e gerenciar os sistemas de transporte rodoviário, visando melhorar o tráfego nas estradas, sobretudo, nos grandes centros urbanos, onde se verificam diariamente grandes áreas de congestionamento. Segundo o relatório *TomTom Traffic Index 2016*, feito pela empresa TomTom City, que avalia a situação do congestionamento de trânsito em 295 cidades de 38 países em seis continentes, divulgado em março de 2016, três capitais brasileiras aparecem na lista das 10 cidades que mais sofrem com o trânsito: Rio de Janeiro, Salvador e Recife. Segundo o relatório, em Salvador, os motoristas gastam em torno de 160 horas a mais, por ano, do que o tempo estimado para o trajeto. No Rio de Janeiro, esse gasto é de 165 horas a mais por ano. A Figura 1 traz a média do tempo gasto além do estimado em condições de trânsito livre em várias cidades do mundo.

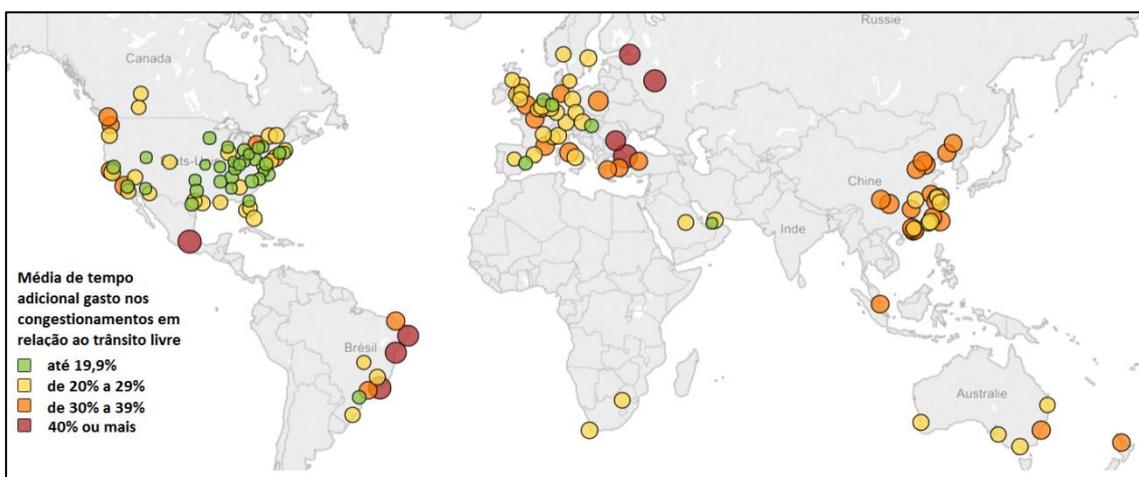


Figura 1. Mapa *mundi* do congestionamento. Fonte: https://www.tomtom.com/pt_br/trafficindex/

Ainda sobre o resultado do relatório de trânsito nas cidades, segundo Marcelo Fernandes, diretor de Operações da TomTom City para América Latina, “o primeiro passo para superar esta situação é entender porque esse tipo de trânsito é gerado em determinados lugares, e, depois, fazer um planejamento urbanístico, oferecer mais corredores e até informar os horários em que os ônibus passam”. Portanto, prover informações a respeito da dinâmica do tráfego, em tempo real, é fundamental, tanto para os motoristas e, principalmente, para os profissionais envolvidos na gestão do tráfego, que poderão, assim, tomar decisões a fim de evitar atrasos na estrada e reduzir os congestionamentos.

Nos próximos anos, o número de veículos conectados nas ruas deverá aumentar devido ao surgimento da direção semi-automatizada e da direção altamente automatizada. Segundo a reportagem de 30 de março de 2016 do IT Forum 365, a Embratel, uma das maiores empresas de telecomunicações do Brasil, lançou, neste mesmo mês, uma solução para carros conectados através da comunicação M2M/IoT (*Machine to Machine/Internet of Things*). O recurso permite, por exemplo, que o motorista solicite à central da montadora o acompanhamento do seu percurso em casos de rotas perigosas ou viagens. Se a central notar que houve desvio ou parada inesperada, a tecnologia possibilita que a mesma entre rapidamente em contato com o motorista para prestar ajuda. Outra funcionalidade é o oferecimento de informações sobre a meteorologia, condições de tráfego, assistência técnica, notícias, atrações, busca de endereços, dentre outras funções. A General Motors já está utilizando a tecnologia em automóveis brasileiros nos modelos Médio Cruze 2016 e no novo Cobalt da Chevrolet. Já a Volvo aplicou a solução no modelo XC60.

O desenvolvimento de *software* e *hardware* para coleta de dados e comunicação dentro dos veículos conduziu à geração de novas redes, as chamadas redes veiculares, que proveem comunicação entre veículos. Dentre os objetivos dessas redes, pode-se destacar a redução do número de acidentes e a otimização do tempo de viagem. A comunicação veicular é uma área importante e emerge dos esforços por parte da academia e da indústria na área da tecnologia veicular. Muitos projetos já foram implementados pelo governo e muitas vezes contam com o apoio da iniciativa privada, sobretudo, nos Estados Unidos, União Européia e Japão, [NEO, 2016]. A Tabela 1 traz o resumo de alguns destes projetos.

Tabela 1. Principais projetos na área de ITS.

Nome do Projeto	Local	Período	Breve descrição
<i>Vehicle-to-Vehicle Communications</i>	Estados Unidos	Desde 2009	É um comitê apoiado pelo <i>U.S. Department of Transportation's</i> (DOT), formado para melhorar a segurança e a mobilidade nas estradas. O objetivo é facilitar e contribuir para a implementação da comunicação V2V dentro dos Estados Unidos (mais informações, acessar http://www.safercar.gov/v2v/index.html).
<i>SAFE TRIP-21, Safe and Efficient Travel through Innovation and Partnerships in the 21st Century</i>	Estados Unidos	Desde 2008	É uma iniciativa do <i>U.S. Department of Transportation's</i> (DOT), <i>Research and Innovative Technology Administrations</i> (RITA) e <i>Volpe National Transportation Systems Center</i> . O objetivo do projeto é desenvolver estratégias que venham a melhorar a segurança e a eficiência nas estradas, além da redução do consumo de combustível e dos impactos ambientais (mais informações, acessar https://www.rita.dot.gov/sites/default/files/rita_archives/rita_publications/horizons/2008_05_06/html/introducing_safe_trip_21.html).
<i>WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments)</i>	Estados Unidos	Desde 2004	É um conjunto de normas desenvolvido pelo IEEE para comunicações veiculares. Foi lançado em 2004, é um projeto ativo e tornou-se referência para os demais projetos de comunicação veicular e sistemas de transporte inteligentes (mais informações, acessar https://standards.ieee.org/findstds/standard/1609.0-2013.html).
<i>Car-to-Car Communications Consortium</i>	União Européia	Desde 2001	É uma organização sem fins lucrativos, patrocinada por vários fabricantes de automóveis europeus, aberta para organizações de pesquisa, fornecedores de equipamentos e outros parceiros. O objetivo é melhorar a assistência aos condutores de veículos e ajudar na implantação de aplicações de segurança nas estradas (mais informações, acessar http://www.car-to-car.org).
<i>VICS (Vehicle Information and Communication System)</i>	Japão	Desde 1990	É um sistema japonês de informação e comunicação veicular, cujo objetivo é proporcionar assistência para uma condução mais segura e aumentar a eficiência na gestão rodoviária, além de propor estratégias comerciais voltadas para este mercado (mais informações, acessar http://www.vics.or.jp/en/vics/index.html).
<i>JARI (Japan Automobile Research Institute)</i>	Japão	Desde 1969	É uma organização sem fins lucrativos apoiada por mais de 200 organizações da indústria automobilística, elétrica e outras. Sua missão é investigar problemas comuns da indústria de automóveis, tais como segurança e sistemas de transporte inteligentes (mais informações, acessar http://www.jari.or.jp/tabid/200/Default.aspx?language=en-US).
<i>C & D (Connect & Drive)</i>	União Européia	2008-2011	É um projeto financiado pelo <i>High Tech Automotive System</i> (HTAS), na Holanda. Seu objetivo é desenvolver novos veículos equipados com sistemas ADA a fim de melhorar a eficiência do tráfego nas cidades e a segurança (mais informações acessar https://www.utwente.nl/ctw/aida/news/Connect%26Drive%20final%20Demo/).
<i>Network on Wheels</i>	União Européia	2004-2010	É uma iniciativa de grandes fabricantes da indústria automotiva europeia e apoiado pelo Ministério Federal de Educação e Pesquisa da Alemanha. O objetivo é solucionar questões técnicas chaves para protocolos de comunicação e segurança para comunicação V2V (mais informações, acessar https://dsn.tm.kit.edu/english/projects_now-project.php).
<i>SEVECOM (SEcure VEHICLE Communication)</i>	União Européia	2006-2009	Projeto financiado pela União Européia, cujo objetivo é fornecer definições completas acerca da implementação de requisitos de segurança para comunicação veicular (mais informações, acessar http://www.sevecom.com).
<i>Carlink Consortium "Wireless Traffic Service Platform for Linking Cars Project"</i>	União Européia	2006-2008	O objetivo do projeto é desenvolver uma plataforma de serviço de tráfego sem fio inteligente entre veículos, suportado por transceptores sem fio ao longo de estradas. As principais aplicações estão relacionadas à gestão do tráfego, difusão de informações, informações meteorológicas (mais informações, acessar http://carlink.lcc.uma.es/).

As VANETs são um subconjunto das MANETs (*Mobile Ad-hoc Networks*), nas quais a comunicação se dá, sobretudo, entre veículos. Segundo [FUENTES; GONZÁLEZ-TABLAS, 2011], o que diferencia as VANETs das MANETs são aspectos tais como a alta mobilidade dos nós e a dinâmica das mudanças na topologia da rede. A VANET é uma rede que provê serviços de Sistema de Transporte Inteligente (ITS, *Intelligent Transportation System*) aos usuários finais, a fim de garantir um intercâmbio rápido de dados e segurança [BHOI; KHILAR, 2014].

Recentemente, muitas pesquisas e realizações têm sido feitas a respeito das VANETs, sobretudo no que se refere às questões tais como roteamento, transmissão, segurança, gestão do tráfego e na fusão de informações [ZHANG et al., 2013][PETIT et al., 2015]. O desenvolvimento de padrões para comunicação V2I e V2V está em pleno progresso. Ainda segundo [PETIT et al., 2015], as maiores atividades no setor envolvem o IEEE 802.11p, o grupo de trabalho IEEE 1609 [IEEE, 2016], o comitê técnico ETSI on ITS[ETSI, 2016a] e também o ISO 204 [ISO, 2016]. A seguir, alguns dos principais tópicos em redes móveis veiculares segundo [BHOI; KHILAR, 2014], [BISWAL, 2014], [AL-SULTAN et al., 2013], [KARAGIANNIS et al., 2011] e [PAPADIMITRATOS et al., 2009]:

2.2.1. Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS)

Em Sistemas de Transporte Inteligentes, os veículos atuam como emissor, receptor e roteador na difusão de informações. Nas redes veiculares, existem basicamente dois tipos de comunicação: veículo para veículo (V2V) e veículo para infraestrutura/infraestrutura para veículo (V2I/I2V), como pode ser visto na Figura 2. A transmissão de dados V2V é feita em modo *broadcasting/multicasting*. A comunicação V2V consiste de dois tipos: *naïve* e *inteligente*. O primeiro produz *beacons* em intervalos regulares e sua principal desvantagem é a colisão de mensagens, devido à alta geração de mensagens. Já o segundo gera mensagens apenas eventualmente, diminuindo assim as chances de colisão de mensagens. A comunicação V2I é do tipo *single-hop*, no qual a RSU (*Road Side Unit*) transmite mensagens aos veículos dentro da sua área de cobertura.

2.2.2. Arquitetura

No geral, três entidades formam a arquitetura de uma VANET: veículos, RSU e Infraestrutura. A comunicação entre eles é feita, principalmente, utilizando tecnologia sem

fio. A RSU atua como um roteador e é responsável por transmitir/receber mensagens aos veículos e tem raio de cobertura maior do que o raio de alcance dos veículos. Para prover a comunicação de/para veículos são instaladas as unidades *on board* (OBU), que são transceptores, ou seja, transmitem e recebem mensagens através do acesso às tecnologias de comunicação (802.11p WAVE, Wi-Fi, celular, infravermelho, *bluetooth*, etc), além do GPS (*Global Positioning System*), a fim de fornecer as informações de posicionamento dos veículos, e da ELP (*Electronic License Plate*). Esta última é uma licença eletrônica instalada pelas montadoras em cada novo veículo, que providencia um número de identificação para o mesmo para identificá-lo em qualquer lugar, suportada via rádio frequência. A *Certification Authority* (CA) também se faz presente nesta arquitetura e fornece serviços tais como segurança, TCP/IP, serviços e aplicações. A Figura 2 mostra um exemplo da arquitetura VANET.

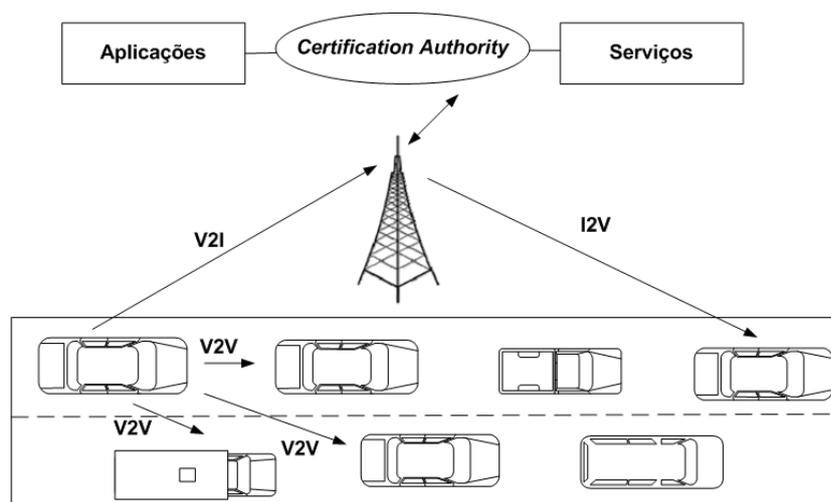


Figura 2. Arquitetura VANET, adaptado de [PAPADIMITRATOS et al., 2009].

2.2.3. Roteamento

Devido à alta mobilidade dos nós, o roteamento das mensagens não é uma tarefa fácil nessas redes. As principais questões no que tange a esta atividade estão ligadas à gestão da rede, gestão do tráfego, transmissão, mobilidade, alta mudança na topologia da rede, qualidade de serviço, alta taxas de dados e assim por diante. São muitos os protocolos já propostos e a maioria deles tem suas estratégias baseadas em topologia, posição, agrupamento, etc.

O roteamento em redes *ad-hoc* móveis é uma área de grande potencial de estudo, mas o detalhamento de cada técnica não faz parte dos objetivos desta dissertação. Muitas

abordagens podem ser encontrados em trabalhos tais como [LI; WANG, 2007], [NAGARAJ; KHARAT; DHAMAL, 2011] e [BHOI; KHILAR, 2014]. A Figura 3 apresenta a taxonomia de alguns destes protocolos.

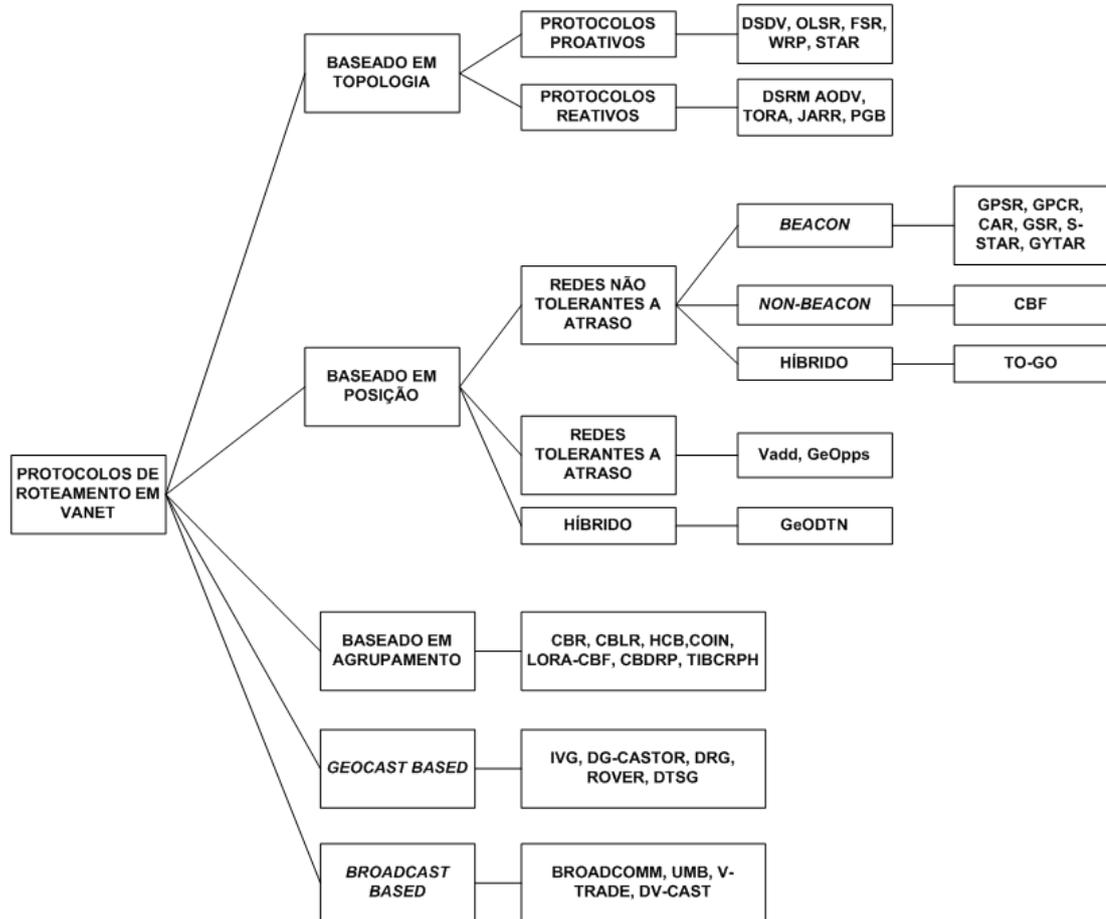


Figura 3. Protocolos de roteamento para VANET, adaptado de [BHOI; KHILAR, 2014].

2.2.4. Padrões

Os principais padrões para VANETs no que se refere às pilhas de protocolos são desenvolvidos nos Estados Unidos, União Européia e no Japão, os quais concentram as maiores indústrias automotivas. São esses países também que concentram a maioria dos projetos ativos em ITS, como pode ser observado na Tabela 1.

Nos Estados Unidos, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), através do protocolo IEEE 1609 WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*), que opera em sete canais na banda de frequência de 5.9 GHz, define a arquitetura da rede e padroniza um conjunto de serviços e interfaces que permitem uma comunicação sem fio segura, com

vazão de dados de até 27 Mbps, alcance máximo de 1000 metros e baixa latência [IEEE, 2016].

No Japão, a *Association of Radio Industries and Businesses* (ARIB) desenvolveu o STD-T109, que é o padrão para ITS na banda de 700 MHz. Em comparação com a banda de 5.8 GHz, apresenta um maior alcance e, portanto, pode atingir uma maior área de cobertura, além de uma menor perda de propagação devido ao maior comprimento de onda. Oferece baixa latência e taxas de até 18 Mbps [BISWAL, 2014].

Já na Europa, o ETSI ITS G5 é o padrão europeu para o controle de acesso físico e ao meio para Sistemas de Transporte Inteligentes. Opera na banda de frequência de 5 GHz, oferece baixa latência, alcance de até 800 m e taxas de até 12 Mbps [ETSI, 2016a].

2.2.5. Canal de comunicação sem-fio

Como visto anteriormente, nos veículos são instaladas as OBUs, responsáveis por transmitir e receber mensagens. Um veículo pode carregar várias OBUs, podendo acessar mais de um tipo de tecnologia sem fio. Cada OBU proporciona camada física, implementação dos métodos de transmissão e recepção de dados, camada de acesso ao meio, além de protocolos que regulam as várias atividades referentes a esses.

Cada tecnologia de acesso possui características específicas e, logo, também proporcionam condições diferentes no que se refere à taxa de bits, capacidade, largura de banda, atraso, entre outras. Na Tabela 2, pode ser encontrado o resumo de algumas destas características. As características do LTE serão aprofundadas ao longo desta dissertação. Quanto às demais tecnologias, mais informações podem ser encontradas na vasta documentação de cada organismo de padronização.

2.2.6. Segurança

A segurança da informação é um dos grandes desafios em VANET, já que se trata de um ambiente vulnerável, no qual as mensagens que passam de um veículo para outro podem ser interceptadas e utilizadas por pessoas mal-intencionadas. Segundo [KIM; KIM, 2013], os ataques mais comuns são: fraudes na posição e identificação dos veículos, corrompimento de mensagens, falsificação de dados, entre outros, que podem causar não só distúrbios na rede, mas também podem levar a acidentes, devido à falsos alertas ou ausência dos mesmos.

Tabela 2. Principais tecnologias sem fio utilizadas em VANET, adaptado de [ARANITI et al., 2013]

Característica	Wi-Fi	802.11p WAVE	UMTS	LTE	LTE-A
Largura de banda do canal	20 MHz	10 MHz	5 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	Até 100 MHz
Banda de Frequencia	2.4 GHz, 5.2 GHz	5.86-5.92 GHz	700-2600 MHz	700-2690 MHz	450 MHz-4.99 GHz
Taxa de Bits	6-54 Mbps	3-27 Mbps	2 Mbps	até 300 Mbps	até 1 Gbps
Alcance	até 100 m	até 1 km	até 10 km	até 30 km	até 30 km
Capacidade	Média	Média	Baixa	Alta	Muito Alta
Cobertura	Intermitente	Intermitente	Onipresente	Onipresente	Onipresente
Suporte a mobilidade	Baixa	Média	Alta	Muito alta (até 350 km/h)	Muito alta (até 350 km/h)
Suporte a QoS	<i>Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)</i>	<i>Enhanced Distributed Channel Access (EDCA)</i>	Classes QoS e seleção de <i>bearer</i>	Indicador de Classe de QoS (QCI) e seleção de <i>bearer</i>	Indicador de Classe de QoS (QCI) e seleção de <i>bearer</i>
Suporte a transmissão multicast/broadcast	<i>broadcast</i> nativo	<i>broadcast</i> nativo	por meio de MBMS (<i>Multimedia Broadcast Multicast Service</i>)	por meio de eMBMS (<i>enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service</i>)	por meio de eMBMS (<i>enhanced Multimedia Broadcast Multicast Service</i>)
Suporte a V2I	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Suporte a V2V	<i>Ad-hoc</i> nativo	<i>Ad-hoc</i> nativo	Não	Não	Potencialmente, por meio da comunicação D2D
Penetração de mercado	Alta	Baixa	Alta	Potencialmente alta	Potencialmente alta

Para [RAW; KUMAR; SINGH, 2013], os principais desafios relacionados à segurança são:

- **Autenticação:** deve haver a autenticação de todas as mensagens transmitidas de um veículo para outro e de todas as entidades envolvidas na comunicação. Cada veículo na rede deve ser autenticado pela autoridade de certificação (CA). Em redes muito densas, essa atividade pode gerar uma alta carga de sinalização e impactar no atraso da rede.
- **Informações em tempo real:** as mensagens de segurança devem ser entregues com atraso máximo de 100 ms. Para atingir essa condição, algoritmos de rápida criptografia devem ser empregados, para que a autenticação, tanto das mensagens quanto das entidades envolvidas, seja feita a tempo.

- **Responsabilidade da consistência das informações:** em redes veiculares, mesmo os nós que foram devidamente autenticados podem realizar atividades maliciosas na rede, causando acidentes e demais distúrbios. Portanto, devem ser desenvolvidos mecanismos que possam identificar e evitar essas inconsistências.
- **Baixa tolerância a erros:** alguns protocolos foram concebidos baseados em probabilidades. Devido à própria natureza da rede, as ações devem ser realizadas em um tempo muito curto. Assim, um pequeno erro no algoritmo probabilístico pode vir a causar danos.
- **Distribuição de chaves:** todos os mecanismos de segurança na rede são baseados em chaves e cada fabricante pode instalar o sistema de chaves de diferentes maneiras, tornando a gerência de chaves públicas pelo CA um grande desafio. Portanto, a distribuição eficiente de chaves entre os veículos é um dos principais desafios no desenvolvimento de um protocolo de segurança.
- **Alta mobilidade:** a capacidade computacional e o consumo de energia dos equipamentos em uma VANET são os mesmos empregados em redes com fio. No entanto, a alta mobilidade dos nós exige menos tempo de execução dos protocolos de segurança para alcançar o mesmo resultado esperado para uma rede cabeada. Assim, a concepção de protocolos de segurança deve utilizar abordagens capazes de diminuir esse tempo de execução.

2.2.7. Principais Aplicações

São três as principais categorias de aplicação em sistemas de comunicação veicular: segurança do transporte, eficiência do transporte e entretenimento. As duas primeiras são as principais motivações para o desenvolvimento dessas redes. A terceira categoria é mais recente e, apesar de já ser suportada pelas redes móveis já existentes, pode agir como uma força motriz dentro desse novo nicho de mercado. São várias as aplicações possíveis cujos objetivos perpassam por:

- O motorista é assistido, a fim de aumentar a segurança nas estradas, diminuindo os riscos de colisões e demais acidentes.
- As informações, na maioria das vezes, específicas de uma dada região, sobre o sistema de transporte e as condições de tráfego são disponibilizadas aos motoristas e aos gerentes do tráfego nas cidades, a fim de tornar o tráfego de veículos mais eficiente.

- Serviços de entretenimento podem melhorar o nível de conforto dos passageiros e motoristas, além da possibilidade de proporcionar conexões que suportem até mesmo transações profissionais, enquanto o usuário estiver dentro do veículo.

Dois principais tipos de mensagens de segurança foram padronizados, cuja transmissão de mensagens pode acontecer periodicamente ou eventualmente (*event-triggered*). Na documentação do ETSI EN 302 665 de 2010 [ETSI, 2016b], elas são chamadas de *Cooperative Awareness Messages* (CAMs) e *Decentralized Environmental Notification Messages* (DENMs).

Segundo [ARANITI et al., 2013], as CAMs, também conhecidas como *beacons*, são mensagens curtas, de até 800 bytes, enviadas por cada veículo a uma frequência que varia de 1 a 10 Hz, a fim de fornecer aos veículos vizinhos informações como presença, posição e cinemática. Já as DENMs são mensagens, geralmente, mais curtas que as CAMs, e são geradas para alertar sobre eventos potencialmente perigosos ocorridos ao longo do percurso. Ambas exigem atraso máximo de 100 ms e são entregues aos veículos de uma região específica. As CAMs são entregues aos seus veículos vizinhos (dentro da sua faixa de alcance), e as DENMs são enviadas à todos os veículos dentro da área de impacto do evento ocorrido.

A capacidade de transmissão de mensagens aos demais veículos, satisfazendo esses critérios geográficos, é chamada de *geocast* e representa, juntamente com as condições de confiabilidade/segurança e atraso, os requisitos cruciais para o suporte a estes tipos de aplicação. A Tabela 3 apresenta vários tipos de aplicações das três categorias: segurança, eficiência e entretenimento. Para cada uma das aplicações são fornecidas informações quanto à:

- **Comunicação:** determina qual o enlace sem fio é necessário: V2V, V2I, etc.
- **Tipo de mensagem:** especifica se a mensagem é do tipo periódica ou eventual, limitada por um período de tempo ou não, e etc.
- **Tipo de transmissão:** especifica o modo de transmissão da mensagem: *broadcast*, *multicast*, *unicast*/ou *geocast*.
- **Período da mensagem:** aplicável apenas para as mensagens periódicas.
- **Atraso tolerável:** máximo atraso permitido.
- **Outros requisitos:** apresenta outros requisitos tais como prioridade, precisão do posicionamento, alcance máximo recomendado, etc.

Tabela 3. Aplicações veiculares e suas características, adaptado de [PAPADIMITRATOS et al., 2009]

Aplicação	Comunicação	Tipo de Mensagem	Tipo de Transmissão	Período da Mensagem	Atraso tolerável	Outros requisitos
Luzes de freio eletrônico de emergência	V2V	eventual, limitada por um período de tempo	<i>broadcast</i>	100 ms	100 ms	alcance: 300m, alta prioridade
Aviso de veículo lento	V2V	periódica, permanente	<i>broadcast</i>	500 ms	100 ms	alta prioridade
Aviso de colisão	V2V, I2V	periódica, permanente	<i>broadcast</i>	100 ms	100 ms	localização precisa, alta prioridade
Aviso de pista perigosa	V2V, I2V	eventual, limitada por um período de tempo	<i>geocast</i>	100 ms	100 ms	alta prioridade
Aviso de violação de sinal de trânsito	V2V, I2V	eventual, limitada por um período de tempo	<i>broadcast</i>	100 ms	100 ms	alcance: 250 m, alta prioridade
Detecção de potencial batida	V2V	periódica	<i>broadcast, unicast</i>	100 ms	50 ms	alcance: 50 ms, média/alta prioridade
Aviso de mudança de faixa	V2V	periódica	<i>broadcast</i>	100 ms	100 ms	relativa acurácia na posição: até 2 m; alcance: 150 m
Aviso cooperativo de colisão frontal	V2V	periódica, eventual	<i>broadcast, unicast</i>	100 ms	100 ms	relativa acurácia na posição: até 1 m; alcance: 150 m
Controle adaptativo de cruzeiro	V2V	periódica	<i>broadcast, unicast</i>	500 ms	101 ms	média prioridade
Gerenciamento cruzamento	V2V, I2V	periódica	<i>broadcast, unicast</i>	100 ms	500 ms	acurácia na posição: < 5 m
Aviso de retorno e acesso limitado	V2V, I2V	periódica	<i>broadcast</i>	100 ms	500 ms	baixa/média prioridade
Diagnóstico remoto/ Aviso de reparo	V2V, I2V	eventual	<i>broadcast, unicast</i>	1000 ms	200 ms	acesso a internet
Download de mídias	I2V	sob demanda	<i>broadcast, unicast</i>	-	500 ms	acesso a internet
Download/atualização de mapas	V2V, I2V	sob demanda	<i>broadcast, unicast</i>	1000 ms	500 ms	acesso a internet, disponibilidade de serviço
Assistência de condução ecológica	V2V, I2V	sob demanda	<i>broadcast, unicast</i>	1001 ms	500 ms	acesso a internet, disponibilidade de serviço

Muitas tecnologias de acesso sem fio têm sido usadas para suportar as diferentes aplicações V2V e V2I, como já visto na Tabela 2. As tecnologias mais utilizadas são: IEEE

802.11p e seu correspondente europeu ITS-G5, Wi-Fi, e tecnologias celulares, nas quais o sistema LTE aparece como a solução mais indicada. Nesta dissertação, as redes veiculares implementadas e avaliadas utilizam o sistema LTE como tecnologia de acesso. A seguir, é apresentada uma breve revisão acerca deste sistema de comunicação.

2.3 Sistemas LTE – Uma breve revisão

O desenvolvimento das comunicações móveis tem sido tradicionalmente visto como uma sequência de gerações. Conforme já comentado, o LTE é uma tecnologia de redes móvel celular que possui uma arquitetura de rede toda baseada em IP. Conforme pode ser visto na Tabela 4, quando comparado aos principais padrões celulares anteriores, o LTE é capaz de proporcionar melhor utilização dos recursos de rádio e, portanto, maior eficiência espectral.

Tabela 4. Características dos principais sistemas móveis celulares, adaptado de [ALI-YAHIYA, 2011].

Geração	2G			3G			4G	
Tecnologia	GSM	GPRS	EDGE	WCDMA	HSPA	HSPA+	LTE Rel. 8	LTE- <i>Advanced</i> Rel. 10
Taxa de pico Downlink	14,4 Kbps	114 Kbps	384 Kbps	2 Mbps	7,2/14,4 Mbps	21/42 Mbps	300 Mbps	1 Gbps
Taxa de pico Uplink	-	-	473,6 Kbps	474 Kbps	5,76 Mbps	7,2/11,5 Mbps	75 Mbps	500Mbps
Tamanho do Canal (MHz)	0,2	0,2	0,2	5	5	5	20	100
Latência (ms)	500	500	300	250	~70	~ 30	~ 10	< 5

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 75 Mbps no *uplink*, mas

ainda não apresenta os requisitos esperados para a quarta geração móvel celular [ALI-YAHIYA, 2011]. Já o *Release 10*, lançado em 2012, também chamado *LTE-Advanced* (LTE-A), é considerado o autêntico 4G, com taxas de pico de 1 Gbps no *downlink* e 500 Mbps no *uplink*.

As redes LTE oferecem um rico conjunto de características, uma grande flexibilidade em termos de opções de implantação e potenciais ofertas de serviços. Segundo [3G Americas, 2010], algumas das características mais importantes do LTE são:

- Sua arquitetura é totalmente baseada em IP com comutação de pacotes.
- Possui suporte para inter-operação e coexistência com os padrões antigos (GSM/UMTS, CDMA2000, etc.).
- Utiliza a tecnologia de acesso múltiplo *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access* (OFDMA) no *downlink*.
- Utiliza a tecnologia de acesso múltiplo *Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access* (SC-FDMA) no *uplink*.
- Suporta a duplexação por divisão de tempo (TDD, *Time Division Duplex*), e a duplexação por divisão de frequência (FDD, *Frequency Division Duplex*).
- A rede pode operar em canais de diferentes tamanhos para o *downlink* e *uplink*, tais como: 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, e 20 MHz.
- Quanto à mobilidade, a eficiência máxima encontra-se nas baixas velocidades 0-15 Km/h, mas pode suportar velocidades de até a 500 Km/h.
- Quanto à cobertura, pode variar de 5 a 100 km, com pequena degradação após os primeiros 30 km.
- Suporte a garantias de Qualidade de Serviço (QoS, Quality of Service).

2.3.1. Arquitetura

O LTE traz uma nova arquitetura bastante diferente do que vinha sendo utilizado nas tecnologias anteriores e um exemplo disto 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 eNB do LTE é denominada desta forma para se diferenciar da nomenclatura utilizada no UMTS (NodeB).

A arquitetura geral da rede LTE é composta de duas sub-redes: a rede de acesso de rádio 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; 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.

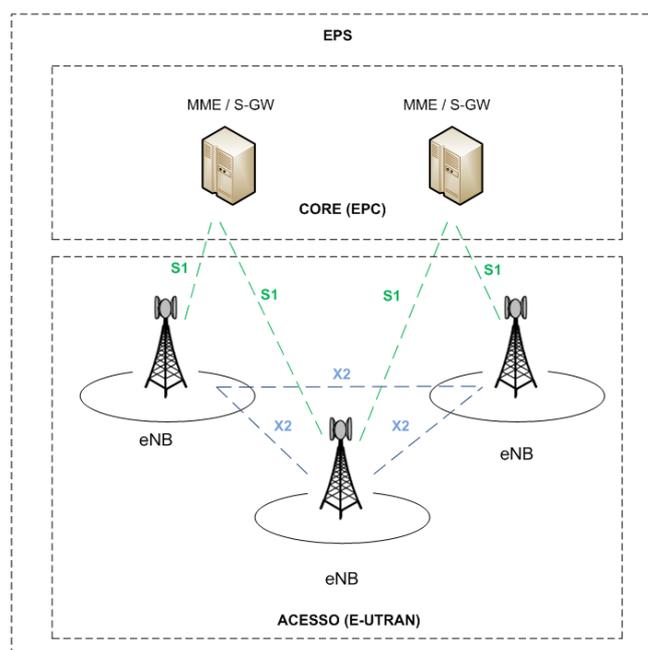


Figura 4. Arquitetura básica do LTE, adaptado de [ALI-YAHIYA, 2011].

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 [SESIA; TOUFIK; BAKER, 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.

- **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 os serviços 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.

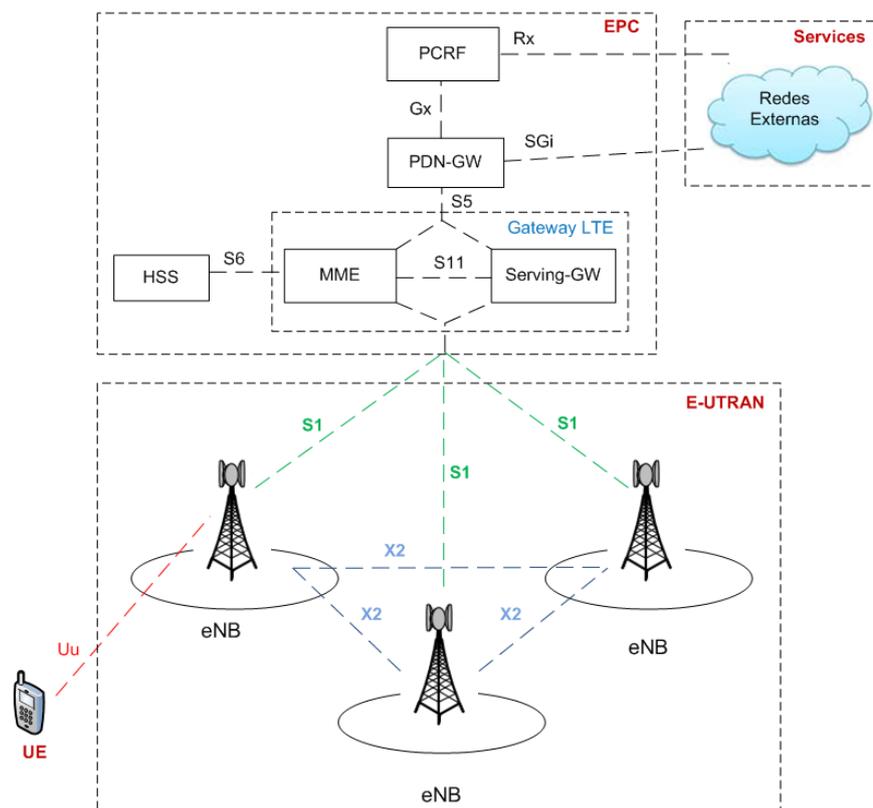


Figura 5. Arquitetura completa do LTE, adaptado de [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011].

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.

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 (para fins de sincronização e *handover*) e o provimento de algumas medições para a camada RRC.
- **MAC:** a camada de controle de acesso ao meio (MAC, *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* (RLC) executa as tarefas de correção de erros, segmentação/concatenação de dados, reordenação para entrega ordenada e detecção de duplicatas.
- **PDPC:** a camada *Packet Data Convergence Protocol* (PDPC) é responsável pela compressão/descompressão do cabeçalho dos pacotes IP, por assegurar a entrega ordenada de dados e também por realizar a criptografia dos pacotes.
- **RRC:** a camada *Radio Resource Control* (RRC) 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 de gerenciamento de QoS.

2.3.2. Tecnologias de Transmissão

O sistema LTE se propõe a solucionar um problema desafiador de comunicação multiusuário: muitos equipamentos de usuários, na mesma área geográfica, exigindo altas taxas de transferência de dados em uma largura de banda finita, com baixa latência. Várias técnicas de acesso permitem aos UEs partilharem a largura de banda disponível, atribuindo a cada UE uma fração da quantidade total de recursos disponíveis. Uma dessas técnicas de acesso múltiplo é o OFDMA, que é adotada pelo 3GPP *Release 8* devido à sua flexibilidade

para acomodar muitos UEs com aplicações bem diferentes, altas taxas de dados e requisitos de QoS [ALI-YAHIYA, 2011].

Dentro deste contexto, é revelada a necessidade de esquemas eficientes de alocação de recursos. Para entender como se dá o escalonamento de recursos no LTE se faz necessária uma breve revisão acerca dos conceitos das tecnologias de transmissão implantadas no LTE. A seguir, os principais conceitos são abordados.

2.3.2.1. OFDMA

A Multiplexação Ortogonal por Divisão de Frequência (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), é uma técnica complexa baseada na ideia da multiplexação por divisão da frequência (FDM). Na técnica OFDM, ao invés de utilizar bandas de guarda entre as portadoras para poder separá-las, emprega-se uma sobreposição das mesmas, como demonstrado na Figura 6, resultando em um ganho espectral de até 50% em relação à técnica FDM [DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011]. A modulação OFDM possui diversas vantagens tais como elevada eficiência espectral, robustez ao desvanecimento multipercuro e redução na interferência entre símbolos.

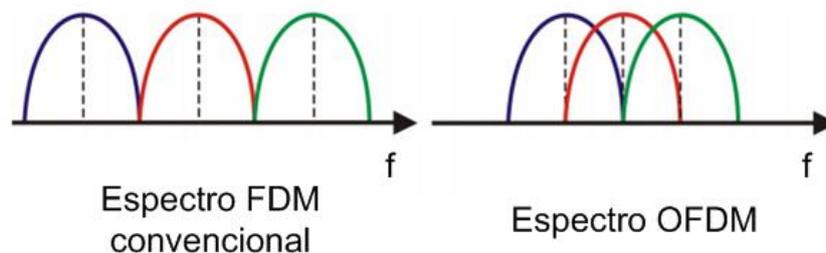


Figura 6. Disposição das portadoras na modulação FDM e OFDM.

A modulação OFDMA é uma extensão da tecnologia OFDM. No OFDMA, o símbolo OFDM é dividido no domínio da frequência em subconjuntos de subportadoras, denominados de subcanais, que podem ser individualmente alocados a diferentes usuários pelo seu intervalo de duração, como pode ser observado na Figura 7.

A menor unidade de alocação é denominada *slot* e possui dimensões expressas em termos de número de símbolos OFDM pelo número de subcanais. Portanto, a diferença entre OFDM e OFDMA é que o OFDMA tem a capacidade de atribuir dinamicamente um subconjunto dessas subportadoras a usuários individuais, se tornando assim a versão multiusuário do OFDM, usando *Time Division Multiple Access* (TDMA) ou *Frequência*

Division Multiple Access (FDMA) para vários usuários [GESSNER; ROESSLER; KOTTKAMP, 2012].

Dependendo da frequência, do instante de tempo, da potência de transmissão e do usuário utilizador, cada subportadora sofre um desvanecimento que depende das condições do canal. Desse modo, existe a possibilidade de que subportadoras com alto desvanecimento para um usuário estejam em boas condições se forem utilizadas por outro usuário. Essa característica permite obter grande flexibilidade na alocação dinâmica de recursos de transmissão e propicia ao sistema um ganho de diversidade multiusuário [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011].

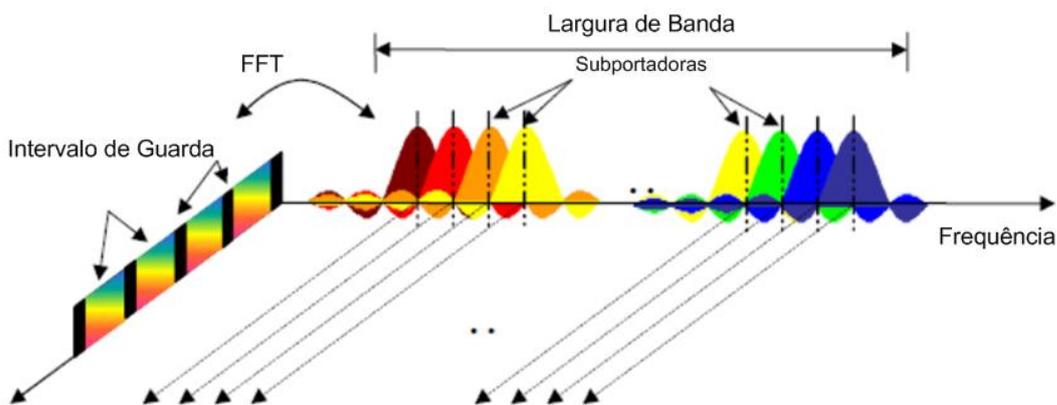


Figura 7. OFDMA no domínio do tempo e da frequência, adaptado de [GESSNER; ROESSLER; KOTTKAMP, 2012].

2.3.2.2. SC-FDMA

Segundo [DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011], o SC-FDMA é uma forma modificada do OFDMA. O transmissor e o receptor SC-FDMA são muito semelhantes aos da modulação OFDMA, a única diferença é a existência de uma *Discrete Fourier Transform* (DFT) no transmissor SC-FDMA e uma *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT) no receptor SC-FDMA. Por esta razão, a modulação SC-FDMA é muitas vezes referida como *frequency-spread OFDMA* ou *DFT-spread OFDMA*.

No SC-FDMA, a transmissão das subportadoras é realizada sequencialmente, em vez de ser em paralelo, o que, de acordo com [GESSNER; ROESSLER; KOTTKAMP, 2012], em comparação ao OFDMA, resulta num *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR) mais baixo. Assim sendo, o custo do processamento do sinal é reduzido porque o amplificador não necessita operar numa região tão afastada daquela que lhe garanta a potência de pico, uma

vez que a substancial interferência intersimbólica do sinal que chega à estação rádio base é cancelada com uma igualização adaptativa no domínio da frequência.

Além disso, segundo [ALI-YAHIYA, 2011], o LTE utiliza o SC-FDMA no *uplink* pelo fato desta técnica permitir um baixo PAPR, que é a razão entre a potência média e a potência de pico, o que reduz o consumo de energia na amplificação do sinal, provendo um menor consumo de bateria nos aparelhos móveis utilizados pelos usuários, além de melhorar o desempenho na borda da célula. A Figura 8 traz a comparação entre as técnicas OFDMA e o SC-FDMA.

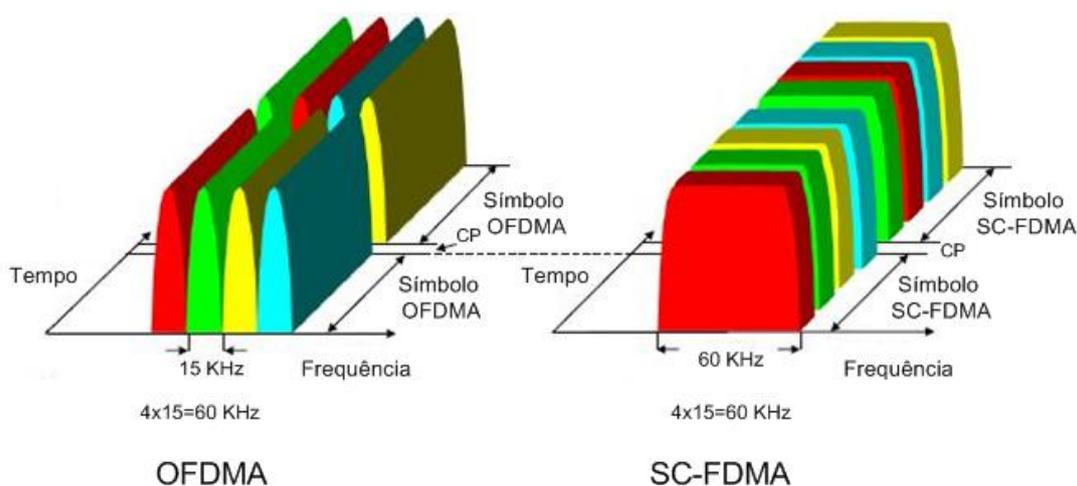


Figura 8. Transmissão utilizando OFDMA x SC-FDMA, adaptado de [DUTTA; NORTON; XIAO, 2016].

2.3.2.3. MIMO

O uso da técnica *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) é outra característica das redes LTE e é uma das ferramentas utilizadas para melhorar o desempenho do sistema. Essa tecnologia proporciona ao LTE a capacidade de melhorar ainda mais a sua taxa de transferência de dados e eficiência espectral, ainda que aumente a complexidade do sistema em termos de processamento e número de antenas necessárias [BRYDON, 2016].

O conceito básico do MIMO utiliza a propagação de sinal de múltipla trajetória que está presente em todas as comunicações terrestres. Ao invés de fornecer interferência, esses múltiplos caminhos podem ser usados como vantagem no sistema LTE. Segundo [DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011], nesta técnica, o transmissor e o receptor possuem mais de uma antena e, utilizando a capacidade de processamento disponível em ambas as extremidades da ligação, são capazes de utilizar os diferentes caminhos percorridos pelo sinal sem fio entre as duas entidades para proporcionar melhorias na taxa

de dados. Este conceito foi padronizado pelo 3GPP e se apresenta como fator determinante para as novas tecnologias móveis devido às suas vantagens. O LTE suporta as configurações 2x2, 4x2, e 4x4, onde o primeiro número é referente ao número de antenas na eNB e o segundo ao número de antenas no UE [3GPP TS 36.214, 2008]. A Figura 9 traz uma ilustração da técnica MIMO.

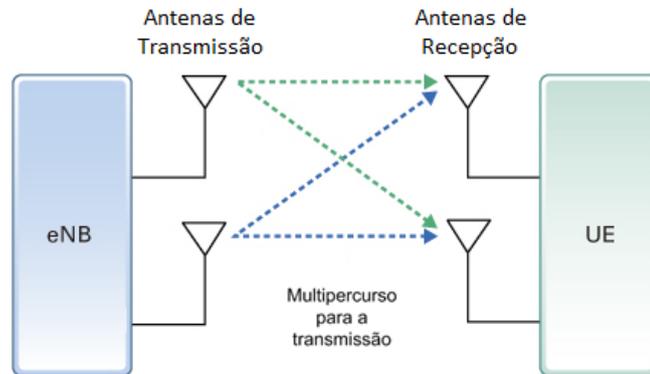


Figura 9. MIMO utilizando a configuração 2x2, adaptado de [BRYDON, 2016].

Existem vários modos pelos quais o MIMO é implementado no LTE. Estes variam de acordo com o equipamento utilizado, a função de canal e o equipamento envolvido na ligação. Dentre estes modos, é possível destacar [DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011]:

- **Space-Time Coding:** Neste caso, o sistema MIMO fornece ganho de diversidade para combater o desvanecimento do sinal causado por multipercurso. Neste sistema, é feita uma cópia do sinal, porém eles são codificados de formas diferentes e são enviados simultaneamente por diferentes antenas. O fato de enviar a mesma quantidade de dados por diferentes fontes ao mesmo tempo aumenta a força total do sinal enviado.
- **Space Frequency Block Coded:** Este sistema também proporciona ganho de diversidade, porém necessita apenas de uma antena na recepção. Isto ocorre pois além de realizar a cópia do sinal e codificá-los de forma diferente, eles são transmitidos em frequências distintas.
- **Spacial Multiplexing:** se refere à habilidade de receber ou transmitir simultaneamente através de múltiplas antenas transmissoras e receptoras, dividindo o fluxo de dados em blocos independentes, transmitidos por canais diferentes associados a diferentes antenas, a fim de aumentar a transferência de dados entre as estações. Esse recurso é utilizado considerando as mudanças de direção do sinal quando este colide e desvia nos vários obstáculos que podem existir no caminho

entre o emissor e o receptor. As mudanças de percurso podem gerar atrasos em partes do sinal, que são compensados por algoritmos sofisticados utilizados nas antenas receptoras, que fazem os cálculos baseando-se na reflexão sofrida pelo sinal ao longo do seu percurso. O receptor possui filtros que são capazes de recuperar o sinal original após sua chegada através do tratamento de todos os feixes enviados pela fonte.

De acordo com [DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011], o MIMO ainda pode ser classificado como *Multi-User* MIMO (MU-MIMO) ou *Single User* MIMO (SU-MIMO), no qual a principal diferença entre eles é que no SU-MIMO um único usuário transmite os dados para o receptor enquanto no MU-MIMO vários usuários transmitem os dados para o receptor simultaneamente. Estes recursos estão disponíveis tanto no *downlink* quanto no *uplink*. Apesar de ser suportado, o SU-MIMO não é indicado para uso no *uplink* devido à complexidade e aumento do custo no equipamento do usuário.

2.3.2.4. Modulação e Codificação Adaptativa

Nas comunicações móveis é natural que ocorram variações significativas nas condições de canal dos usuários. Por este motivo, é necessário lidar com essas variações, realizando adaptações nos parâmetros de transmissão. Essas adaptações são feitas através da técnica *Adaptive Modulation and Coding* (AMC) [3GPP TS 36.214, 2008], onde é possível modificar o esquema de modulação e codificação (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) de acordo com o nível de sinal do UE.

De tempos em tempos, os UEs devem reportar às eNBs a qualidade do canal para toda a banda de frequência (*wideband*) e/ou para uma determinada subportadora (*subband*). A qualidade do canal é definida pelo Indicador de Qualidade de Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*), que é basicamente o valor de *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR) com erros e atrasos acrescentados. Baseado nessas informações, os símbolos OFDM de um *Resource Block* (RB) podem ser modulados e codificados de maneira adaptativa [DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011]. As modulações suportadas pelo LTE são: QPSK, 16QAM e 64QAM, todas suportando diversas taxas de codificação: 1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5 [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011].

2.3.3. Estrutura de Quadros

A camada física do LTE suporta dois esquemas de acesso já descritos neste trabalho: o OFDMA para o *downlinke* o SC-FDMA para o *uplink*. Ambos os esquemas utilizam a mesma estrutura de quadros. Esta estrutura é dividida em dois domínios: tempo e frequência. Portanto, os usuários também serão multiplexados na frequência e no tempo, simultaneamente.

Segundo [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011], a menor unidade de recurso no LTE é o *Resource Element* (RE). Considerando uma grade de tempo x frequência, um RE equivale a uma subportadora OFDM espaçada de 15 kHz durante o intervalo de tempo do símbolo OFDM [ALI-YAHIYA, 2011]. A Figura 10 traz a estrutura de quadro básica da grade de tempo x frequência no LTE para o caso de um prefixo cíclico normal.

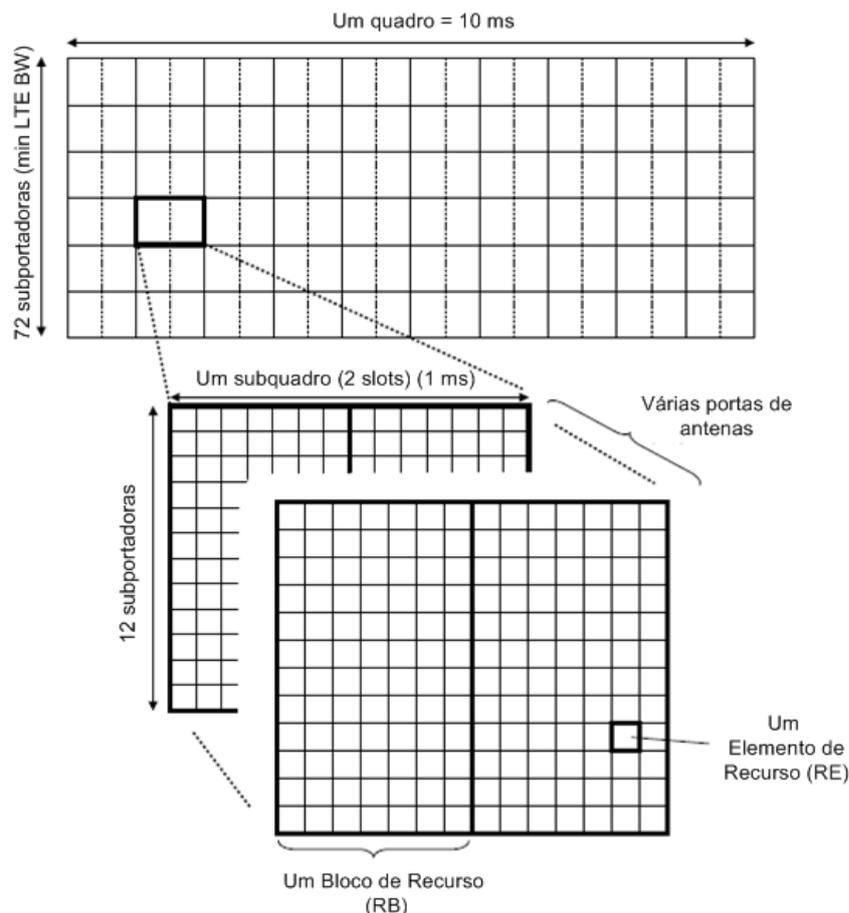


Figura 10. Exemplo da estrutura de um quadro LTE, adaptado de [ALI-YAHIYA, 2011].

Da Figura 10, é possível observar que no domínio do tempo, cada quadro tem duração de 10 ms e é formado por 10 subquadros de 1 ms cada. Um subquadro constitui um TTI e é formado por dois *slots*, cada um com 0,5 ms de duração. Finalmente, um slot é formado por

6 ou 7 símbolos, dependendo do prefixo cíclico utilizado (curto ou longo). No domínio da frequência, a largura de banda total utilizada pela rede (1,4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz) é dividida em subcanais com 12 subportadoras de 15 kHz, totalizando 180 kHz. O conjunto de 12 subportadoras OFDM consecutivas é definido como um *Resource Block* (RB) e pode variar de 6 até mais de 100, dependendo da largura do canal. O bloco de 7 símbolos *versus* 12 subportadoras (tempo x frequência) constitui a unidade básica de recurso de rádio chamada de RB. A multiplexação dos usuários é realizada pela alocação de uma certa quantidade de RBs para cada usuário. A Tabela 5 traz alguns parâmetros OFDMA utilizados no *downlink* da rede.

Tabela 5. Parâmetros utilizados na transmissão *downlink*, adaptado de [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011].

Largura de Banda (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Quantidade de RBs	6	15	25	50	75	100
Quantidade de Subportadoras	84	180	300	600	900	1200
Vazão Máxima (Mbps)	6	15	25	50	75	100

Da Tabela 5 é possível observar diversos parâmetros utilizados nas transmissões LTE. É possível estimar, por exemplo, a taxa de dados trafegados em 1 RB. Para isso, será considerado que o sistema possui as seguintes características:

- 14 símbolos OFDM por subquadro de 1 ms (2 *slots*);
- Modulação de 64 QAM com 6 bits por símbolo em todos os REs;

Assim, para calcular a vazão em 1 RB nestas condições, tem-se:

1. 6 bits x 14 símbolos = 84 bits por subquadro de 1ms;
2. Convertendo para bits/s = 84 bits/ 1ms = 84kbps por subportadora;
3. 12 subportadoras x 84kbps = 1.008 Mbps por RB.

2.3.4. CLASSES de QoS e Bearers EPS

De modo geral, várias aplicações podem estar sendo utilizadas em um terminal móvel ao mesmo tempo, cada uma solicitando diferentes requisitos de QoS. Por exemplo, um usuário pode estar em uma chamada VoIP, enquanto solicita uma página na web ou faz um *download* de um arquivo FTP. O Serviço VoIP necessita de melhores requisitos de QoS em

termos de atraso e variação de atraso do que as outras duas aplicações, que possuem maiores restrições no que se refere a perda de pacotes [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011]. O padrão LTE suporta garantias de QoS para os fluxos de tráfego. Estes tráfegos são categorizados segundo seus requisitos de QoS em classes que refletem os serviços e as aplicações suportadas pela rede.

Como apresentado na Tabela 6, as classes de QoS são identificáveis através do *QoS Class Identifier* (QCI). Estas classes são caracterizadas pelo conjunto dos seguintes parâmetros:

- a) O atraso máximo tolerável entre o dispositivo e o SGW (*gateway* de saída da rede);
- b) A taxa máxima de perda de pacotes;
- c) Se a taxa de bits é garantida (GBR, *Guaranteed Bit Rate*) ou não (Non-GBR);
- d) A prioridade com que os tráfegos devem ser manipulados na rede, sendo que quanto menor o valor maior a prioridade.

Tabela 6. Valores do QCI padronizados para o LTE [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011].

QCI	Tipo de <i>Bearer</i>	Prioridade	Atraso (ms)	Perda de Pacotes	Exemplo de Aplicação
1	GBR	2	100	10^{-2}	VoIP
2	GBR	4	150	10^{-3}	Videoconferência
3	GBR	5	300	10^{-6}	<i>Streaming</i> de Vídeos
4	GBR	3	50	10^{-3}	Jogos em Tempo Real
5	Non-GBR	1	100	10^{-6}	Sinalização
6	Non-GBR	7	100	10^{-3}	Voz e <i>streaming</i> de vídeo
7	Non-GBR	6	300	10^{-6}	<i>Streaming</i> de Video
8	Non-GBR	8	300	10^{-6}	
9	Non-GBR	9	300	10^{-6}	www, e-mails, <i>chat</i> , etc.

Para melhor entender como o LTE implementa QoS é necessário definir o conceito de *bearer*. Segundo [PENTTINEN, 2011], o *bearer* é um conjunto de parâmetros de rede que define um tratamento específico de dados. O tipo de *bearer* é o que define como os dados do usuário serão tratados enquanto trafegam na rede. Alguns fluxos de dados podem ter taxa de bits garantida, enquanto outros podem ter de enfrentar atrasos e pouca vazão.

O LTE trata dois tipos de *bearers*: o *default* e o *dedicated*. Quando o UE se conecta na rede pela primeira vez é atribuído ao mesmo um *default bearer*, que permanece ativo enquanto o UE estiver ligado na rede. O *default bearer* é um serviço de melhor esforço (*best effort*). O UE pode ter vários *default bearers*, sendo que cada um deles terá um endereço IP diferente. Já o *dedicated bearer* fornece um túnel dedicado a um ou mais tráfegos específicos (VoIP, vídeo, etc.). O *dedicated bearer* atua como um *bearer* adicional em cima do *default bearer*, não necessitando de um IP separado. Sendo assim, o *dedicated bearer* sempre está ligado a um *default bearer* estabelecido anteriormente. A Figura 11 ilustra um exemplo da utilização do *default bearer* e *dedicated bearer* para diferentes tipos de aplicações.

Da Figura 11, observa-se o *default bearer* sendo utilizado para aplicações simples, como e-mail e redes sociais, e o *dedicated bearer* sendo utilizado em aplicações com rígidos requisitos de QoS (ex: VoIP e videoconferência). Além disso, existem dois tipos de *dedicated bearers*: GBR e Non-GBR. No GBR, como já citado anteriormente, tem-se uma taxa de bits mínima e/ou máxima garantida, já o Non-GBR, apesar de não garantir uma taxa de bits, possui outras garantias como valores máximos de latência, perda de pacotes, etc. Na rede de acesso, é da eNB a responsabilidade de assegurar que os requisitos de QoS necessários para atender um *bearer* na interface rádio sejam atendidos [ALI-YAHIYA, 2011]. É válido ressaltar que nem sempre a eNB possui recursos suficientes para atender a uma requisição de um *dedicated bearer*, podendo rejeitá-la.

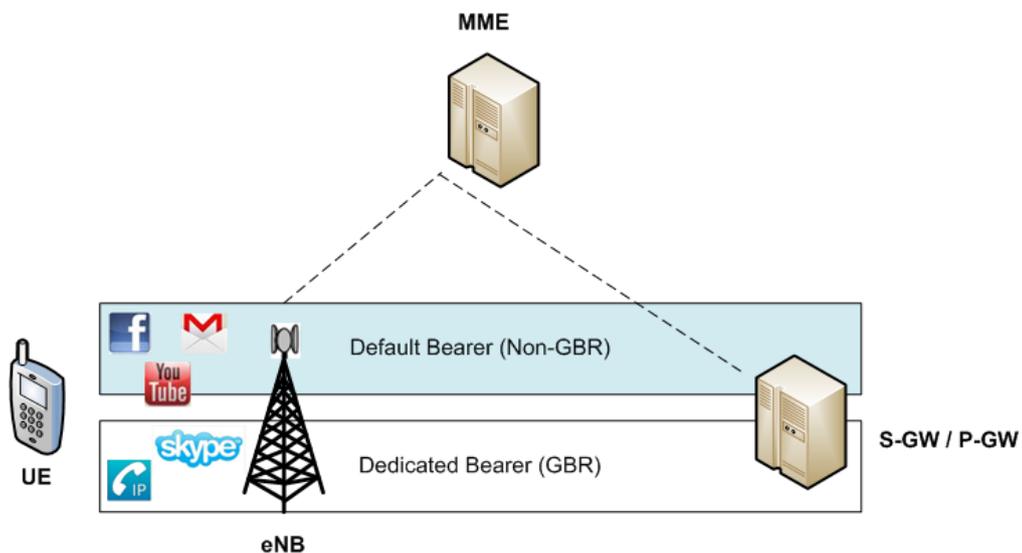


Figura 11. Tipos de *Bearers* em redes LTE, adaptado de [PENTTINEN, 2011].

2.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os principais conceitos em torno das tecnologias que dão suporte à comunicação veicular e o sistema LTE. De maneira geral, foi visto que o conceito de carro conectado não é tão novo, mas o avanço no desenvolvimento de *softwares* e *hardwares* tem impulsionado cada vez mais o governo, a indústria e a academia em torno de soluções que possam apoiar a implantação dessas novas redes.

Neste capítulo, pôde-se observar que o conceito de carro conectado vai além da interação entre o veículo e o motorista (de fontes do próprio veículo), por meio de alertas sobre nível de óleo, bateria, comandos remotos, etc; mas também permite a comunicação do veículo com outros veículos e infra-estruturas ao longo das vias, permitindo acesso a internet, alertas sobre as condições do tráfego e das estradas, vias perigosas, ocorrência de acidentes, interrupção de estradas, corredores alternativos, entretenimento, dentre outros serviços.

Conforme visto, muitos projetos têm sido desenvolvidos em países da Europa, Estados Unidos e Japão e alguns desses serviços já estão disponíveis. Isto se deve, sobretudo, à sua infraestrutura de telecomunicações avançada e o interesse do governo e da iniciativa privada nestas questões. Apesar dos grandes avanços nos últimos anos, muitos desafios ainda estão em discussão, tais como a aspectos de segurança da informação, roteamento e tecnologia de acesso. As vantagens e os desafios da integração VANET-LTE serão discutidos ao longo desta dissertação.

3. ALGORITMOS DE ESCALONAMENTO DE RECURSOS EM REDES LTE

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo é feita uma breve revisão acerca dos principais conceitos envolvidos no escalonamento de recursos em sistemas LTE. Também são apresentados os algoritmos de escalonamento avaliados nesta dissertação.

3.2 Escalonamento de recursos de rádio em sistemas LTE

Para [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011], o escalonamento de recursos, como já introduzido nos capítulos anteriores, refere-se à atividade de alocação de recursos de rádio (RBs), a cada intervalo de tempo de transmissão (TTI). Tal atividade é necessária para a transmissão de dados de/para os UEs que possuem fluxo ativo. Visando a utilização dos recursos disponíveis de forma eficiente, um algoritmo de escalonamento é usado na camada MAC, que é a responsável por esta atividade. A seguir será dada uma visão geral do escalonador em termos da sua operação [ETSI TS 136 300 V8.9.0, 2009].

3.2.1 Operação básica do escalonador

A camada MAC na eNB inclui escalonadores dinâmicos que alocam recursos da camada física para os canais de transporte do DL-SCH (*Downlink Scheduler*) e UL-SCH (*Uplink Scheduler*). Ao distribuir os recursos entre os UEs, o escalonador pode levar em conta fatores tais como: volume de tráfego, condições de canal, requisitos de QoS de cada fluxo e o tipo de *bearers*.

Geralmente, os escalonadores atribuem recursos considerando as condições de canal de cada UE, identificadas por meio de medidas feitas na eNB e/ou reportados pelos UEs. A atribuição de recursos consiste em blocos de recursos (RBs) associados ao esquema de modulação e codificação (MCS, *Modulation and Coding Scheme*), que por sua vez é baseado em medidas tais como o SINR e o BLER (*Block Error Rate*) experimentados pelo usuário.

A alocação de recursos de rádio pode ser válida para um ou múltiplos TTIs. Segundo [LUNG-CHIH; GERLA, 2013], o primeiro caso é chamado de alocação dinâmica. Neste caso, o UE envia uma mensagem de solicitação de recurso para a estação rádio base a cada pacote de dados gerado. Já no último caso, é chamado de alocação persistente ou semi-persistente, e exige informações adicionais, tais como: tempo de alocação e fator de repetição de alocação.

[LUNG-CHIH; GERLA, 2013] também destaca que a maior desvantagem no caso da alocação dinâmica está na quantidade de sinalização gerada na rede, bem maior do que a sinalização nos casos persistentes e semipersistente, cuja principal desvantagem pode estar no desperdício de recursos de rádio, já que também existe a reserva de recursos destinados a possíveis retransmissões.

Tanto no *downlink* quanto no *uplink*, a eNB pode alocar recursos para os UEs a cada TTI, via o *Cell Radio Network Temporary Identifier (C-RNTI)*, no(s) *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*(s). O UE sempre monitora o(s) PDCCH(s) a fim de encontrar eventual alocação quando a recepção no *downlink* está habilitada. Essa atividade é governada pela *Discontinuous Reception (DRX)*, quando configurada.

No *uplink*, o UE envia um pedido de escalonamento (SR, *Scheduling Request*) para solicitar RBs para uma nova transmissão. Isto acontece porque os UEs não possuem recursos dedicados na rede para transmitir diretamente à eNB assim que novos dados, vindos das camadas superiores, chegarem no *buffer*. Portanto, para transmissão *uplink*: o UE solicita recursos para transmissão; Recebe os recursos de rádio; e, finalmente, transmite. A Figura 12 ilustra o processo de transmissão no *uplink*.

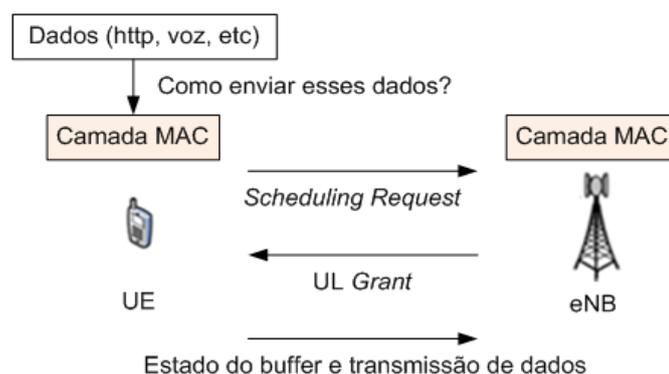


Figura 12. Transmissão uplink.

A *scheduling request* é enviada no *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*. Este canal carrega a sinalização de rádio no *uplink* para:

- *Scheduling Request*, para garantir recursos no UL.
- Relatórios de medidas dos UEs, tais como medidas das condições de canal.

AeNB também pode alocar recursos de *downlink/uplink* semi-persistentes para as primeiras transmissões *Hybrid Automatic Repeat reQuest* (HARQ) para os UEs e, no caso do *uplink*, potenciais retransmissões:

- O controle de recursos de rádio (RRC, *Radio Resource Control*) define a periodicidade da alocação *downlink/uplink* semipersistente;
- O PDCCH indica quando a alocação de *downlink/uplink* é semipersistente, ou seja, se ela pode ser implicitamente reutilizada nos próximos TTIs de acordo com a periodicidade definida pelo RRC.

[SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011] ressalta ainda que no *downlink*, a estratégia de alocação de recursos é limitada pela potência total de transmissão da eNB. Já o escalonamento no *uplink* é mais complicado em relação ao *downlink* por diversas razões. Uma delas é que, nessa ligação, o UE é quem envia os dados para a eNB e é sabido que o UE possui uma fonte de energia bem mais limitada quando comparado à potência da eNB; outra razão apontada por [BENDAOU; ABDENNEBI; DIDI, 2014] está na dificuldade de prever o número de recursos de rádio dos quais o UE precisará para trocar dados com a eNB.

Os relatórios de medidas são necessários para habilitar o *scheduler* para operar em ambos os tráfegos *uplink* e *downlink*. Estes incluem o volume de transporte e as medidas das condições de canal dos UEs. Entre os relatórios, o mais importante é o indicador da qualidade do canal (CQI), brevemente abordado a seguir [MAHIDA; DURVESH, 2014]:

CQI – Channel Quality Indicator

O relatório do indicador da qualidade do canal contém informações enviadas do UE para a eNB. O CQI é baseado no *Signal to Interference plus Noise Ratio* (SINR) experimentado pelo UE. O processo de estimação do CQI leva em conta fatores como o número de antenas e o tipo de receptor usado para detecção, o que influenciará no BLER estimado para o UE. Isto é importante já que para o mesmo valor de SINR, o esquema de modulação e codificação (MCS) suportado pelo UE pode variar dependendo dessas condições. A partir dessas medidas, a eNB busca selecionar um índice ótimo de MCS para a transmissão.

Além disso, o LTE suporta dois tipos de medidas de CQI: *wideband* e *subband*. No *wideband*, a medida é estimada para toda a largura de banda do canal. Já no *subband*, a medida é feita sobre uma dada sub-banda do canal, que por sua vez trata-se de uma coleção específica de n RBs adjacentes.

O escalonador de recursos também é encarregado de gerar estruturas específicas chamadas *Data Control Indication* (DCI), que são então transmitidas pela camada física da eNB para os UEs conectados, a fim de informá-los sobre a alocação de recursos em uma base por subquadro. Por exemplo, fazendo isto na direção *downlink*, o *scheduler* tem que preencher alguns campos específicos da estrutura DCI com várias informações, tais como: o MCS a ser usado, o tamanho do bloco de transporte (TB, *Transport Block*) na camada MAC e o *bitmap* da alocação, o qual identifica quais RBs irão conter os dados transmitidos pela eNB para cada UE [NS-3, 2016]. A Figura 13 ilustra a operação básica do escalonador de recursos.

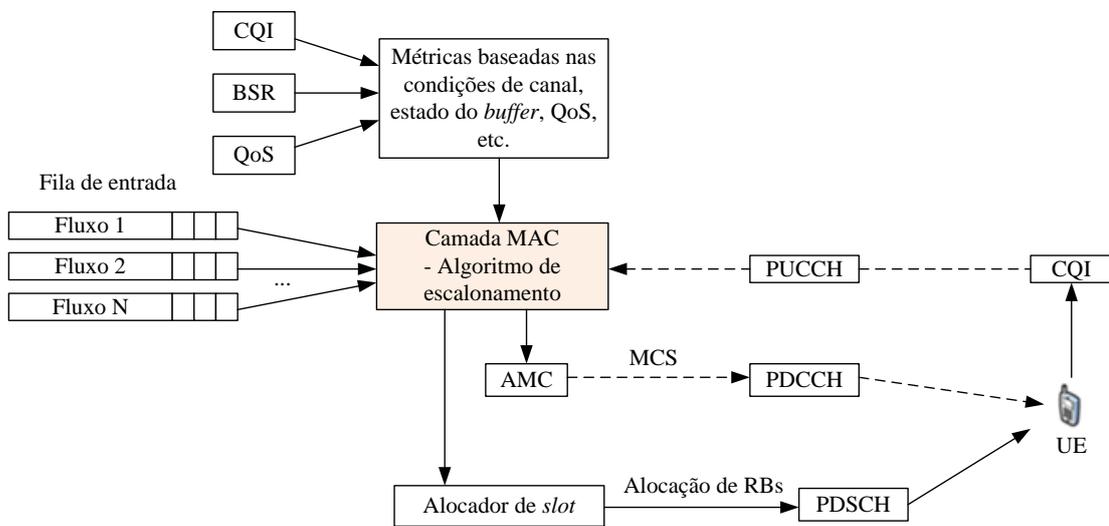


Figura 13. Operação genérica do escalonador de recursos, adaptado de [SULTHANA; NAKKEERAN, 2014].

Conforme [TRIVEDI; PATEL, 2014], o escalonamento de recursos no LTE acontece no domínio do tempo e da frequência:

No domínio do tempo (TD, *Time Domain*), o objetivo é selecionar, entre os UEs que solicitam recursos, os potenciais candidatos ao escalonamento. A escolha é feita levando em conta as métricas de prioridades calculadas, baseadas, por exemplo, no estado do *buffer*, nas medidas da vazão atingida e/ou atingível ou nas condições atuais do canal. Os UEs com as maiores métricas de prioridade são anexados em um grupo chamado *Scheduling Candidate Set* (SCS), que é então passado ao escalonamento no domínio da frequência (FD, *Frequency Domain*).

No domínio da frequência, o objetivo é alocar RBs para os UEs contidos no SCS. No entanto, é preciso ressaltar que os UEs listados no SCS são considerados apenas candidatos ao escalonamento, já que os recursos de rádio são limitados, podendo não ser suficiente para

atender todos os UEs listados no grupo. As métricas de prioridade específica de cada algoritmo são levadas em conta na seleção dos RBs.

3.3 Algoritmos de escalonamento de recursos

Usualmente, os algoritmos de escalonamento de recursos baseiam-se na comparação de métricas por RB obtidas para cada UE. Assim, o k -ésimo RB é alocado ao i -ésimo UE se sua métrica $m_{i,k}$ é a maior quando comparada às métricas dos demais UEs, ou seja, se ela satisfaz a Equação (1):

$$m_{i,k} = \max_i \{m_{i,k}\} \quad (1)$$

As métricas utilizadas por cada escalonador podem ser interpretadas como a prioridade de transmissão de cada UE num RB específico.

Encontram-se na literatura várias famílias e categorias de algoritmos. Cada família contém um conjunto de algoritmos que têm características e objetivos em comum. De maneira geral, os escalonadores são divididos em duas classes: independentes do canal e dependentes do canal. Por sua vez, os algoritmos podem ser classificados em baseados em QoS e não baseados em QoS [BENDAOU; ABDENNEBI; DIDI, 2014], conforme ilustra a Figura 14.

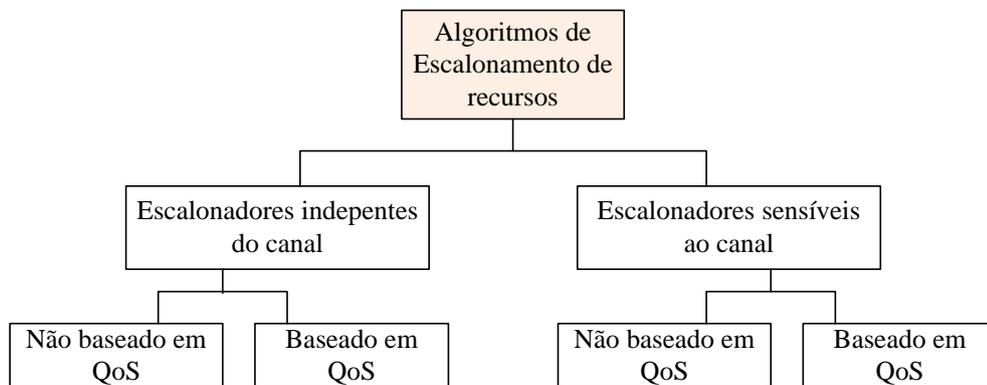


Figura 14. Classificação geral dos algoritmos, adaptado de [SULTHANA; NAKKEERAN, 2014].

O presente estudo avalia cinco escalonadores de recursos, baseados no FemtoForum API, quais sejam: *Round Robin* (RR), *Proportional Fair* (PF), *Throughput to Average* (TTA), *Priority Set* (PSS) e *Channel and QoS Aware*(CQA). A seguir, é feita uma breve revisão a respeito de cada um deles. As notações utilizadas nas métricas de escalonamento estão na Tabela 7.

Tabela 7. Notações para as métricas de escalonamento.

Expressão	Significado
$m_{i,k} = \max_i \{m_{i,k}\}$	Métrica genérica para alocar o i-ésimo UE ao k-ésimo RB
$R_i(t)$	Vazão atingida pelo i-ésimo UE no tempo t
$\overline{R}_i(t)$	Média da vazão atingida pelo i-ésimo UE no tempo t
$D_{HOL_i}(t)$	Valor do atraso HOL para o i-ésimo UE no tempo t
$T_i(t)$	Vazão atingível estimada para o i-ésimo UE no tempo t para toda a largura de banda
$T_{i,K}(t)$	Vazão atingível estimada para o i-ésimo UE no tempo t para o k-ésimo RB
BW	Largura de Banda disponível (em RBs)
UEs	Número de UEs na fila para o escalonamento
g	É o parâmetro de agrupamento que determina a granulidade dos grupos

Algoritmos independentes do canal

Habitualmente, os algoritmos independentes do canal objetivam alcançar a justiça e a equidade na distribuição de recursos entre os UEs. Dependendo do tipo de tráfego e suas características, esses algoritmos podem apresentar deficiência quanto à eficiência espectral. São exemplos desta classe: *Round Robin* (RR) e *Blind Equal Throughput* (BET).

3.3.1 Round Robin

O RR é um esquema de escalonamento no qual os UEs se revezam na utilização dos recursos partilhados, sem considerar as condições do canal ou requisitos de QoS. É um procedimento simples, que busca a justiça na distribuição dos recursos disponíveis, mas pode deixar a desejar em termos da vazão global do sistema dependendo do tipo de tráfego na rede [TRIVEDI; PATEL, 2014].

O RR trabalha dividindo de forma igual os recursos disponíveis entre os UEs conectados, como mostra a Equação (2). Se o número de RBs é maior que o número de UEs

conectados naquele TTI, todos os UEs serão alocados no mesmo subquadro. Caso contrário, nem todos os UEs serão alocados naquele subquadro e, no próximo subquadro, serão alocados os UEs ainda não servidos [NS-3, 2016].

$$m_{i,k}^{RR} = \frac{BW}{UEs} \quad (2)$$

Algoritmos sensíveis ao canal não baseados em QoS

Estes algoritmos alocam recursos aos usuários levando em conta as condições de canal dos mesmos. A qualidade de canal do usuário é estimada baseada no CQI reportado à eNB, indicando a qualidade do canal percebida pelo UE e qual a taxa máxima de dados que pode ser atingida pelo mesmo naquelas condições. Esses algoritmos também são chamados oportunistas, por tirarem vantagem da diversidade multiusuário da rede sem fio. São exemplos desta classe: *Maximum Throughput* (MT), *Proportional Fair* (PF) e *Throughput to Average* (TTA).

3.3.2 Proportional Fair

O principal objetivo do PF é o equilíbrio entre a vazão e a justiça entre todos os UEs. O escalonador alcança a “Justiça Proporcional”, alocando os recursos ao UE com a maior razão entre a vazão atingível naquele instante e a última média da vazão de dados, como mostra a Equação (3). Por meio deste esquema, todos os usuários possuirão probabilidade de atendimento mesmo que possuam diferentes condições de canal.

$$m_{i,k}^{PF} = \frac{T_i(t)}{R_i(t-1)} \quad (3)$$

3.3.3 Throughput to Average

O TTA, por meio de sua métrica, quantifica a vantagem de alocar um RB específico à um determinado UE, garantindo que os melhores RBs sejam alocados para cada UE. A sua métrica é dada em virtude da razão entre a taxa de dados atingível para o UE ‘i’ em um RB

específico no tempo ‘t’ e a taxa de dados atingível para o UE ‘i’ em toda a largura de banda no tempo ‘t’, como mostra a Equação (4).

$$m_{i,k}^{TTA} = \frac{T_{i,k}(t)}{T_i(t)} \quad (4)$$

A partir da Equação (4), é possível observar que quanto maior é a vazão global esperada para um UE, menor será sua métrica em um único RB. Assim, o TTA permite um forte nível de justiça em um mesmo TTI. Isto significa que escalonador, explora a capacidade do canal a fim de garantir pelo menos um nível mínimo de serviço para todos os UEs [CAPOZZI et. al., 2012].

Algoritmos sensíveis ao canal e baseados em QoS

Esta classe de algoritmos, além de tomar suas decisões baseados nas condições de canal dos UEs, também leva em consideração os requisitos de QoS de cada fluxo. Neste caso, são priorizados os fluxos que possuem requisitos de QoS mais rígidos, como aplicações em tempo real, tais como streaming de vídeo e VoIP. São exemplos desta classe: *Priority Set* (PSS) e *Channel and QoS-aware* (CQA).

3.3.4 Priority Set

O PSS é um escalonador *QoS-aware* que combina operações de escalonamento no domínio do tempo e da frequência em uma só política [MONGHA et. al., 2008]. Ele controla a justiça entre os UEs através de uma taxa de bits alvo (TBR, *Target Bit Rate*), a fim de distinguir fluxos de baixa ou alta prioridade [NS-3, 2016]. Ele seleciona UEs que possuem maior prioridade de alocação de recursos. No domínio do tempo, UEs com a última média da vazão menor que a TBR formam o conjunto de alta prioridade. Os outros UEs formam o conjunto de baixa prioridade. UEs pertencentes ao primeiro e segundo conjuntos são ordenados usando as métricas dos algoritmos BET (Blind Equal Throughput) [KELA et. al., 2008] e PF, respectivamente. O BET utiliza o inverso da última média da vazão atingida como métrica. Um número máximo de UEs, conforme a ordenação, é então passado ao estágio de escalonamento no domínio da frequência, que alocará os recursos conforme a métrica do PF, de acordo com a Equação (5).

$$m_{i,k(FD)}^{PSS} = m_{i,k}^{PF} = \frac{T_i(t)}{R_i(t-1)} \quad (5)$$

3.3.5 Channel and QoS Aware

Esta abordagem visa maximizar a utilização dos recursos do canal de rádio, fornecendo qualidade de serviço para classes de tráfegos que possuem requisitos de QoS muito rígidos em termos de taxa de bits e atraso, como VoIP e vídeo conferência. O CQA [BOJOVIC; BALDO, 2014] em sua política leva em conta o atraso *head of line* (HOL), ou seja, o atraso do primeiro pacote a ser transmitido pelo *i*-ésimo UE; os parâmetros da taxa de bits garantida (GBR) e; a qualidade do canal sobre as diferentes subbandas. O CQA tem políticas de escalonamento no domínio do tempo e da frequência.

No TD, a cada TTI, o CQA agrupa UEs por prioridade. A proposta de agrupá-los é para garantir que o escalonamento no FD considere primeiro os fluxos com maior atraso HOL. Nesta métrica, é levado em conta os valores atuais do atraso HOL do UE '*i*' e o parâmetro de agrupamento (*g*), ou seja, o número de fluxos que serão considerados na iteração do escalonamento no domínio da frequência, conforme a Equação (6).

$$m_{i,k(TD)}^{CQA} = \frac{D_{HOL_i}(t)}{g} \quad (6)$$

Os grupos de UEs selecionados pelo escalonador no domínio do tempo são direcionados para o escalonador no domínio da frequência, começando pelo UE com a maior métrica calculada pelo escalonador no TD, até que todos os RBs sejam atribuídos naquele TTI. No escalonamento FD, para cada RB, o CQA aloca o RB '*k*' ao UE '*i*' que tem o maior valor da nova métrica calculada no FD, descrita na Equação (7).

A métrica no FD se baseia em diversos parâmetros: o atraso HOL do UE; a métrica m_i^{GBR} (que é a razão entre a taxa de bits garantida do UE '*i*' e a sua última média da vazão atingida); e a métrica $m_{i,k}^{CA}$. Para esta última, o ns-3 possui duas maneiras de calculá-la: CqaPf e CqaFf. A primeira se baseia no método do Proportional Fair e a segunda se baseia no ganho de desvanecimento seletivo em frequência (Frequency Selective Fading Gains) no *k*-ésimo RB para o *i*-ésimo UE, ambas estratégias descritas em [DAHLMAN; PARKVALL; SKÖLD, 2011]. Neste estudo, foi utilizada a métrica CqaFf.

$$m_{i,k(FD)}^{CQA} = D_{HOL_i}(t) * m_i^{GBR} * m_{i,k}^{CA} \quad (7)$$

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados os principais conceitos acerca da operação básica de escalonamento de recursos em redes LTE. Observou-se que a eNB utiliza diversos fatores e relatórios para estabelecer a distribuição dos recursos de rádio disponíveis entre os usuários que solicitam escalonamento. Assim, quanto mais densa a rede, maior será a carga de sinalização, sobretudo quando se trata do escalonamento dinâmico.

São diversas as técnicas disponíveis e, dependendo do tipo de tráfego a ser tratado, algumas podem ser mais eficientes que outras. Finalmente, ressalta-se que tal atividade é crucial para o bom desempenho da rede. Portanto, a escolha da técnica deve ser realizada com critérios que satisfaçam tanto os requisitos do usuário da rede quanto os do operador da mesma.

4. TRABALHOS RELACIONADOS

4.1 Considerações Iniciais

O padrão IEEE 802.11p, proposto em 2007, foi criado para adicionar acesso sem fio em ambientes veiculares e ficou conhecido como WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) [ARANITI et al., 2013]. Para [ELTAHIR; SAEED; MOKHTAR, 2014], a capacidade nativa de suportar comunicação V2V, a facilidade de implementação e o baixo custo são algumas características que fazem deste padrão o mais utilizado para comunicação veicular.

Apesar de muitas vantagens, o padrão IEEE 802.11p apresenta problemas com escalabilidade, atraso e qualidade de serviço, além de recursos limitados de rádio. Dentro deste contexto, muitos estudos vêm sendo propostos para investigar a usabilidade do LTE como tecnologia de acesso para suportar comunicação em ambientes veiculares.

Da literatura acerca do tema, existem muitos trabalhos que avaliam a efetividade do sistema LTE como tecnologia de acesso para redes veiculares e apontam vantagens e desvantagens desta solução. No entanto, é possível notar que muitos trabalhos têm focado na capacidade da rede em suportar a carga vinda da alta troca de mensagens entre os veículos, que no geral variam entre 1 a 10 Hz, e no fato de que o LTE não oferece suporte nativo à comunicação V2V.

Ao considerar-se a arquitetura centralizada característica do LTE, o mecanismo de escalonamento de recursos se revela um dos principais desafios para este sistema. Assim, apesar da diversidade de trabalhos encontrados a respeito do tema, nota-se uma carência em trabalhos que investiguem o impacto da política de escalonamento na qualidade de serviço das aplicações neste tipo de rede.

Vale ressaltar que os algoritmos de escalonamento tradicionais do LTE foram originalmente criados para atender os requisitos das comunicações H2H. É de grande valia, portanto, investigar como a aplicação destes algoritmos podem influenciar no desempenho das redes veiculares e quais os tipos de algoritmos são mais adequados para este tipo de comunicação.

Dentro deste contexto, este capítulo inicia com a apresentação de estudos que, como este, investigam os principais desafios técnicos envolvidos nesta solução e traz algumas abordagens que se relacionam com o objetivo desta proposta de trabalho.

4.2 Redes Veiculares Integradas com LTE

As redes veiculares têm ganhado cada vez mais atenção e se mostram como uma tendência importante dentro do contexto das cidades do futuro. Para [ARANITI et al., 2013], prover conectividade sem fio 'sobre rodas' é apenas um dos objetivos das redes veiculares, impulsionado também pelos benefícios sociais e econômicos esperados para os Sistemas de Transportes Inteligentes, que dá suporte à medidas de segurança rodoviária e eficiência de tráfego através do estabelecimento da comunicação veículo-para-veículo e veículo-para-infraestrutura.

[BARROS, 2014] em seu estudo sobre 'Como construir redes veiculares no mundo real' destaca a existência de mais de 1 bilhão de automóveis no mundo todo aguardando para serem conectados à internet e que uma das opções para que esta demanda seja atendida é esperar que a indústria automobilística já introduza nos novos modelos as interfaces de rede necessárias para o estabelecimento da comunicação. Isto já é uma realidade para algumas montadoras, no entanto, em média, apenas 9% da frota mundial é formada por modelos novos e, portanto, seria necessário aguardar em torno de 20 anos para que 90% da frota mundial de veículos estivesse conectada.

Assim, [BARROS, 2014] aponta para uma outra alternativa que é confiar esta responsabilidade inteiramente às redes celulares, tais como o LTE, mas ressalta que esta solução isolada não é economicamente viável para as operadoras celulares devido à nova demanda de dados oriundas dessa gigantesca rede de veículos e que, portanto, uma rede híbrida é a melhor solução.

Em [ARANITI et al., 2013] é possível encontrar uma ótima revisão acerca da usabilidade das redes celulares LTE como tecnologia de acesso para as redes veiculares. [ARANITI et al., 2013] destaca as principais características dessa integração de sistemas e aponta algumas questões técnicas que devem ser superadas, já que a infraestrutura das redes LTE não foi inicialmente planejada para este propósito.

Em seu estudo, [ARANITI et al., 2013] ressalta que as novas aplicações vindas das VANETs possuem características únicas em termos de padrões de geração de pacotes, requisitos de atraso, alta volatilidade, e que isto culmina em uma nova abordagem espacial e temporal que desafiam as tradicionais soluções de telecomunicação. Os autores ainda frisam que as redes LTE se encaixam bem dentro dos requisitos de QoS derivados da categoria de informação e entretenimento, que incluem aplicações tais como *downloads* de conteúdos, VoIP, redes sociais, vídeos, jogos, acesso à nuvem, dentre outros, mas que sua capacidade

de suportar aplicações vindas das categorias de segurança nas estradas e eficiência de tráfego precisa ser melhor explorada devido, sobretudo, à sua arquitetura centralizada.

Neste tipo de arquitetura, a comunicação sempre atravessa a eNB (nó de infraestrutura) antes de chegar ao nó veículo de destino, o que pode acarretar em sérios problemas de atraso. Neste sentido, sabe-se que a comunicação dispositivo-para-dispositivo (D2D, *Device To Device*) já foi proposta no *Release 12* do LTE e está emergindo como uma tecnologia chave para suportar aplicações de segurança e eficiência de tráfego em redes *ad-hoc* veiculares.

O estudo realizado em [ASADI; WANG; MANCUSO, 2014] oferece um bom levantamento acerca da comunicação D2D em redes celulares, enquanto [PIRO et al., 2015] já apresenta um estudo investigando a comunicação D2D-LTE em redes veiculares, propondo e avaliando um novo modelo para este tipo de sistema. A presente dissertação, no entanto, tem enfoque nas redes LTE tradicionais, de arquitetura centralizada.

[ARANITI et al., 2013] também afirma que se tratando da comunicação V2I, aplicações para fins de eficiência de tráfego, como o FCD (*Floating Car Data*) podem tirar proveito da infraestrutura onipresente das redes LTE. Os autores também ressaltam que, apesar de não haver restrições de qualidade de serviço para este tipo de aplicação, quando se tem um número muito alto de veículos conectados enviando mensagens FCD, estes fluxos podem causar uma sobrecarga no canal *uplink* da rede, o que pode impactar nos demais tráfegos H2H, por exemplo.

Ainda dentro deste contexto, não foram encontrados trabalhos sobre políticas de escalonamento que melhor se adequam neste tipo de cenário e o real impacto causado pelas mensagens FCD nos demais tipos de tráfego. Segundo [DEVARAJAN et al., 2013], [MIR; FILALI, 2014] e [VINEL, 2012], quando comparada às redes 802.11p, o uso do LTE pode solucionar os problemas de conectividade de curto-prazo ou intermitentes e é especialmente indicado para comunicações V2I quando os nós estão em alta mobilidade e há pouca linha de visada entre os veículos. Além disso, o LTE pode operar com maiores larguras de banda e taxa de bits.

Em vários trabalhos, [PHAN; REMBARZ; SORIES, 2011], [LOTTERMANN et al., 2012], [KATO et al., 2013], [TUNG; GERLA, 2013], [MIR; FILALI, 2014], [LIOU et al., 2014], [ZHENG et al., 2015] é possível perceber os principais aspectos e desafios quanto ao uso do sistema LTE em redes veiculares:

- **Arquitetura Centralizada:** as mensagens enviadas de um veículo para outro sempre passam pelo núcleo da rede LTE antes de serem encaminhadas para o nó de destino.

Assim, o tráfego *uplink* é interceptado pela eNB antes de ser redistribuído para os veículos de interesse. Deve haver ainda um bom compromisso entre os servidores de tráfego e o núcleo da rede para que haja a disseminação correta de informações ao longo da mesma, evitando equívocos na propagação de alertas, como a inclusão de veículos fora da faixa de alcance de uma mensagem de cooperação. Para isso, os servidores de tráfego precisam manter sempre atualizada a lista de veículos de sua área geográfica, bem como suas coordenadas, seus endereços IPs e posições. Nesse sentido, verificou-se que é mais vantajoso quando os servidores também se encontram instalados no núcleo da rede.

- **Capacidade e Escalabilidade:** o LTE opera com largura de banda de até 20 MHz, em faixas de frequências que variam de 700 à 2690 MHz, podendo alcançar até 300 e 75 Mbps na direção *downlink* e *uplink*, respectivamente, o que potencialmente é capaz de suportar um alto número de veículos por célula e portanto apresenta vantagens quanto à escalabilidade quando comparado às redes 802.11p. No entanto, observa-se que a maioria dos trabalhos traz abordagens simplistas no que se refere ao tipo de tráfego, limitado às mensagens CAMs, DENMs e FCD, mas sabe-se que na prática, o tráfego V2V e V2I serão adicionados aos tráfegos H2H, tornando a questão da escalabilidade mais delicada. O modo de transmissão (*unicast* ou *broadcast*) e a seleção dos canais (*downlink* e *uplink*) também têm efeito na escalabilidade e dentro deste contexto nota-se a falta de abordagens no que tange as políticas de escalonamento de recursos na eNB.
- **Estado do dispositivo (*idle and connected mode*):** no LTE, para fins de economia de recursos e energia, o dispositivo pode estar no modo *connected* (ativo) ou *idle* (inativo) e neste caso o atraso das mensagens também é influenciado por esses modos. Isto se dá já que o dispositivo precisa estar conectado para enviar uma mensagem e caso ele esteja no estado *idle* é demandado um certo tempo para que esta mudança de status ocorra, tempo este maior do que o tempo de um simples atraso de transmissão. Assim, devido a alta periodicidade das mensagens CAMs (em média 10 Hz) e seus requisitos de atraso (até 100 ms), é necessário que o dispositivo esteja sempre em modo conectado, o que acarreta num maior consumo de energia e também no uso constante de recursos de rádio da rede.
- **Cobertura e Mobilidade:** quanto à cobertura, a vantagem de se utilizar o LTE é que a infraestrutura destas redes já se encontra instalada, na maioria das vezes, e possuem uma grande área de cobertura, superando o problema de intermitência de

sinal devido à baixa cobertura de redes como a 802.11p. Nesse sentido, a alta cobertura ajuda a superar os problemas nos cenários em que há uma baixa densidade de veículos, culminando em grandes distâncias entre eles, o que acarreta em problemas no estabelecimento de conexão direta entre veículos, com pouca ou nenhuma linha de visada e podem superar problemas de propagação quando na presença de prédios e demais obstruções, o que pode atenuar, sobretudo, os sinais que se propagam em frequências mais altas, como é o caso da rede 802.11p, que trabalha com 5.86 à 5.92 GHz. Quanto à mobilidade dos nós veículos, o LTE também possui uma alta tolerância, suportando velocidades de até 350 km/h.

4.3 Escalonamento de Recursos em Redes Veiculares

O escalonamento de recursos, como já introduzido, refere-se à atividade de alocação dinâmica de RBs aos nós usuários da rede que possuem fluxo ativo [SESIA; TOUFIK; BAKER, 2011]. Essa atividade é realizada a cada TTI e sua política é fundamental para o bom desempenho da rede e a satisfação dos requisitos das aplicações que estão sendo requeridas.

Em [DIAS et al., 2011] é estudado o impacto das políticas de escalonamento e descarte de pacotes no desempenho de redes veiculares tolerantes a atraso. Essas redes não lidam com aplicações de tempo real e são utilizadas, sobretudo quando se tem uma infraestrutura pobre, apresentando *link* instáveis. Essas redes *ad-hoc* combinam esquemas de roteamento com armazenamento de pacotes à longo prazo. Essa combinação, no entanto, acarreta num alto o consumo de recursos e baixa eficiência espectral. Os experimentos foram realizados em um cenário de teste real, em laboratório, utilizando uma rede IEEE 802.11. Os autores concluíram que o desempenho da rede é melhorado à nível de atraso e vazão quando os algoritmos de escalonamento são baseados em critérios de tempo de vida de pacote.

[ZHANG et al., 2015] propõe um novo protocolo de escalonamento baseado em fator de pesos para redes 802.11p utilizando tecnologia de transmissão TDMA (*Time Division Multiple Access*). Nesta rede, os pontos de acesso ao longo das estradas (RSU, *Road Side Unit*) controlam os fluxos e coletam as informações vindas dos nós veículos em sua área de cobertura e calcula seus respectivos fatores de peso para então realizar o escalonamento de recursos. Esse escalonador utiliza a qualidade do canal, a velocidade e a categoria de acesso de cada veículo para calcular os fatores de peso. Os autores afirmam que esta metodologia é capaz de melhorar o desempenho da rede a nível de vazão quando comparada às políticas tradicionais.

[LIU et al., 2015] apresenta um estudo de escalonamento para disseminação cooperativa de dados em uma infraestrutura híbrida de comunicação I2V e V2V. Os autores propuseram uma política chamada de CDS (*Cooperative Data Scheduling*). Nessa política, cada veículo informa à RSU a lista de seus veículos vizinhos e os identificadores de dados recentemente solicitados e atendidos. A RSU em seguida seleciona os nós móveis transmissores e receptores e os recursos correspondentes para a comunicação V2V, ao mesmo tempo que transmite em *broadcast* informações para sintonizar o canal I2V. O objetivo é maximizar o número de veículos que tiveram fluxos atendidos em uma rede do tipo 802.11p. Os resultados mostraram que a proposta apresenta superioridade e escalabilidade quando comparada às políticas usuais. Os autores também ressaltam que este trabalho traz o primeiro conceito de implementação de uma rede VANET definida por *software*.

No que tange ao escalonamento de recursos em redes veiculares utilizando redes LTE, em [KIHLE et al., 2012] os autores avaliam o desempenho de diferentes algoritmos de escalonamento no sentido *downlink* da rede em cenários urbanos e rurais, nos quais aplicações de voz, vídeo e segurança coexistem. Para as aplicações de segurança, é utilizada a comunicação em *broadcast* a fim de evitar colisões. Foram avaliados três escalonadores: PF, MLWDF, EXP-PF. A avaliação de desempenho se deu em torno do atraso e perda de pacotes. Os resultados mostraram que apesar do alto valor de perda de pacotes, as mensagens de segurança eram reenviadas várias vezes e, portanto, ainda assim eram entregues aos seus destinos. Também se pôde concluir que, apesar de se utilizar comunicação *broadcast*, o atraso sempre aumenta conforme cresce o número de veículos no cenário. Apesar disso, as simulações mostraram que o LTE continua sendo uma opção viável para as redes veiculares.

Em [ZHOU et al., 2013] é avaliado o desempenho do protocolo TCP em um ambiente veicular utilizando diferentes escalonadores de recursos no *downlink* da rede LTE. Os algoritmos testados foram PF, BET e MT. Os nós veículos se locomoviam a uma velocidade média de 60 km/h. Os autores avaliaram os escalonadores à nível de atraso e vazão e compararam o impacto das versões implementadas no domínio da frequência e no domínio do tempo. A diferença no desempenho dos algoritmos foi atribuída à fatores tais como a granularidade da alocação de recursos, ao se basear ou não nas condições de canal e no aumento do número de usuários. Dentre os três, o PF foi o que apresentou o melhor desempenho geral.

Para finalizar, [TUNG; GERLA, 2013] investigou a facilidade do LTE em lidar com aplicações de segurança veicular. Os autores acentuaram que o principal desafio do LTE em

suportar a transmissão de mensagens cooperativas é a largura de banda limitada. Neste trabalho foi discutido o efeito de duas diferentes estratégias de escalonamento: persistente e semipersistente. Os resultados mostraram que o escalonamento persistente pode suportar uma quantidade considerável de usuários. No entanto, se aplicada uma política de frequência adaptativa de *beacons* aliada a uma estratégia semipersistente, a capacidade da rede pode ser aumentada.

Todos os trabalhos apresentados possuem contribuições na área de redes veiculares, porém, se tratando do problema do escalonamento de recursos de rádio, também apresentam lacunas que, neste sentido, devem ser preenchidas para que a rede móvel possa alcançar um desempenho ainda melhor no que se refere ao uso eficiente da largura de banda disponível. A Tabela 8 descreve a síntese dos principais trabalhos abordados neste Capítulo.

Tabela 8. Síntese dos principais Trabalhos Correlatos.

Referência	Área	Características Principais	Principais lacunas encontradas
[PHAN; REMBARZ; SORIES, 2011]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Apresenta uma análise de desempenho da rede LTE veicular para diferentes tipos de serviços (aplicações CAMs e DENMs)	Não há discussão específica quanto ao impacto da política de escalonamento de recursos. Para a rede LTE, utiliza o RR como escalonador.
[DIAS et al., 2011]	Políticas de escalonamento em Redes Veiculares	Avalia o impacto de diferentes combinações de políticas de escalonamento e descarte de pacotes no desempenho de redes veiculares tolerantes a atraso (VTDN)	A política não trata o escalonamento de recursos de rádio, mas de pacotes; é baseada em redes 802.11p; é limitada a serviços de tempo não real
[KIHL et al., 2012]	Políticas de escalonamento de recursos em Redes LTE Veiculares	Avaliação de desempenho dos algoritmos PF, MLWDF, EXP-PF, no sentido <i>downlink</i> da rede LTE veicular	A avaliação de desempenho utiliza apenas critérios de atraso e perda de pacotes
[VINEL, 2012]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Fornecer uma comparação teórica sobre as vantagens e desvantagens da utilização dos padrões LTE e IEEE 802.11p para redes veiculares	Apesar de apontar o escalonamento como processo crucial para o desempenho da rede LTE, não há discussão específica a respeito do tema.

[LOTTERMANN et al., 2012]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Análise de desempenho da rede LTE em suportar aplicações veiculares. Configurações específicas a nível de QoS foram adotados a fim de priorizar diferentes serviços	Não há discussão específica quanto ao impacto da política de escalonamento de recursos. Para o LTE, utiliza o PF como escalonador.
[TUNG; GERLA, 2013]	Políticas de escalonamento de recursos em redes LTE veiculares	É analisada a capacidade da rede LTE em suportar escalonamento persistente na transmissão de mensagens CAMs	Traz um modelo analítico do sistema, no qual a rede LTE atende exclusivamente as mensagens CAMs
[KATO et al., 2013]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Avalia a viabilidade técnica do uso de uma combinação de servidores baseados em nuvem e da rede LTE para suportar aplicações veiculares, apresentando melhorias em atraso e escalabilidade	Não há discussão específica quanto ao impacto da política de escalonamento de recursos. Para a rede LTE, utiliza o RR como escalonador.
[ZHOU et al., 2013]	Políticas de escalonamento de recursos em Redes LTE Veiculares	Avaliação de desempenho dos algoritmos PF, BET, e MT no sentido <i>downlink</i> da rede LTE veicular	A avaliação de desempenho utiliza apenas critérios de atraso e vazão
[DEVARAJAN et al., 2013]	Redes Veiculares Integradas com LTE	É proposta a integração dos padrões IEEE 802.11p e LTE para melhorar o desempenho de redes veiculares	Não há discussão específica quanto ao impacto da política de escalonamento de recursos. Para o LTE, utiliza o RR como escalonador.
[ARANITI et al., 2013]	Redes Veiculares Integradas com LTE	<i>Survey</i> - levantamento acerca dos pontos fortes e fracos a respeito do uso do LTE como tecnologia de acesso para redes veiculares	O escalonamento de recursos é apontado como um dos desafios a serem tratados nesta integração, mas nenhuma política é abordada.
[BARROS, 2014]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Traz uma revisão dos desafios superados para a implantação de uma rede VANET a partir de um <i>test bed</i> realizado na cidade do Porto, Portugal.	Não há orientações específicas quanto ao algoritmo de escalonamento de recursos utilizado

[ASADI; WANG; MANCUSO, 2014]	Comunicação D2D	Faz uma revisão sobre o uso da comunicação D2D em redes móveis celulares	É apontada como possível solução para redes veiculares mas não há orientações específicas neste sentido
[MIR; FILALI, 2014]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Comparação do desempenho da rede veicular utilizando, exclusivamente, os padrões IEEE 802.11p ou LTE como tecnologia de acesso	Não há discussão específica quanto ao impacto da política de escalonamento de recursos. Para o LTE, utiliza o PF como escalonador.
[LIOU et al., 2014]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Avalia o desempenho da rede LTE em suportar aplicações VoIP em cenário veicular. Verifica o impacto da velocidade na qualidade de serviço obtida.	Não há discussão específica quanto ao impacto da política de escalonamento de recursos.
[ZHENG et al., 2015]	Redes Veiculares Integradas com LTE	Traz uma revisão acerca dos principais desafios, soluções e arquiteturas para suportar os requisitos das redes veiculares heterogêneas	É feita uma discussão teórica a respeito dos desafios da alocação de recursos, mas nenhum esquema específico é abordado como possível solução
[ZHANG et al., 2015]	Políticas de escalonamento de recursos em Redes Veiculares	É proposto um novo protocolo de escalonamento baseado em fator de pesos para redes 802.11p centralizadas utilizando tecnologia de transmissão TDMA	A política não considera o padrão de geração de mensagens; é limitada para redes 802.11p
[LIU et al., 2015]	Políticas de escalonamento de recursos em Redes Veiculares	Proposta de uma política de escalonamento de mensagens de cooperação para redes veiculares definidas por software	Embora a política maximize o número de veículos servidos, não distingue a prioridade de transmissão para diferentes veículos; é baseada em redes 802.11p

[PIRO et al., 2015]	Comunicação D2D em redes LTE veiculares	Trata o desempenho da rede em função do padrão da aplicação e do comportamento do canal, a fim de avaliar o número de RBs necessários para transmitir as CAMs e o número máximo de veículos suportados pela rede	Traz um modelo analítico do sistema, no qual a rede LTE atende exclusivamente as mensagens CAMs
---------------------	---	--	---

A partir deste levantamento, é possível demonstrar lacunas quanto às políticas de escalonamento de recursos existentes na literatura, que podem ser utilizadas como objeto de estudo desta dissertação. Neste sentido, pode-se listar algumas lacunas que requerem mais atenção e que são contemplados ao longo deste trabalho: o estudo da interferência recíproca entre as aplicações veiculares e as demais aplicações da rede, tais como vídeo; o efeito das classes de QoS selecionadas para carregarem as aplicações veiculares; avaliação de desempenho a partir de critérios mais abrangentes, não só em torno de métricas de QoS, mas também a justiça na distribuição de recursos, eficiência espectral e complexidade computacional; além do estudo da efetividade das técnicas tradicionalmente H2H de escalonamento empregadas na eNB ao se tratar de um cenário de aplicações também veiculares.

Destá forma, com este trabalho, espera-se providenciar direções de estratégias de escalonamento que ajudem no desenvolvimento de novos algoritmos, que possam atender a alta mobilidade dos nós e o tratamento destes novos padrões de tráfego e novas classes de QoS, a fim de corresponder às exigências das aplicações veiculares sem que haja a penalização das comunicações H2H.

4.4 Considerações Finais

São muitos os desafios a respeito da capacidade das redes LTE em suportar aplicações veiculares. Cada um destes merece uma análise crítica e profunda a fim de que esta solução seja implementada de maneira confiável e atrativa, tanto do ponto de vista do operador da rede como também do usuário da mesma.

Como visto, a literatura acerca do tema fornece alguns resultados preliminares e, sobretudo, aborda o suporte às mensagens CAMs, DENMs e FCD. A maioria dos trabalhos,

no entanto, se limitam a cenários mais simples, onde não existe nenhum outro tipo de tráfego no sistema. Assim, se torna necessária uma investigação mais profunda quanto aos efeitos da adição deste tipo de mensagens aos demais fluxos característicos das redes celulares, tais como o acesso à internet, *streaming* de vídeo, VoIP, entre outros.

A partir deste levantamento é possível observar que as mensagens DENMs adicionam pouco tráfego à rede quando comparadas às mensagens CAMs, por exemplo, ficando a capacidade da célula parcialmente e temporariamente utilizada. No entanto, é preciso explorar melhor os cenários em que há um número grande de veículos conectados na célula.

Observa-se também que não há muitos estudos detalhados a respeito das políticas de escalonamento da eNB e o impacto que esta escolha pode causar no desempenho da rede VANET-LTE. No canal *uplink* da rede, considerado o gargalo deste tipo de rede, a escolha do escalonador de recursos se torna ainda mais crítica.

5. ANÁLISE DO IMPACTO DO ALGORITMO DE ESCALONAMENTO DE RECURSOS NO DESEMPENHO DE REDES VEICULARES UTILIZANDO O LTE COMO TECNOLOGIA DE ACESSO

5.1 Considerações iniciais

O objetivo deste capítulo é descrever a metodologia de estudo proposta para avaliar o impacto do algoritmo de escalonamento de recursos no desempenho de aplicações veiculares utilizando redes LTE. São abordados os principais aspectos no que tange à escolha da técnica de avaliação de desempenho, o simulador utilizado e as métricas de avaliação. A metodologia é descrita e apresentada, demonstrando como exemplo prático um estudo de caso, que também será discutido. Em seguida, são apresentados os resultados do presente estudo, obtidos a partir da metodologia proposta, bem como suas análises.

5.2 Simulação

A pesquisa em redes sem fio tem utilizado várias ferramentas tais como medição, simulação computacional, emulação e modelagem analítica, para avaliar o desempenho dos mais diversos sistemas. Segundo [ZIMMERMANN et al., 2007] cada técnica possui um nível diferente de abstração das características reais da rede e isto torna a aquisição dos resultados mais fáceis ou difíceis de serem transportados para a realidade.

[JAIN, 1991] em seu livro “*Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques For Experimental Design Measurements Simulation And Modeling*” afirma que o desempenho é um critério chave para a concepção, aquisição e uso de sistemas computacionais. [JAIN, 1991] enumera três aspectos fundamentais para que seja realizada uma avaliação de desempenho confiável: selecionar técnicas adequadas de avaliação, métricas de desempenho e carga de trabalho; conduzir a avaliação de desempenho de maneira correta e honesta; e o uso de técnicas estatísticas fiáveis e próprias para comparar diferentes alternativas.

Quando se trata de medição, deve-se lançar mão de ferramentas de monitoramento e aferição para coletar e exibir informações sobre o estado da rede. Já a simulação e emulação

de sistemas utilizam recursos matemáticos e computacionais para modelar o funcionamento de uma gama de processos reais. A principal diferença entre essas duas técnicas é que na simulação o objetivo é imitar o comportamento de determinado evento, enquanto na emulação o objetivo é imitar o comportamento de um conjunto de *hardware*. Finalmente, na modelagem analítica um fenômeno deve ser descrito matematicamente, na qual as principais técnicas utilizam autômatos celulares e equações diferenciais, parciais e/ou ordinárias.

Na prática, a seleção adequada da técnica a ser aplicada no estudo, na maioria das vezes, depende dos recursos disponíveis (equipamentos, *softwares*), da habilidade do pesquisador em operar e utilizar os recursos, e do tempo que se tem para realizar a construção do cenário de testes e análises. É de grande importância considerar também o nível de detalhamento e precisão da técnica para solucionar o problema em questão.

Segundo [ZIMMERMANN et al., 2007], a simulação é a forma mais utilizada de estudar redes móveis sem fio, uma vez que esta técnica oferece uma gama de combinações convenientes, oferecendo flexibilidade e controle do ambiente de estudo. [CACHOV et al., 2005] afirma também que a simulação e avaliação de redes são comumente empregadas para determinar o desempenho da rede, além de identificar e localizar possíveis pontos de robustez e fragilidade do sistema.

Nesta dissertação, a avaliação de desempenho dos algoritmos de escalonamento de recursos em redes LTE veiculares se dá através de simulação, a partir da criação de um ambiente artificial, semelhante ao real, com seus principais elementos e protocolos. Os principais fatores que levaram a esta escolha são a praticidade, a economia de tempo e de recursos financeiros. Vale ressaltar aqui que trata-se de uma rede móvel complexa e com riqueza de detalhes, não sendo possível, neste caso, reproduzi-la na prática para fins de pesquisa.

[BITTENCOURT, 2013] destaca que o uso de simuladores garante a reprodutibilidade dos resultados, simplifica o gerenciamento dos experimentos e provê flexibilidade na configuração do ambiente de teste, isto tudo aliado à um baixo custo ou, muitas vezes, nulo ao se utilizar ferramentas de simulação já disponíveis. [IVANOV; HERMS; LUKAS, 2007] também ressalta que o uso de simuladores permite o estudo de redes completamente novas e que ainda não possuam implementações reais.

Apesar de todas as vantagens oferecidas pela técnica de simulação, [JOHNSON; MARGALHO, 2011] chama a atenção para um problema comum na simulação de redes: a geração de modelos falhos, nos quais os resultados oferecidos não são corretos. [JOHNSON; MARGALHO, 2011] afirma que isso ocorre devido a problemas na especificação do

software ou dos modelos estatísticos e que, devido a isto, é recomendável usar simuladores que já tenham sido avaliados pela comunidade científica ou profissional e que são bem aceitos nestes meios.

Quando se trata da avaliação de redes por meio de simulação, há uma gama de simuladores disponíveis, sejam eles livres ou com licenças comerciais, com ou sem interface gráfica, de código aberto ou proprietário. Estas ferramentas incluem desde aplicações simples até as mais complexas. Dentre as mais diversas ferramentas, optou-se neste estudo pela utilização do Network Simulator 3 (NS-3). Esta escolha foi motivada pela facilidade de aquisição da mesma, já que trata-se de um *software* livre e de código aberto, e pela ótima aceitação desta ferramenta pela comunidade acadêmica. Além disso, o NS-3 é um projeto ativo e possui uma vasta documentação.

5.2.1 NS-3

O NS-3 [NS-3, 2016a] (chamado assim em referência à sua geração) é um simulador de eventos discretos escrito em C++, desenvolvido para modelar sistemas de internet, direcionado principalmente para pesquisa e uso educacional. Trata-se de um projeto iniciado em 2006 e é utilizado sob a licença GNU GPLv2. O NS-3 fornece modelos de como os pacotes de dados são trabalhados e tratados pela rede e providencia um mecanismo de simulação para os usuários realizarem experimentos realísticos de redes cabeadas ou sem fio. O NS-3 é usado, sobretudo, em sistemas Linux e é executado via terminal.

Além disso, o NS-3 fornece vários módulos e modelos. Cada módulo é construído como uma biblioteca e o conjunto de várias dessas bibliotecas podem ser combinados em um programa, a fim de conduzir uma determinada simulação. A última versão disponível até o presente momento é o NS-3.25 e dentre seus módulos encontram-se os módulos do LTE. Quanto aos modelos, estes reúnem os objetos do mundo real, tais como protocolos, dispositivos, características do meio ambiente, modelos de propagação e etc., representados através de modelos abstratos. A lista completa dos módulos e modelos disponíveis pode ser encontrada em [NS-3, 2016b].

Nesta dissertação, é utilizado, dentre outros, o módulo do LTE, também chamado LENA (LTE-EPC Network Simulator), para simular as dinâmicas da interface rádio deste tipo de sistema. O módulo LENA reproduz interações do EPC, bem como as várias pilhas de protocolos da camada de rádio, tais como RRC e MAC. Ele possui também suporte para

modelar redes LTE heterogêneas, incorporando abstrações do comportamento e do impacto do uso de *femtocells* na rede.

Por sua vez, o modelo de mobilidade dos veículos (nós da rede) foi realizado a partir do uso da ferramenta SUMO (*Simulation of Urban MObility*) [KRAJZEWICZ et al., 2012], desenvolvida pelo *Institute of Transportation Systems* de Berlin, fundado em 2001 e que reúne cerca de 150 cientistas dos mais variados campos de estudo, tais como engenharia, ciência da computação, psicologia, economia, dentre outros, para o desenvolvimento de soluções de sistemas automotivos e estradas, visando, sobretudo, a gerência do tráfego de veículos. Trata-se de uma ferramenta livre e de código aberto para a simulação de tráfego. Com o SUMO é possível desenhar o cenário de tráfego desejado, incluindo os nós veículos e ruas, bem como definir a direção e o sentido do fluxo de veículos, além da velocidade máxima permitida, número de faixas por avenida, e etc.

5.2.2 Estudo de caso

Para efeito de aplicação prática da metodologia proposta, foi utilizado como estudo de caso a avaliação de desempenho de cinco algoritmos de escalonamento de recursos de rádio em redes LTE sob condições de cenários veiculares. Os algoritmos avaliados são: *Round Robin*, *Proportional Fair*, *Throughput to Average*, *Priority Set* e *Channel and QoS Aware*. A escolha dos algoritmos se deu a fim de incluir diferentes abordagens de escalonamento: independente de canal, sensível ao canal não baseado em QoS e sensível ao canal baseado em QoS.

A análise da efetividade de cada algoritmo se dá por meio de critérios que avaliam a vazão, atraso, perda de pacotes, eficiência espectral, justiça e análise qualitativa da complexidade computacional. O objetivo é oferecer uma análise abrangente de cada estratégia.

A avaliação de desempenho se dá por meio de simulação. Os cenários avaliados contemplam aplicações V2I e I2V. Para simular comunicação V2I, é utilizado padrão de geração de mensagens CAMs, com pacotes de 256 bytes transmitidos a uma frequência de 10 Hz. Já para I2V, é simulado tráfego de vídeo, com taxa de transmissão de 440 kbps.

A rede implementada traz um cenário no estilo *5x5 Manhattan Grid*, totalizando 25 quarteirões. Os algoritmos são avaliados sob 6 diferentes cargas de trabalho, geradas por 20, 40, 60, 80, 100 e 120 veículos. Em todos os cenários, há 20 dispositivos utilizando exclusivamente aplicação de vídeo, no sentido I2V da rede. Os demais dispositivos enviam

CAMs no sentido V2I. Deseja-se, assim, simular aplicações de entretenimento e segurança nas estradas.

Portanto, são testados 30 cenários diferentes. Por intermédio das métricas de avaliação escolhidas, deseja-se levantar vantagens e desvantagens na utilização de cada estratégia de escalonamento, bem como apontar critérios importantes no desenvolvimento de novos algoritmos.

Com este estudo de caso, objetiva-se realizar uma análise bastante significativa do escalonamento de recursos rádio e o seu impacto no desempenho de redes veiculares utilizando o LTE como tecnologia de acesso. Vale ressaltar que não foi encontrada abordagem similar na literatura consultada.

5.3 Metodologia de Simulação Proposta

Para a realização do estudo objeto desta dissertação, foi necessária a elaboração de uma metodologia capaz de dar subsídios para que se possa avaliar o desempenho de uma rede LTE com aplicações veiculares. Quando se trata de avaliação de desempenho de sistemas computacionais, a modelagem e execução dos experimentos deve ser conduzida de maneira justa para todos os cenários, de forma a oferecer resultados consistentes e coerentes. Vale ressaltar que a metodologia proposta aqui pode ser generalizada e aplicada em diversos outros problemas. O fluxograma que apresenta a sequência de etapas pode ser encontrado na Figura 15. Como se pode observar, o seu ciclo é composto de 11 etapas, listadas a seguir e descritas ao longo desta seção. Ao longo deste capítulo, a descrição de cada etapa acompanhará a sua aplicação prática no estudo de caso introduzido anteriormente.

1. Estudo do sistema;
2. Definição do(s) objetivo(s);
3. Definição do modelo do sistema;
4. Definição das métricas de desempenho;
5. Definição das classes de tráfego e seus critérios de QoS;
6. Escolha do Simulador;
7. Implementação do modelo no simulador;
8. Criação dos cenários;
9. Definição da estratégia de execução;
10. Execução dos experimentos;
11. Análise e interpretação dos resultados.

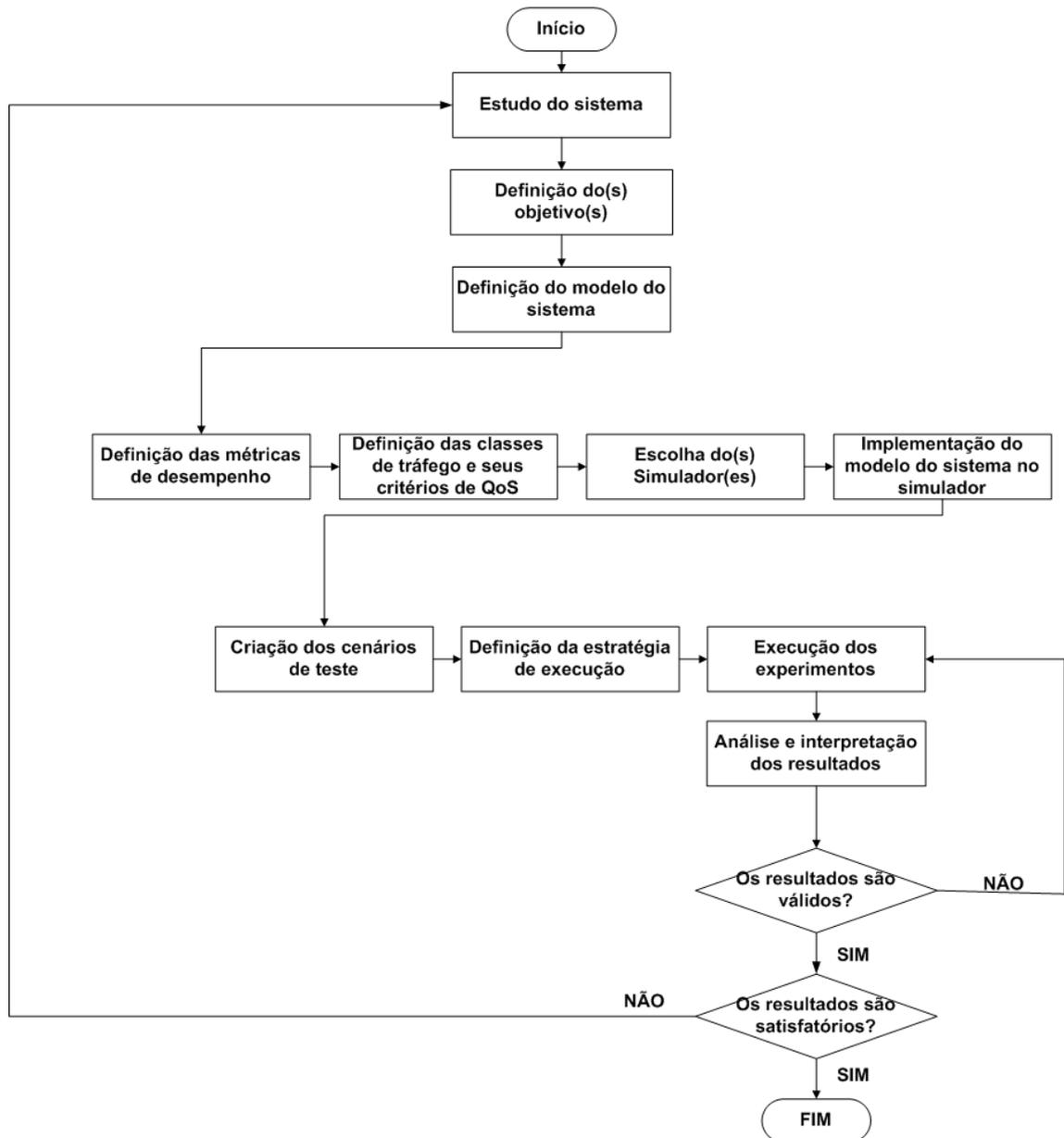


Figura 15. Fluxograma da metodologia proposta.

5.3.1 Estudo do Sistema

Para [JAIN, 1991], a avaliação de desempenho é uma arte e requer um conhecimento íntimo do sistema que se quer modelar. Assim, a etapa inicial de toda avaliação deve iniciar pelo estudo detalhado do sistema, a fim de que se tenha uma visão correta do seu funcionamento, processos e limitações.

Neste caso, em especial, fez-se necessário realizar o estudo profundo acerca das principais tecnologias que fazem parte do sistema LTE, das características fundamentais da comunicação veicular e do funcionamento de todos os algoritmos de escalonamento aqui avaliados. Esta etapa é muito importante para que as definições a serem feitas nas próximas

etapas sejam bem planejadas e válidas, a fim de que, apesar das abstrações, o sistema simulado possa reproduzir de maneira satisfatória o comportamento de um sistema real.

5.3.2 Definição do(s) objetivo(s)

Sabe-se que as metas são partes fundamentais de qualquer empreendimento e que a ausência delas pode destiná-lo ao fracasso. Esta etapa é, portanto, crucial dentro da metodologia de avaliação. A definição precisa dos objetivos da simulação, tais como as métricas a serem avaliadas, carga de trabalho, as variáveis do modelo, o problema o qual se quer solucionar ou analisar, tudo deve ser bem pensado para que as demais etapas sejam bem realizadas.

Assim, uma vez que o problema fica claro e os objetivos estão bem escritos, se torna mais fácil encontrar a solução. A partir do levantamento dos trabalhos relacionados, identificou-se possíveis lacunas quanto ao estudo de redes LTE veiculares e baseado nestas, delineou-se os objetivos desta dissertação: estudar o impacto de diferentes algoritmos de escalonamento no desempenho de redes veiculares LTE. Para isso, simulou-se os tráfegos de entretenimento e mensagens de segurança nas estradas em um ambiente veicular, no qual todos os veículos são atendidos por uma eNB. Os desempenhos desses algoritmos são avaliados por meios de critérios que avaliam a vazão de dados, atraso, perda de pacotes, eficiência espectral, justiça e complexidade computacional.

5.3.3 Definição do modelo do Sistema

O modelo do sistema trata-se de uma abstração do sistema real. Logo, apenas as características essenciais devem ser consideradas. Esse planejamento, no entanto, deve ser feito com cautela, a fim de que o modelo contenha todos os detalhes suficientes para que o sistema simulado possa estimar de maneira correta o comportamento do sistema real.

Assim, por já se tratar de uma abstração do sistema real, a inclusão de parâmetros não essenciais pode adicionar um número maior de aproximações desnecessárias ao modelo, aumentar a carga de processamento e ainda render resultados menos precisos. Neste trabalho, são essenciais ao modelo:

A camada física do sistema LTE, que dá suporte e influencia no desempenho dos requisitos das aplicações a serem utilizadas, cujas características englobam antenas, potencia

de transmissão e recepção dos dispositivos, canais de frequência, largura de banda, suporte a mobilidade, área de cobertura, capacidade de vazão, dentre outras.

O Protocolo MAC, que oferece um conjunto de canais lógicos de rádio que serão multiplexados nos canais de transporte da camada física. A camada MAC é fundamental neste modelo, pois esta se encontra na eNB e nela estão implementados os algoritmos escalonadores de recursos de rádio, alvo deste estudo.

O número de nós também é um fator crítico no desempenho de um sistema. Portanto, esta definição é um ponto fundamental e influencia diretamente na qualidade de serviço. Sabe-se que qualquer sistema possui uma capacidade máxima de atendimento. Quanto maior o número de nós, maior a disputa por recursos e o processamento nas camadas de controle. Neste estudo o número de eNB, *gateway* e servidores não varia de um cenário para outro, porém o mesmo inclui a variação do número de veículos conectados a fim de verificar o comportamento da rede em situações de baixa, média e alta carga. Quanto à mobilidade, os nós veículos se movimentam, em média, a 30 km/h.

O modelo de tráfego se faz necessário para que o fluxo de dados presente na rede represente de fato o fluxo real de comunicação veicular. Aqui são definidos o sentido do fluxo, o tamanho e a taxa de entrega dos pacotes.

Quanto ao modelo do canal, utilizou-se um modelo do tipo *bursty*, no qual se admite erros durante a transmissão de dados de um nó para outro. O modelo de propagação utilizado foi o modelo de *Friss*.

Considerando a carga de trabalho de cada nó veículo diretamente proporcional à vazão de dados, os nós veículos podem impor cargas distintas à rede, já que existem dois tipos de aplicação na rede: entretenimento e mensagens de segurança, cada uma destas apresentam atributos próprios, tais como tamanho de pacotes e taxa de transmissão.

5.3.4 Definição das métricas de desempenho

Segundo [JAIN, 1991], as métricas se referem aos critérios utilizados para quantificar o desempenho do sistema e a escolha correta dessas métricas depende do tipo de serviço oferecido pelo sistema que está sendo modelado e dos objetivos da avaliação. Deve-se também definir em que nível se pretende medir o desempenho, tais como em nível de aplicação, transporte, rede, dentre outros.

Esta dissertação utiliza como critérios de avaliação as seguintes métricas: vazão (taxa de bits transmitidos por segundo), atraso (tempo que um pacote leva para atravessar a rede

desde a origem até o destino), razão de perda de pacotes (taxa de pacotes perdidos durante a transmissão) e eficiência espectral (medida que aponta a eficiência do sistema em utilizar a largura de banda de um canal). Ao se tratar da avaliação de algoritmos de escalonamentos, além das métricas clássicas em nível de rede, também são incluídas duas outras análises: complexidade computacional e justiça. Quanto à primeira, é realizada uma análise qualitativa do custo computacional de cada algoritmo. Já esta última, mede a justiça do algoritmo na distribuição de recursos de rádio entre os veículos conectados à eNB. Para esta análise, é utilizado o índice de justiça de Jain [CHISUNG; DONG, 2007]. Esse índice apresenta o quão justa é a distribuição de um recurso, neste caso, nosso recurso será a própria vazão. Esta métrica varia de 0 a 1 e é obtida através da Equação 1, descrita em [CHISUNG; DONG, 2007] e [LIN; LAURIE, 2008], na qual 1 indica a máxima justiça e 0 nenhuma justiça.

$$f(V_1, V_2, \dots, V_n) = \frac{[\sum_{n=1}^n V_n]^2}{n \sum_{n=1}^n (V_n)^2} \quad (7)$$

Na Equação (7), n é o número de veículos conectados e V_n é a vazão obtida pelo n ésimo veículo ao longo de toda a simulação.

5.3.5 Definição das classes de tráfego e seus critérios de QoS

Nesta etapa definem-se as classes de tráfego e seus critérios de qualidade de serviço. Conforme já citado nos capítulos anteriores, as aplicações veiculares incluem pelo menos três categorias de serviços de comunicação: segurança nas estradas, eficiência de tráfego e entretenimento. Esta última pode incluir aplicações tais como *downloads* de conteúdos, VoIP, redes sociais, vídeos, jogos, acesso à nuvem, dentre outros.

O presente estudo utiliza tráfego de vídeo, a fim de simular a categoria de entretenimento, e mensagens de segurança nas estradas, chamadas CAMs (*Cooperative Awareness Message*). As CAMs são comumente utilizadas para reportar o estado da estrada no que se refere à velocidade abaixo ou acima dos limites da estrada, mensagens de emergência, aviso de colisões, obstruções, rotas alternativas, aproximação de veículos acima do limiar de segurança, dentre outros [ARANITI et al., 2013].

Sabe-se ainda que, de maneira geral, no LTE, várias aplicações podem estar sendo utilizadas em um dispositivo móvel ao mesmo tempo, cada uma destas solicitando diferentes requisitos de QoS. No LTE, os diferentes tráfegos são categorizados segundo seus requisitos de QoS em classes que refletem os serviços e as aplicações suportadas pela rede, identificáveis através do Identificador de Classe de QoS (QCI). Estas classes, por sua vez, são caracterizadas pelo atraso máximo tolerável entre o dispositivo e o SGW (*gateway* de saída da rede); taxa máxima de perda de pacotes; taxa de bits garantida ou não (GBR, *Guaranteed Bit Rate* ou Non-GBR) e a prioridade com que o tráfego atravessa a rede. Nesta última, quanto menor o valor, maior a prioridade.

No caso do tráfego de vídeo, este foi categorizado na classe 3, *streaming* de vídeo, que apresenta prioridade 5, atraso máximo de 300 ms, taxa de perda de pacotes de 10^{-6} , com garantia de taxa de bits. Quanto às mensagens CAMs, segundo [ARANITI et al., 2013], é tolerável um atraso máximo de 100 ms, no entanto não existem critérios adotados quanto à garantia de taxa de bits, taxa de perda de pacotes e prioridade. Com essas características, as CAMs podem se encaixar na classe 5, de sinalização, com prioridade 1, atraso máximo de 100 ms, Non-GBR e 10^{-6} de taxa de perda de pacotes. A tabela completa do QCI pode ser encontrada no Capítulo 2 desta dissertação. A Figura 16 traz uma ilustração com os diferentes tráfegos da rede.

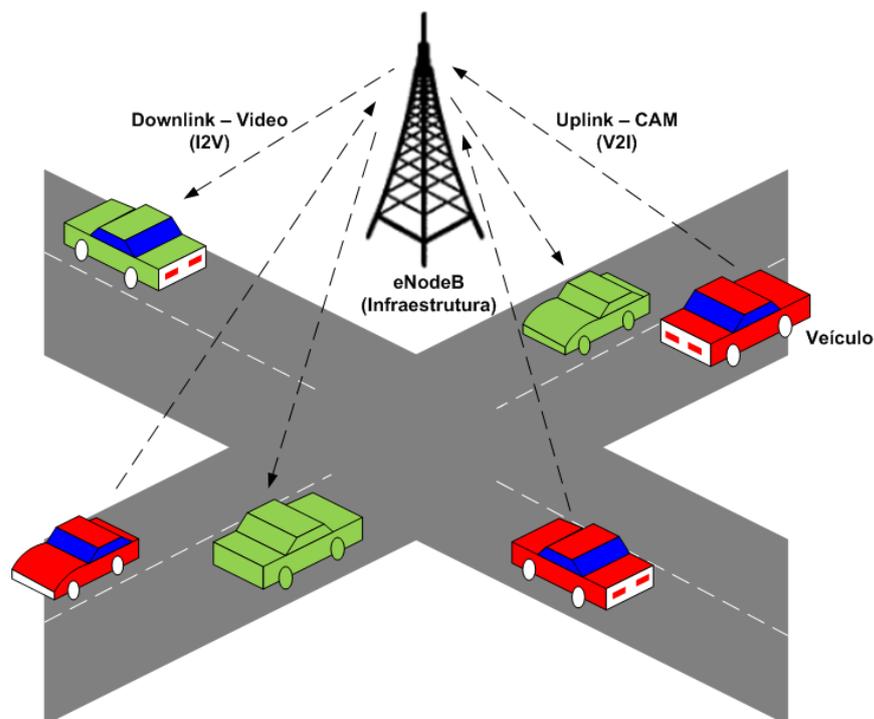


Figura 16. Tráfegos da rede.

5.3.6 Escolha do Simulador

A escolha do simulador é uma etapa de busca e pesquisa. É de suma importância que o simulador escolhido seja capaz de dar suporte às definições listadas nas etapas 2 a 5, caso contrário, não será possível alcançar os objetivos traçados. Deve-se levar em consideração também a facilidade de uso do pesquisador em relação à linguagem e/ou estrutura da ferramenta e a documentação disponível, a fim de otimizar o tempo de aprendizado e implementação. Conforme já citado e justificado na seção anterior, neste trabalho são utilizados os simuladores NS-3 e SUMO para a simulação da rede e a geração dos *traces* de mobilidade dos veículos, respectivamente.

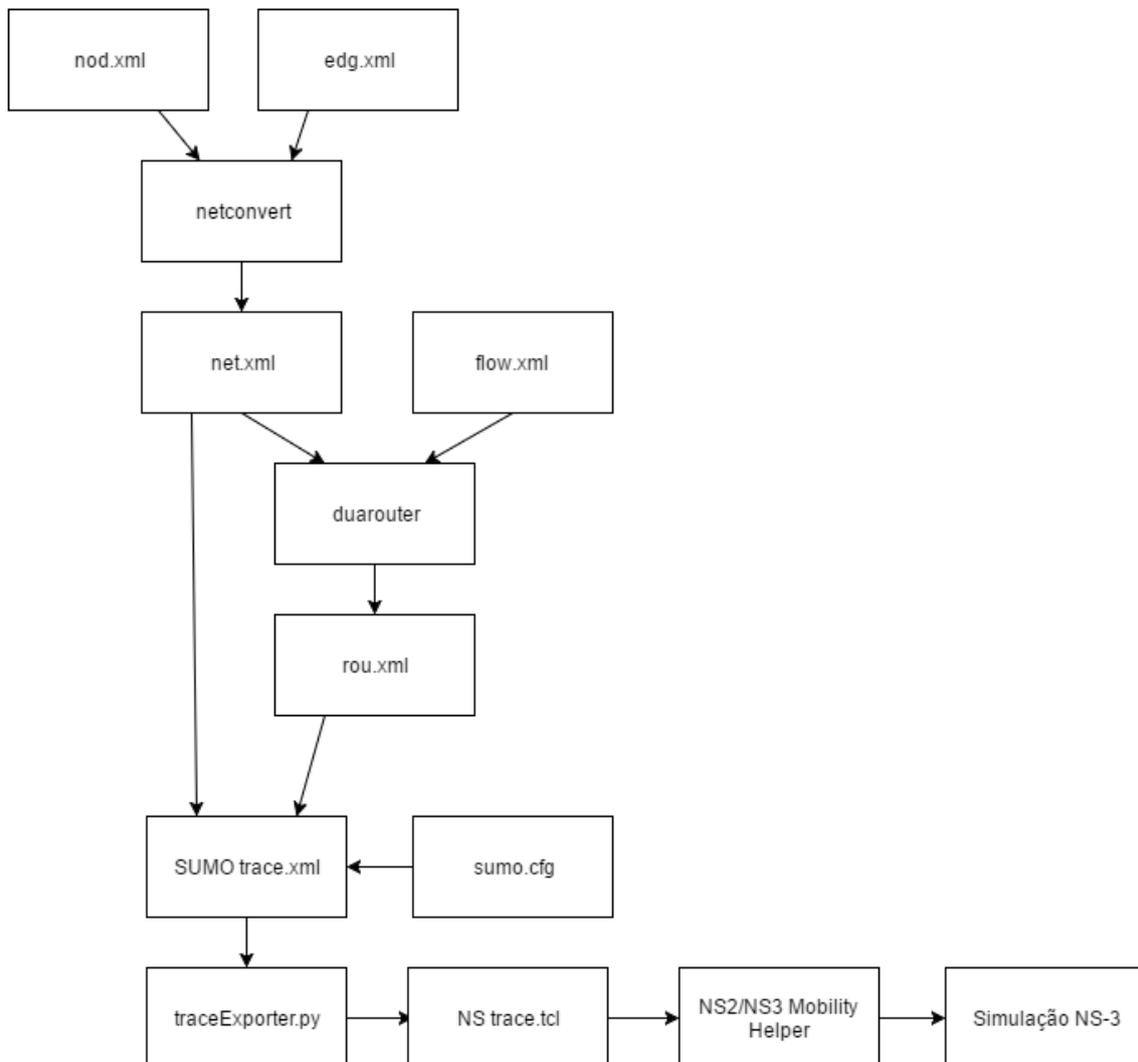


Figura 17.Diagrama da integração SUMO/NS-3.

5.3.7 Implementação do modelo no simulador

Esta é a etapa da realização do modelo dentro do simulador. Nesta fase é feita a tradução do modelo proposto para a linguagem de programação do simulador. Esta etapa inclui três passos principais de configuração:

- a) A topologia: contempla a criação e o posicionamento de todos os nós da rede: veículos, eNB, gateway da rede e servidor. Aqui também são configurados os modelos de mobilidade de cada nó. No caso dos veículos, a mobilidade destes segue de acordo com o *trace* de saída do SUMO. Uma ilustração da topologia da rede pode ser encontrada na Figura 17. A metodologia detalhada da criação do cenário no SUMO, bem como sua integração ao NS-3 é descrita no item 5.3.7.1 deste documento.
- b) A carga de trabalho: representam as aplicações e suas respectivas orientações do tráfego na rede (*downlink*, *uplink*), classes de tráfego e critérios de QoS, já discutidos anteriormente.
- c) Camada Física e MAC: traz a configuração dos atributos tais como largura de banda, potencia de transmissão, modelo de antenas, algoritmo de escalonamento, modelo de propagação e todos os demais aspectos essenciais da rede LTE. Os principais parâmetros da simulação podem ser encontrados na Tabela 9 deste documento.

5.3.7.1. Integração SUMO/NS-3

Para criar um cenário no SUMO, é preciso criar arquivos .xml específicos. Geralmente, três arquivos são utilizados como entrada no SUMO: nod.xml, edg.xml e flow.xml. Os arquivos nod.xml e edg.xml contém as informações quanto ao posicionamento dos pontos e a ligação entre eles, respectivamente. A partir deles um arquivo net.xml é gerado contendo a topologia da rede. O arquivo rou.xml é gerado a partir dos arquivos net.xml e flow.xml e contém a demanda de tráfego de veículos e suas rotas e, juntamente com o arquivo net.xml gerado anteriormente e um arquivo de configuração sumo.cfg, geram o *trace* de mobilidade dos nós veículos, que, no caso da integração do mesmo ao NS-3, será convertido em um arquivo do tipo .tcl, contendo toda a movimentação dos mesmos no cenário. No *trace* de mobilidade gerado, cada linha contém a movimentação para um dado veículo, em um determinado segundo da simulação e traz os seguintes atributos: tempo (s), ID do veículo,

posição_x, posição_y e velocidade (m/s). A Figura 17 traz o fluxograma da integração SUMO/NS-3.

A rede implementada traz um cenário no estilo *5x5 Manhattan grid*, totalizando 25 quarteirões, como mostra a Figura 18. Há seis vias verticais e seis horizontais, com espaçamento de 400 m entre as mesmas. Cada via possui três faixas de veículos.

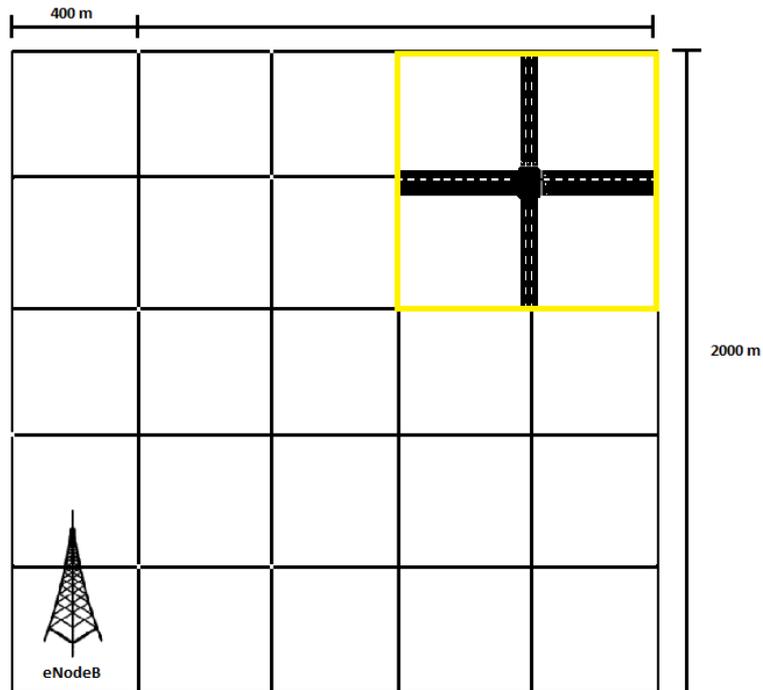


Figura 18. Layout da rede, *Manhattan Grid 5x5*.

Nesta etapa também são definidos e configurados os arquivos de saída do simulador, usualmente conhecido como *trace*. O *trace* contém todas as informações sobre os tráfegos da rede produzidos durante a simulação. Neste caso, utilizou-se os *traces* específicos gerados pela camada RLC do módulo LENA do NS-3, chamados DIRlcStats.txt, UIRlcStats.txt, referentes aos canais *downlink* e *uplink*, respectivamente. Estes arquivos são formados por 18 colunas, contendo, dentre outros atributos: início e fim (em segundos) de cada fluxo na rede, ID da célula, IMSI (ID do UE na rede), RNTI (ID do UE na célula), Total de bytes transmitidos, Total de bytes recebidos, *delay*, ID do canal lógico.

Tabela 9. Parâmetros da Simulação.

Parâmetro	Valor
Parâmetros do Sistema	
Largura de Banda DL/UL em MHz	10 (FDD mode)
Largura de Banda DL/UL em número de RBs	50
Protocolo de Rede	Ipv4
Número de eNodeB	1
Número de veículos (CAMs)	0, 20, 40, 60, 80, 100
Número de veículos (Video)	20
Velocidade média	8.33 m/s (30 km/h)
Mobilidade	Tracefile (SUMO)
Modelo de Propagação	<i>FriisSpectrumPropagationLossModel</i>
Área da simulação	2000 x 2000 m ²
Tempo de Simulação	60 s
Parâmetros da eNodeB	
Potência de Transmissão	46 dBm
Configuração de Antenas	Tx-1, Rx-1
Modelo da Antena	Omnidirecional
Escalonadores de recursos	RR, PF, TTA, PSS, CQA
Parâmetros dos dispositivos móveis	
Potência de Transmissão	23 dBm
Configuração de Antenas	Tx-1, Rx-1
Frequência de Transmissão de Beacons (CAM)	10 Hz
Taxa de Transmissão (CAM)	20 kbps
Tamanho de pacote (CAM)	256 Bytes
Taxa de transmissão de Video	440 kbps
Tamanho de pacote (Video)	1203 Bytes

Os simuladores foram instalados em ambiente Linux, executados via terminal. A versão dos simuladores utilizados foram NS-3.25 e SUMO 0.27.1. O código completo para criação da rede pode ser encontrado no ANEXO A desta dissertação.

5.3.8 Criação dos cenários

Normalmente, para um dado modelo, existe um grande número de experimentos possíveis. Nesta etapa, com o modelo do sistema já implementado no simulador, os cenários de testes são definidos de maneira a variar somente as variáveis de interesse da análise em questão. No caso desta dissertação, o objetivo é estudar o impacto de diferentes algoritmos de escalonamento no desempenho de redes veiculares LTE. Assim, são avaliados cinco diferentes algoritmos de escalonamento sob seis diferentes cargas de trabalho, geradas por 20, 40, 60, 80, 100 e 120 dispositivos móveis (veículos). Logo, são ao todo trinta cenários

diferentes. Em cada um deles, há 20 dispositivos utilizando exclusivamente aplicação de entretenimento (vídeo), no sentido *downlink* da rede, simulando a comunicação I2V da rede. Os demais dispositivos utilizam aplicação de segurança nas estradas (CAMs) no sentido *uplink* da rede, simulando a comunicação V2I.

Optou-se por fixar o número de dispositivos vídeo e aumentar gradativamente o número de dispositivos CAMs, já que o canal *uplink* costuma ser o gargalo em redes densas. Assim, deseja-se realizar: o estudo da efetividade das técnicas de escalonamento empregadas na eNB ao se tratar de um cenário de multiaplicações; o efeito das classes de QoS selecionadas para carregarem as aplicações veiculares; e ainda observar como se dá a interferência recíproca entre as aplicações veiculares mais específicas, que é o caso das CAMs, e as aplicações mais tradicionais, como o *streaming* de vídeo.

5.3.9 Definição da estratégia de execução

A fim de se obter resultados estatisticamente válidos, é necessário que se faça várias execuções para cada cenário. Um erro muito comum quando se trata de simulação é justamente a realização de conclusões com base em uma única execução do cenário que está sendo testado.

A geração de números aleatórios pelo simulador é, em particular, muito útil para testar programas. Sabe-se ainda que números verdadeiramente aleatórios são muito difíceis de se obter. Por isso são gerados, pelos algoritmos, números pseudo-aleatórios. Neste sentido, costuma-se adotar um número de sementes (*seed*). A semente é o número que corresponderá à primeira invocação da função geradora dos números pseudos aleatórios. Dada a semente, a sequência de números produzida pela função estará completamente determinada. No geral, se o programador não especificar a semente ao programa, o sistema adota a mesma semente para todas as execuções. Neste trabalho, foram adotadas 15 sementes para cada cenário, cada uma corresponde a uma execução.

5.3.10 Execução dos experimentos

De posse da estratégia de execução e dos cenários definidos, nesta etapa os experimentos são executados no simulador e os *traces* (ou *logs* de saída) são coletados e armazenados, a fim de serem processados na próxima etapa, que é a análise e interpretação dos resultados. Esta etapa costuma demandar um tempo considerável. Neste caso, em especial, o tempo de

execução de cada cenário varia, sobretudo, devido à quantidade de nós considerados e as métricas calculadas. Deve-se estar atento para que as saídas das diferentes execuções não sejam sobrescritas, o que pode acarretar na incorreta interpretação dos resultados.

5.3.11 Análise e interpretação dos resultados

O objetivo desta etapa é analisar e interpretar os resultados oriundos dos *traces* gerados a partir da estratégia de execução. Todas as conclusões tomadas devem ter embasamento estatístico. Para isto, são comumente utilizadas métricas tais como, média, desvio padrão, nível de confiança, limite superior e inferior, entre outros, que podem ser utilizadas para plotar os gráficos e apresentar os resultados. Algumas delas são descritas a seguir [CORREA, 2003].

Média: é o quociente da divisão da soma dos valores da variável pelo número deles. A média (aritmética) é, no geral, a mais comum de todas as medidas descritivas.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} (8)$$

Onde X_i é o valor observado e n é o número total de observações.

Desvio Padrão: é a raiz quadrada da variância, que por sua vez é uma medida que aponta o grau de dispersão (ou concentração) de probabilidade em torno da média. É importante ressaltar que o fato de conhecer a média de uma variável não é, muitas vezes, suficiente para expressar a ocorrência da mesma. Por isso se faz necessário o uso de uma medida de dispersão em torno da média.

$$Var(X) = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n} (9)$$

$$DP(X) = \sqrt{Var(X)} (10)$$

Nível de confiança: é uma maneira de expressar a precisão da estimação e estabelecer limites (intervalos) que, com certa probabilidade, incluam o verdadeiro valor daquela variável. Neste trabalho, adotou-se um nível de confiança de 95%. Mais detalhes e a formulação completa desta medida pode ser encontrado em [CORREA, 2003].

Limite superior e inferior: numa série de observações de uma variável, de maneira bem simples, o limite inferior deve ser igual ou ligeiramente inferior ao menor valor das observações e o limite superior deve ser igual ou ligeiramente superior ao maior valor das observações. Esses limites podem ser calculados a partir do nível de confiança, utilizando a fórmula:

$$\bar{X} \pm Z_{\alpha/2} * \frac{DP(X)}{\sqrt{n}}(11)$$

Onde \bar{X} é a média aritmética, $Z_{\alpha/2} * \frac{DP(X)}{\sqrt{n}}$ é a margem de erro, $Z_{\alpha/2}$ é o valor crítico, α é o nível de confiança, $DP(X)$ é o desvio padrão e n é o número total de observações.

A metodologia proposta é então finalizada ao observar que nesta última etapa todos os resultados são estatisticamente válidos e satisfatórios. Aqui também é importante a opinião de um especialista a fim de apontar se os dados se aproximam da realidade do sistema estudado. Caso os resultados não sejam estatisticamente válidos, a estratégia de execução pode ser modificada, refazendo-se, portanto, as etapas 10 e 11. Caso os resultados não sejam satisfatórios, recomenda-se reiniciar todo o ciclo da metodologia.

5.4 Análise dos Resultados

Nesta dissertação, conforme já comentado, foram testados 5 algoritmos sob 6 diferentes condições de carga, somando assim 30 cenários diferentes. Foram utilizadas 15 sementes diferentes para cada cenário, totalizando 450 execuções, resultando em 450 *traces* a serem tratados e, posteriormente, interpretados. Para isto, o tratamento estatístico, a aquisição dos resultados e a plotagem dos gráficos foi realizada utilizando a ferramenta MatLab®.

Conforme já comentado, as métricas de desempenho avaliadas neste estudo foram: justiça, vazão, eficiência espectral, atraso, razão de perda de pacotes e complexidade computacional. Para a avaliação dos escalonadores, foram utilizados os algoritmos já implementados no módulo do LENA do simulador NS-3. A seguir, serão analisados os resultados em função do número de veículos do cenário em questão.

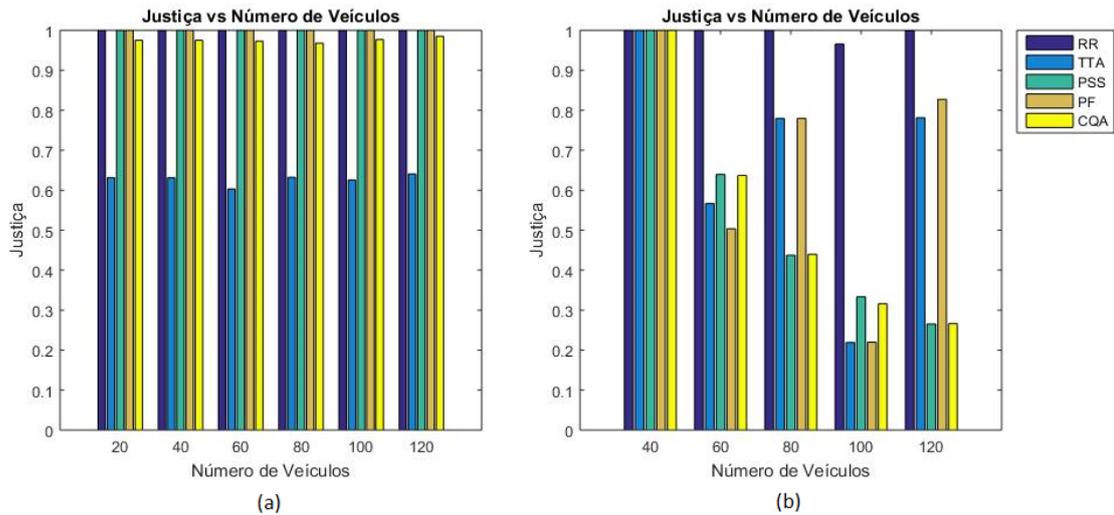


Figura 19. Justiça – tráfegos (a) *downlink* e (b) *uplink* da rede.

Já é sabido que o algoritmo de escalonamento de recursos é implementado na camada MAC da eNB e, através deste, é aplicada uma política de distribuição dos recursos disponíveis entre os UEs conectados a esta, a cada TTI (1 ms). Sabe-se ainda que o índice de justiça é uma métrica que aponta o quão justo é o algoritmo com todos os UEs conectados à eNB. Quanto mais próximo de ‘1’, mais justo é o escalonador. Portanto, para um índice de justiça igual a ‘1’, entende-se que todos os veículos experimentaram a mesma vazão ao longo do período de tempo considerado (tempo da simulação).

A Figura 19 trazos índices de Justiça obtidos no cenário da rede LTE, no sentido *dowlink* (vídeo) e *uplink* (CAMs) da rede, respectivamente. Primeiramente, é preciso fazer uma breve retomada de conceitos para que se possa realizar uma melhor análise dos resultados.

Dentre os cinco algoritmos estudados, o PSS e o CQA possuem métricas baseadas nos requisitos de QoS e nas condições de canais do UE (veículo); o TTA e o PF possuem métricas baseadas apenas nas condições de canal; enquanto o RR busca a justiça na distribuição, realizando a divisão simples dos RBs disponíveis na célula em relação ao número de veículos conectados.

Da Figura 19, observa-se que o algoritmo RR é, de fato, o algoritmo mais justo dentre os avaliados nos dois sentidos de tráfego na rede. Nota-se também que no *downlink*, conforme a Figura 19 (a), os algoritmos RR, PF e PSS alcançaram índice máximo de justiça, seguido pelo CQA, que também apresentou índice acima de 0,95. Apenas o PSS obteve índices abaixo de 0,7. É importante lembrar que apenas 20 veículos utilizam tráfego de vídeo na rede em todos os cenários simulados. Os demais veículos utilizam a infraestrutura da rede LTE para enviar as mensagens cooperativas (CAMs) à rede veicular. Assim, observa-se que

no caso do *uplink*, o número de veículos conectados à rede cresce a cada cenário, e, portanto, cresce também o número de veículos solicitando recursos de rádio.

No *uplink*, como mostra a Figura 19 (b), observa-se que o RR continua mantendo alto índice de justiça, seguido pelo PF, TTA, PSS, CQA. O PF alcançou um bom nível de justiça ao usar como métrica a razão entre a vazão atingível naquele instante e a última média da vazão do veículo, enquanto o TTA utiliza como métrica a razão entre a vazão atingível em um RB específico e a vazão atingível na largura de banda inteira. Os algoritmos CQA e PSS alcançaram índices bastante semelhantes. Ambos possuem estágios de escalonamento no domínio do tempo e na frequência. No domínio do tempo, os UEs são agrupados por prioridade de transmissão e no domínio da frequência, utilizam métricas baseadas no estado do canal.

No *uplink*, todos os veículos possuem a mesma prioridade, portanto a métrica decisiva é a condição de canal do veículo. Sabendo que os recursos de rádio são limitados e que as condições de canal entre os veículos são bem variadas, observou-se que, muitas vezes, por experimentarem uma condição péssima de canal, alguns veículos foram escalonados poucas vezes ou mesmo em nenhum momento da simulação, o que pode ser observado na queda dos índices de todos os algoritmos baseados em canal neste cenário.

A partir dos resultados obtidos, reafirma-se que à medida que o número de veículos aumenta, maior é a disputa por banda. Outra importante observação é que no caso das CAMs, a vazão esperada por veículo é de 20 kbps. Assim, mesmo que em condições de canal muito ruins, utilizando uma taxa de modulação e codificação de 2 bits/símbolo (mínima taxa admitida pelo LTE), é possível atingir até 336 kbps/RB. No cenário implementado, há 50 RBs disponíveis a cada TTI. Isso justifica o porquê do RR obter bons índices mesmo em cenários mais densos, com 120 até veículos.

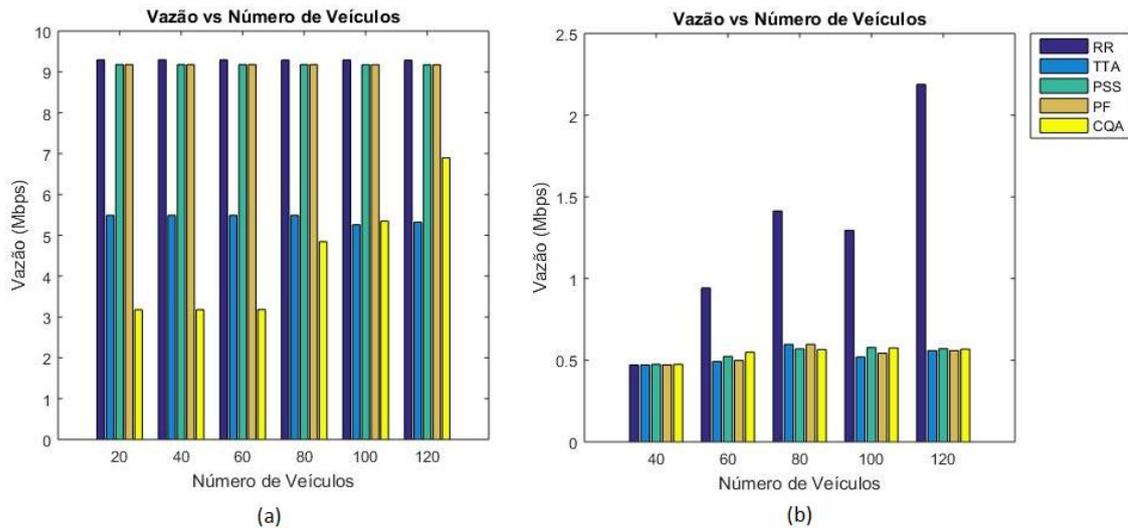


Figura 20. Vazão – tráfegos (a) *downlink* e (b) *uplink* da rede.

Quanto ao tráfego de vídeo, aqui vale lembrar que para a aplicação de vídeo, utilizou-se uma taxa de bits de 440 kbps. Assim, a vazão atingida por 20 veículos deve ser em torno de 9 Mbps, o que é alcançado pelos algoritmos RR, PF e PSS, conforme mostra a Figura 20 (a), que traz a vazão global da célula no sentido *downlink* da rede. Já o TTA e o CQA, atingem uma média de no máximo 300 kbps por veículo. No caso do *uplink*, no cenário com 40 veículos, por exemplo, há 20 veículos enviando CAMs a uma taxa de 20 kbps, o que leva a célula a uma vazão agregada de 0,4 Mbps, atingida por todos os algoritmos. No entanto, a medida que a célula fica mais densa, percebe-se que apenas o RR consegue servir a todos os veículos com a vazão pretendida. Os demais algoritmos não conseguem suprir a demanda, apesar da taxa de bits alvo ser considerada baixa.

Da Figura 20 (b) é possível inferir que apenas 30 veículos, em média, têm sido servidos pelos algoritmos PF, PSS, TTA e CQA. Considerando novamente uma condição péssima de canal e que, ainda sob estas condições, seria possível atingir uma taxa de 336 kbps com apenas 1 RB, este resultado ruim na vazão no sentido *uplink* também é reflexo da justiça, já comentada, e da baixa granularidade do escalonamento no domínio da frequência, onde nestes casos não se considera a demanda de taxa de bits da aplicação e portanto é escalonado um número grande de RBs para apenas um veículo, havendo assim o desperdício de recursos, limitando a vazão global da célula e deixando de atender um número maior de veículos por TTI.

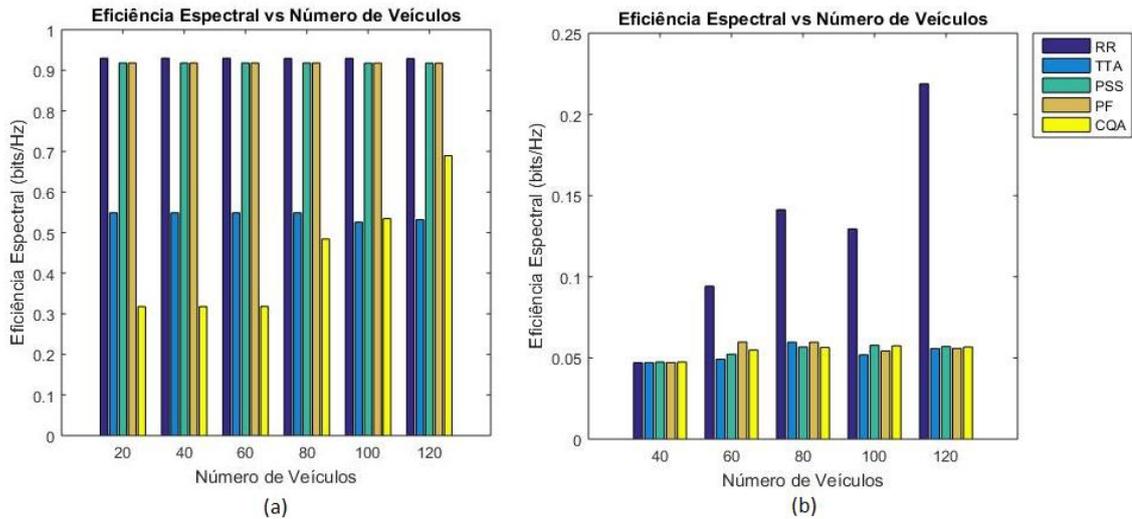


Figura 21. Eficiência Espectral – tráfegos (a) *downlink* e (b) *uplink* da rede.

A Figura 21 apresenta a eficiência espectral da célula, expressa em bits/Hz. Essa métrica é importante por apontar como os recursos de rádio estão sendo aproveitados. Em outras palavras, a eficiência espectral é uma medida da eficiência com que um dado sistema de comunicação usa a largura de banda de um canal.

Neste estudo de caso, tanto os canais *downlink* quanto *uplink* possuem uma largura de banda de 10 MHz. O LTE admite uma modulação e codificação de 2, 4 ou 6 bits/símbolo, dependendo das condições do canal do usuário e da BLER (*Block Error Rate*) admitida para o mesmo. Sabendo que um RB possui largura de 180 kHz e utilizando todos os 50 RBs disponíveis em 10 MHz, a cada TTI, seria possível alcançar uma eficiência de até 1,86 bits/Hz, mesmo em condições ruins de canal.

A partir da Figura 21, é possível observar que, no *downlink*, RR, PF e PSS utilizam a banda de forma mais eficiente do que os algoritmos CQA e TTA. Já no *uplink*, o RR continua tendo uma melhor eficiência, mas neste caso, os demais algoritmos possuem eficiência bastante semelhante. A justiça e a granularidade do escalonamento no domínio da frequência novamente ajudam a explicar esse resultado.

As Figuras 22 e 23 trazem os resultados quanto ao atraso (*delay*) e a Razão de Perda de Pacotes (PLR, *Packet Loss Ratio*). No caso do tráfego de vídeo, conforme já comentado anteriormente, este foi categorizado na classe 3, como *streaming* de vídeo, apresentando prioridade 5, atraso máximo de 300 ms, taxa de perda de pacotes de 10⁻⁶ e garantia de taxa de bits. Das Figuras 22 (a) e 23 (a), é possível perceber que os requisitos de atraso foram atendidos por todos os algoritmos testados. No entanto, a taxa máxima de perda de pacotes não foi atendida por nenhum destes.

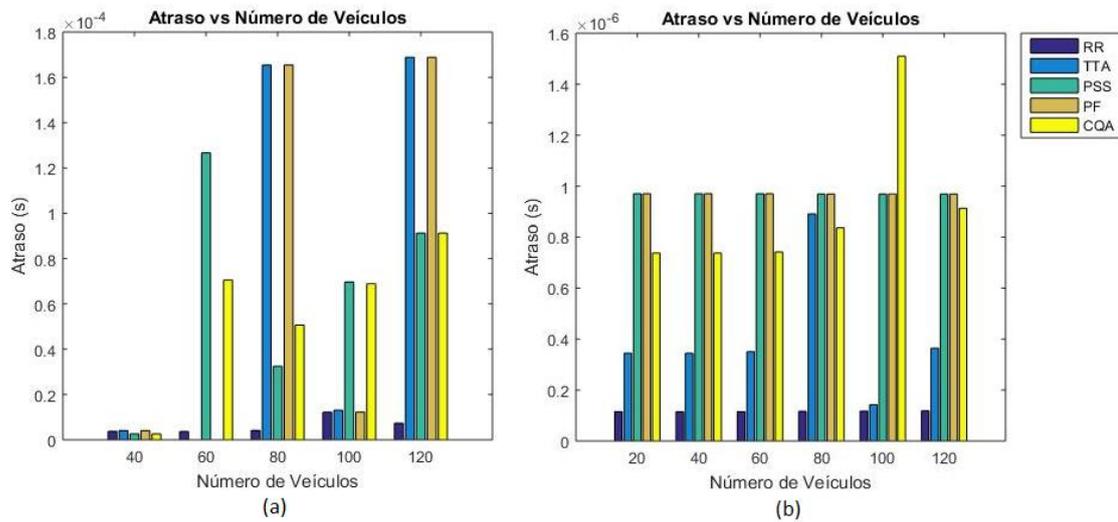


Figura 22. Atraso – tráfegos (a) *downlink* e (b) *uplink* da rede.

Quanto às mensagens CAMs, apesar de não haver critérios quanto à garantia de taxa de bits, taxa de perda de pacotes e prioridade, o atraso máximo tolerável é de 100 ms. As CAMs foram então alocadas na classe 5, de sinalização. Da Figuras 22 (b), vê-se que o atraso obtido foi abaixo de 100 ms em todos os casos. Da figura 23 (b), observa-se uma baixa taxa de perda de pacotes. Nota-se, que o atraso aumenta conforme cresce a densidade de veículos na rede, mas para a demanda de até 100 veículos enviando mensagens de cooperação para a eNB, simultaneamente, o LTE ainda é capaz de atender os critérios exigidos pelas aplicações veiculares.

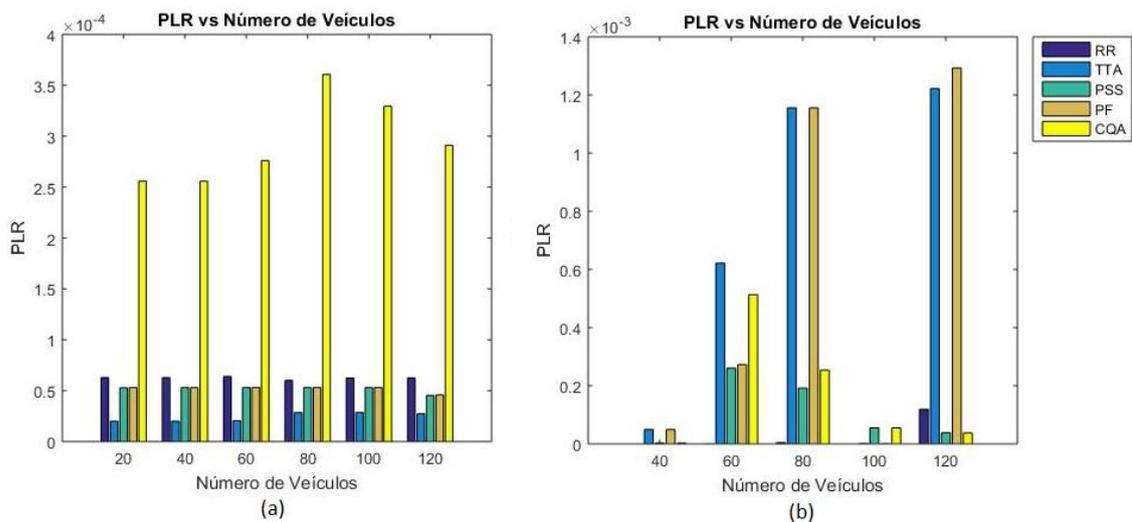


Figura 23. Razão de Perda de Pacotes – tráfegos (a) *downlink* e (b) *uplink* da rede.

Os resumos dos resultados obtidos por meio das simulações podem ser encontrados nas Tabelas 10 e 11, a seguir.

Tabela 10. Resumo dos Resultados - *Uplink*.

		Delay (s)				
Número de Veículos	Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
	40	Média	3,73E-06	4,05E-06	2,65E-06	4,05E-06
	Desvio Padrão	1,13E-07	6,12E-07	2,13E-07	6,12E-07	2,13E-07
60	Média	3,68E-06	8,00E-09	1,27E-04	8,00E-09	7,05E-05
	Desvio Padrão	4,15E-08	6,18E-09	1,22E-04	6,18E-09	7,22E-05
80	Média	4,13E-06	1,65E-04	3,25E-05	1,65E-04	5,06E-05
	Desvio Padrão	3,34E-08	4,63E-05	2,18E-05	4,63E-05	4,63E-05
100	Média	1,22E-05	1,31E-05	6,97E-05	1,22E-05	6,89E-05
	Desvio Padrão	5,16E-09	2,75E-06	5,60E-05	5,21E-09	4,18E-05
120	Média	7,38E-06	1,69E-04	9,13E-05	1,69E-04	9,13E-05
	Desvio Padrão	3,17E-07	7,21E-05	8,97E-05	7,21E-05	8,97E-05
		Vazão Global (Mbps)				
Número de Veículos	Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
	40	Média	0,4712	0,4713	0,4750	0,4713
	Desvio Padrão	0,0001	0,0017	0,0008	0,0017	0,0008
60	Média	0,9424	0,2921	0,5227	0,2980	0,5485
	Desvio Padrão	0,0001	0,0742	0,0705	0,0616	0,0142
80	Média	1,4130	0,2972	0,5691	0,2972	0,5646
	Desvio Padrão	0,0003	0,0131	0,0257	0,0131	0,0213
100	Média	1,2951	0,2195	0,5778	0,2424	0,5751
	Desvio Padrão	0,0000	0,0341	0,0242	0,0379	0,0226
120	Média	2,1883	0,2581	0,5702	0,2584	0,5673
	Desvio Padrão	0,0823	0,0104	0,0537	0,0103	0,0533
		Eficiência Espectral				
Número de Veículos	Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
	40	Média	0,047	0,047	0,048	0,047
	Desvio Padrão	0,000	0,047	0,000	0,000	0,000
60	Média	0,094	0,029	0,052	0,030	0,055
	Desvio Padrão	0,000	0,003	0,007	0,006	0,001
80	Média	0,141	0,030	0,057	0,030	0,056
	Desvio Padrão	0,000	0,003	0,002	0,001	0,002
100	Média	0,130	0,022	0,058	0,242	0,058
	Desvio Padrão	0,000	0,002	0,002	0,038	0,002
120	Média	0,219	0,026	0,057	0,026	0,057
	Desvio Padrão	0,008	0,003	0,005	0,001	0,005
		PLR (%)				
Número de Veículos	Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
	40	Média	0,0000	0,0493	0,0031	0,0493
	Desvio Padrão	0,0000	0,0026	0,0005	0,0026	0,0005
60	Média	0,0007	0,6213	0,2608	0,2732	0,5133
	Desvio Padrão	0,0002	0,0763	0,0189	0,0820	0,0411
80	Média	0,0048	1,1558	0,1918	1,1558	0,2534
	Desvio Padrão	0,0005	0,1476	0,0129	0,0148	0,0158
100	Média	0,0000	0,0018	0,0551	0,0010	0,0551
	Desvio Padrão	0,0000	0,0002	0,0034	0,0002	0,0037
120	Média	0,1187	1,2220	0,0381	1,2929	0,0380
	Desvio Padrão	0,0277	0,2360	0,0043	0,2490	0,0043
		Justiça				
Número de Veículos	Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
	40	Média	1,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	Média	1,00	0,57	0,64	0,50	0,64
	Desvio Padrão	0,00	0,04	0,01	0,02	0,01
80	Média	1,00	0,78	0,44	0,78	0,44
	Desvio Padrão	0,00	0,03	0,02	0,03	0,02
100	Média	0,97	0,22	0,33	0,22	0,32
	Desvio Padrão	0,00	0,03	0,02	0,03	0,04
120	Média	1,00	0,78	0,27	0,83	0,27
	Desvio Padrão	0,00	0,03	0,02	0,03	0,02

Tabela 11. Resumo dos Resultados - *Downlink*.

		Delay (s)					
		Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
Número de Veículos	20	Média	1,15E-07	3,44E-07	9,70E-07	9,70E-07	7,38E-07
		Desvio Padrão	1,75E-09	3,70E-08	9,14E-10	1,16E-09	7,56E-08
	40	Média	1,15E-07	3,44E-07	9,70E-07	9,70E-07	7,38E-07
		Desvio Padrão	1,75E-09	3,70E-08	9,14E-10	1,16E-09	7,56E-08
	60	Média	1,15E-07	3,50E-07	9,70E-07	9,70E-07	7,42E-07
		Desvio Padrão	1,44E-09	2,08E-08	7,26E-10	1,05E-09	7,15E-08
	80	Média	1,16E-07	8,91E-07	9,69E-07	9,69E-07	8,37E-07
		Desvio Padrão	1,93E-09	1,84E-06	4,17E-10	5,85E-10	7,47E-08
	100	Média	1,17E-07	1,42E-07	9,69E-07	9,69E-07	1,51E-06
		Desvio Padrão	1,75E-09	2,19E-07	4,74E-10	7,67E-10	2,06E-06
	120	Média	1,18E-07	3,64E-07	9,69E-07	9,69E-07	9,13E-07
		Desvio Padrão	2,31E-09	3,82E-08	4,03E-10	4,21E-10	8,68E-08
		Vazão Global (Mbps)					
		Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
Número de Veículos	20	Média	9,298	5,489	9,180	9,179	3,179
		Desvio Padrão	0,002	0,000	0,001	0,000	0,120
	40	Média	9,298	5,489	9,180	9,179	3,179
		Desvio Padrão	0,002	0,000	0,001	0,000	0,120
	60	Média	9,297	5,489	9,179	9,179	3,181
		Desvio Padrão	0,002	0,000	0,001	0,001	0,120
	80	Média	9,294	5,489	9,179	9,179	4,843
		Desvio Padrão	0,002	0,000	0,001	0,001	0,207
	100	Média	9,292	5,260	9,178	9,178	5,345
		Desvio Padrão	0,002	0,723	0,001	0,001	0,208
	120	Média	9,289	5,322	9,177	9,177	6,895
		Desvio Padrão	0,003	0,215	0,001	0,001	0,225
		Eficiência Espectral					
		Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
Número de Veículos	20	Média	0,930	0,549	0,918	0,918	0,318
		Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,000	0,120
	40	Média	0,930	0,549	0,918	0,918	0,318
		Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,000	0,120
	60	Média	0,930	0,549	0,918	0,918	0,318
		Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,000	0,120
	80	Média	0,929	0,549	0,918	0,918	0,484
		Desvio Padrão	0,000	0,000	0,000	0,000	0,207
	100	Média	0,929	0,526	0,918	0,918	0,535
		Desvio Padrão	0,000	0,079	0,000	0,000	0,208
	120	Média	0,929	0,532	0,918	0,918	0,690
		Desvio Padrão	0,000	0,022	0,000	0,000	0,225
		PLR (%)					
		Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
Número de Veículos	20	Média	0,006	0,002	0,005	0,005	0,026
		Desvio Padrão	0,001	0,000	0,000	0,000	0,010
	40	Média	0,006	0,002	0,005	0,005	0,026
		Desvio Padrão	0,001	0,000	0,000	0,000	0,010
	60	Média	0,006	0,002	0,005	0,005	0,028
		Desvio Padrão	0,001	0,000	0,000	0,000	0,008
	80	Média	0,006	0,003	0,005	0,005	0,036
		Desvio Padrão	0,000	0,001	0,000	0,000	0,013
	100	Média	0,006	0,003	0,005	0,005	0,033
		Desvio Padrão	0,000	0,001	0,000	0,000	0,014
	120	Média	0,006	0,003	0,005	0,005	0,029
		Desvio Padrão	0,000	0,001	0,001	0,001	0,023
		Justiça					
		Algoritmos	RR	TTA	PSS	PF	CQA
Número de Veículos	20	Média	1,00	0,63	1,00	1,00	0,98
		Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
	40	Média	1,00	0,63	1,00	1,00	0,98
		Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
	60	Média	1,00	0,60	1,00	1,00	0,97
		Desvio Padrão	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02
	80	Média	1,00	0,63	1,00	1,00	0,97
		Desvio Padrão	0,00	0,03	0,00	0,00	0,02
	100	Média	1,00	0,63	1,00	1,00	0,98
		Desvio Padrão	0,00	0,03	0,00	0,00	0,02
	120	Média	1,00	0,64	1,00	1,00	0,99
		Desvio Padrão	0,00	0,05	0,00	0,00	0,02

Quanto à complexidade dos algoritmos, aqui é realizada uma análise qualitativa do custo computacional dos mesmos. [ZHOU; BALDO; MIOZZO, 2013] afirma que os algoritmos que exploram a capacidade do canal alcançam melhor eficiência espectral, porém essa granularidade mais fina acarreta num custo computacional maior. Sabe-se ainda que, o custo computacional de um algoritmo se dá, em geral, em torno do tempo de processamento (número de passos) e da memória exigida (HAN; ARMOUR, 2012).

Assim, algoritmos que realizam o escalonamento em dois estágios (no domínio do tempo e da frequência), por exemplo, exigem uma complexidade maior de implementação. Como já visto, o escalonamento muitas vezes se dá a partir de métricas identificadas através de medidas feitas na eNB e/ou reportadas pelos UEs, como o CQI e o BSR, além de requisitos de QoS. Portanto, quanto maior a demanda de relatórios e, por sua vez, o cálculo de métricas a fim de se obter a alocação de recursos, maior será o consumo de memória e o tempo de processamento.

Ressalta-se ainda que, neste contexto, esse custo computacional aumenta proporcionalmente ao número de veículos conectados, lembrando ainda que se trata de um ambiente sem fio, passível de alta mobilidade. Além disso, estes relatórios e métricas também são atualizados a cada TTI.

Assim, a partir destes critérios, conclui-se que o algoritmo RR possui baixa complexidade de implementação, pois é independente do canal e não utiliza nenhuma outra métrica específica, além da simples divisão da largura de banda disponível pelo número de usuários conectados.

O PF é um algoritmo baseado em canal e utiliza como métrica a razão entre a vazão atingível para toda a largura de banda e a média da vazão já experimentada pelo veículo, apresentando assim uma complexidade computacional maior que o RR. É válido frisar também que esta métrica é atualizada uma vez, para cada usuário conectado a cada TTI.

O TTA, por sua vez, possui maior complexidade computacional quando comparado ao PF pois este utiliza como métrica a razão entre as medidas da vazão atingível em um RB específico (sub-band) e a vazão atingível para toda a largura de banda (*wideband*). Assim, o TTA, calcula essa métrica para cada usuário em relação a cada RB disponível na célula, a cada TTI.

O algoritmo PSS possui complexidade maior que o TTA pois, além de ser sensível ao canal, também é baseado em requisitos de QoS. O PSS no domínio do tempo usa como métrica uma Taxa de Bits Alvo (TBR) e, a partir dela, classifica os usuários da rede em dois grupos, aplicando métricas diferentes a cada grupo. Ao passar os usuários pré-selecionados

para o domínio da frequência, o PSS calcula uma nova métrica, agora baseada nas condições do canal e, enfim, os recursos são alocados.

Semelhante ao PSS, o CQA também é sensível ao canal e baseado em critérios de QoS. No TD, sua métrica é baseada no atraso do primeiro pacote de cada fluxo (HOL). Já no FD, o CQA calcula uma nova métrica, que, por sua vez, é fruto de outras duas métricas multiplicadas pelo atraso HOL: uma baseada na GBR (taxa de bits garantida) e outra baseada nas condições de canal do usuário, o que acarreta num custo computacional ainda maior quando comparado ao PSS. Finalmente, em ordem crescente de complexidade computacional aparecem RR, PF, TTA, PSS e CQA.

A partir da análise dos algoritmos e dos resultados das simulações, ratifica-se que a escolha do algoritmo de escalonamento de recursos é crucial para o desempenho geral da rede e para o bom atendimento dos requisitos das diferentes aplicações.

Observou-se que num ambiente veicular, os algoritmos mais apropriados são aqueles que garantem um alto nível de justiça. No caso específico das CAMs, que possuem uma taxa de bits considerada baixa, em torno de 20 kbps, quando comparada às taxas de bits mais tradicionais das redes H2H, tais como vídeos e jogos *online*, é de suma importância a garantia de recursos e não, necessariamente, a quantidade de recursos, como já comentado anteriormente.

Assim, nota-se que algoritmos mais sofisticados do ponto de vista do aproveitamento da diversidade multiusuário e de requisitos de QoS não representam infalivelmente a melhor solução no caso das mensagens interveiculares, como se poderia supor, apesar dos veículos estarem, em geral, se movimentando em alta velocidade e, portanto, podendo estar muito longe ou muito próximo da eNB em um curto intervalo de tempo, tendo uma alta variação das condições de canal.

Como já visto e discutido, a taxa de bits das CAMs não necessita de muitos recursos para ser atingida, mesmo em condições ruins de canal. Também observou-se que as mensagens CAMs no *uplink*, mesmo nos cenários mais densos, com até 120 veículos conectados à eNB, não causaram perturbação no desempenho geral dos 20 usuários de fundo que utilizavam aplicação de entretenimento (vídeo).

Dentro deste contexto veicular, o RR foi o algoritmo que melhor respondeu as necessidades da rede e, além disso, é o algoritmo que possui menor complexidade dentre os avaliados. Isto se deu porque o RR, em sua métrica, divide os recursos disponíveis dentre todos os veículos conectados, independente de qualquer outra condição. Assim, os veículos

se revezavam na utilização dos 50 RBs disponíveis a cada TTI, garantindo um alto nível de serviço a todos os veículos conectados durante todo o tempo da simulação.

5.5 Considerações Finais

Neste capítulo apresentou-se detalhadamente a metodologia proposta para estudar o impacto da estratégia de escalonamento de recursos no desempenho de redes veiculares. Esta metodologia, no entanto, pode ser facilmente expandida para outros tipos de análises no que se refere à avaliação de desempenho de redes móveis sem fio.

Como é possível perceber, são muitos os desafios a respeito da capacidade das redes LTE em suportar aplicações veiculares. Cabe assim, uma análise crítica e profunda a fim de que esta solução seja implementada de forma confiável e atrativa, tanto do ponto de vista do operador da rede como também do usuário da mesma, principalmente nos cenários em que há um número grande de veículos conectados na célula.

No capítulo anterior, foi visto que dentre os inúmeros desafios apontados, não há muitos estudos detalhados a respeito das políticas de escalonamento da eNB e o impacto destas no desempenho da rede VANET-LTE. Conforme comentado ao longo deste capítulo, os resultados obtidos reforçam a necessidade da criação de algoritmos mais específicos no que se refere ao atendimento dos critérios das mensagens interveiculares e acentua que a simples utilização de algoritmos tradicionalmente utilizados na comunicação H2H não representa a melhor solução para a rede, principalmente no que se refere ao canal *uplink*, devido a alta taxa de geração de pacotes, sobretudo ao tratar-se de redes mais densas.

É importante frisar que esta avaliação de desempenho não apenas analisou o impacto das estratégias de escalonamento de recursos do ponto de vista da qualidade de serviço oferecida aos usuários e veículos da rede LTE, mas também abordou o ponto de vista do operador da rede, que precisa otimizar seus recursos de rádio e *hardware*. Ressalta-se ainda que, a abordagem aqui realizada é importante para tomar decisões no projeto de escalonadores de recursos no LTE, onde a escolha de cada critério pode impactar no desempenho global da rede, por isso deve estar em conformidade com os objetivos da operadora, existindo assim um acordo entre QoS e complexidade computacional, que precisa ser bem avaliado, de acordo com as necessidades do sistema e dos critérios que se pretende alcançar.

6. CONCLUSÃO

Os sistemas de transporte inteligentes reúnem uma gama de tecnologias de transferência de informação aplicadas ao transporte e à infraestrutura nas estradas. Isso inclui aplicações envolvendo sistema de gestão de tráfego, alertas de riscos de colisão, bem como serviço de cooperação, com troca de mensagens entre um veículo e a infraestrutura de telecomunicação e de um veículo para outro. O principal objetivo é melhorar, sobretudo, a segurança e a eficiência do tráfego nas vias, diminuindo o número de acidentes e o tempo de viagem, além de proporcionar um nível maior de conforto aos usuários do transporte.

Nos últimos anos, as redes *ad-hoc* veiculares têm emergido como uma importante área de pesquisa. Sua natureza *ad-hoc* surge do conceito de estabelecer uma rede de comunicação entre veículos, com objetivos específicos. Junto com os inúmeros benefícios, surgem também muitos desafios, entre os quais se encontram: o provisionamento de qualidade de serviço, alta conectividade, confiabilidade, uso eficiente da largura de banda e segurança dos dados.

Da literatura, observa-se um amplo consenso quanto ao uso das redes LTE como solução de acesso para aplicações de redes veiculares, baseado, principalmente, na alta capacidade da rede, vasta cobertura, baixa latência e suporte aos requisitos de QoS. Tais características ajudam a enfrentar problemas comuns em redes veiculares, como escalabilidade, baixa capacidade e conectividade intermitente.

Nesta dissertação discutiu-se o efeito de diferentes algoritmos de escalonamento de recursos no suporte de aplicações de mensagens de cooperação entre veículos e a infraestrutura de telecomunicação (V2I/I2V). Apresentou-se também um amplo levantamento dos principais conceitos e desafios por trás dessas redes e do sistema LTE, compreendendo questões relevantes relacionadas à qualidade de serviço, planejamento de novos algoritmos, além de levar em consideração o *trade-off* entre bons níveis de serviço e custo computacional.

Este estudo teve por objetivo promover uma discussão quanto à efetividade do uso das redes LTE como tecnologia de acesso de redes veiculares, sob a ótica do escalonamento de recursos de rádio. Esse fator é crucial para o desempenho da rede, no entanto, o 3GPP, órgão padronizador do LTE, não especifica o algoritmo a ser utilizado, deixando a cargo da indústria e dos operadores da rede tal responsabilidade. Esse ambiente aberto proporciona uma ampla diversidade de algoritmos, sendo que a maioria deles foi desenvolvida para atender a aplicações do tipo H2H.

Neste trabalho, abordou-se a eficiência da aplicação dessas técnicas tradicionais em um contexto veicular. Para realizar esta análise, uma metodologia de avaliação de desempenho foi elaborada e proposta, juntamente com a execução de um conjunto de simulações, utilizando-se as ferramentas NS-3 e SUMO, para a modelagem da rede LTE e do tráfego de veículos, respectivamente.

Os resultados obtidos a partir das simulações reforçam a necessidade da criação de algoritmos mais específicos no que se refere ao atendimento dos critérios de QoS deste tipo de aplicação. Isto se deve porque o desempenho do algoritmo de escalonamento depende do tipo de padrão de geração de dados. No caso das redes veiculares, cada veículo transmite pequenos pacotes de dados a cada 100 ms, por exemplo.

Os resultados também apontam que a simples utilização de algoritmos tradicionalmente utilizados na comunicação H2H pode não representar a melhor solução para a rede, principalmente no que diz respeito ao canal uplink. Devido à alta taxa de geração de dados aliada à pequenos pacotes de dados, observou-se que no desenvolvimento do algoritmo é mais importante a garantia de serviço a todos os veículos conectados do que a maximização da vazão global da rede, já que a taxa de bits das CAMs não necessita de muitos recursos de rádio para ser alcançada.

A discussão proposta também trouxe a análise qualitativa do custo computacional de cada algoritmo, considerando, além do usuário final, o ponto de vista do operador da rede, que precisa otimizar seus recursos de rádio e hardware.

Existem ainda diversas outras questões a serem analisadas para garantir que o uso do LTE como tecnologia de acesso para redes móveis veiculares aconteça de maneira econômica e eficiente. O estudo de caso realizado apresentou resultados preliminares, nos quais, para os cenários propostos, o uso de algoritmos mais sofisticados no que se refere ao aproveitamento da diversidade multiusuário e de requisitos de QoS não representam obrigatoriamente as melhores soluções, como se poderia presumir. Neste sentido, é de suma importância considerar o padrão de geração das mensagens na criação de novos algoritmos de escalonamento específicos para aplicações veiculares.

6.1 Contribuições da Dissertação

As contribuições principais desta Dissertação são descritas a seguir:

- A proposta de uma metodologia para o estudo do impacto dos algoritmos de escalonamento de recursos de rádio no desempenho de redes veiculares utilizando o

LTE como tecnologia de acesso, podendo ser generalizada para diversos outros problemas de redes de comunicação que possam ser modelados e resolvidos por simulação.

- A flexibilidade da metodologia proposta que a torna capaz de incorporar novos elementos e variáveis aleatórias, de acordo com o objetivo ou estudo de interesse, permitindo a geração de inúmeros cenários de simulação.
- A realização de um amplo estudo da tecnologia LTE e redes veiculares, compreendendo as principais características, aspectos envolvidos e a caracterização do modelo de estudo no simulador NS-3.
- Abordagem profunda quanto ao escalonamento de recursos rádio e o seu impacto no desempenho de redes veiculares e o atendimento dos critérios de QoS esperados para aplicações específicas de cenários VANET. Os critérios utilizados na avaliação foram: vazão, atraso, perda de pacotes, eficiência espectral, justiça e análise qualitativa da complexidade computacional. No levantamento realizado, não foi encontrada abordagem similar na literatura consultada.
- Por intermédio das métricas de avaliação utilizadas, foi possível levantar vantagens e desvantagens de cada estratégia de escalonamento, bem como apontar critérios importantes no desenvolvimento de novos algoritmos.
- A realização de estudo pioneiro quanto à integração das ferramentas SUMO e NS-3 para a modelagem de redes veiculares no âmbito do LPRAD, incluindo aspectos de parametrização, modelagem e simulação de redes veiculares integradas às redes LTE.
- A divulgação de trabalho apresentando em conferência nacional, publicado no segundo semestre de 2015:
 - CARDOSO, E. H. S., da SILVA, C. P. A., MONTEIRO, F. P., FRANCÊS, C. R. L., Análise de Desempenho de Algoritmos de Escalonamento de Recursos em Redes LTE Heterogêneas. Trabalho completo aceito para publicação no XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Porto de Galinhas, Pernambuco.

6.2 Trabalhos Futuros

Como possíveis desdobramentos deste trabalho, incluem-se:

- A realização de novos estudos, com cenários heterogêneos, integrando soluções como os padrões WAVE, WIMAX, Bluetooth e LTE, fazendo uso de duas ou mais

interfaces de rede, possibilitando ao usuário oportunidade inteligente de acesso, conforme a disponibilidade e a carga da rede.

- Definição de novos cenários de interesse, particularizando-se para cenários críticos de maior mobilidade e com aplicações entre veículos, além do estudo do impacto de abordagens de escalonamento dinâmico, semipersistente e persistente.
- Utilização de técnicas de otimização e modelos de inteligência computacional para o desenvolvimento de soluções de escalonamento de recursos em cenários de múltiplas aplicações, bem como estratégias específicas para redes veiculares.
- Estudo da técnica de comunicação D2D da rede LTE e proposição de estratégias de alocação eficiente de recursos nestas redes. O mecanismo D2D pode melhorar os níveis de atraso decorrentes da arquitetura tradicionalmente centralizada do LTE, superando as limitações para o estabelecimento da comunicação V2V destas redes.

Além disso, em trabalhos futuros, pretende-se aprofundar os estudos em direção às redes móveis 5G. A quinta geração de redes móveis está prevista para suportar a “avalanche” de tráfego de dados esperada para os próximos anos (H2H, M2M, IoT, etc), com soluções que possibilitem também um menor consumo de energia.

Para este fim, são essenciais a proposição e o melhoramento de tecnologias facilitadoras, entre as quais merecem destaque: HetNets, *massive* MIMO, *beamforming*, técnicas de ondas milimétricas, múltiplas fontes de energia (*Energy Harvesting*), virtualização de redes sem fio, densificação extrema de nós (UDNs) e comunicação Full-Duplex (FDCs).

6.3 Dificuldades Encontradas

O desenvolvimento deste trabalho foi desafiador para a autora desta dissertação, já que a sua realização completa exigiu o conhecimento de diversas áreas e tarefas relacionadas ao perfil profissionalde: engenharia da computação, no que tange à programação e a complexidade dos simuladores; engenharia elétrica/telecomunicações, já que se trata de um problema de telecomunicação, no qual é preciso ter um olhar mais sensível e especializado, a fim de apontar se os resultados e as análises se aproximam da realidade do sistema estudado. Além da matemática, já que todas as conclusões tomadas devem ter embasamento estatístico. Entre as dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho, destacam-se:

- A dificuldade de escolha de um *software* que se adequasse aos objetivos do estudo e oferecesse bom suporte para uso.
- O estudo mais aprofundado da linguagem de programação C++, necessária para a utilização da ferramenta de simulação de eventos discretos, o NS-3.
- O levantamento detalhado sobre o funcionamento e a operação de escalonamento de recursos de rádio em redes LTE.
- O estudo aprofundado sobre a integração de VANETs em redes LTE, a fim de criar cenários realísticos e obter análises confiáveis do comportamento real da rede, mesmo a partir dos resultados das simulações.
- A grande quantidade de simulações e o tempo necessário para realizá-las.

Referências

3GPP, LTE: The Mobile Broadband Standart, Disponível em <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, Acesso em maio, 2016.

3GPP, LTE: The Mobile Broadband Standart, Disponível em <http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, Acesso em maio, 2016.

3GPP TS 36.214 V8.2.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer-Measurements (Release 8), 2008.

3G Americas, GSM-UMTS Network Migration to LTE: LTE and 2G-3G interworking functions, 2010.

DLR – Institute of Transportation Systems – SUMO: Simulation of Urban MObility, Disponível em http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/, Acesso em maio, 2016.

ETSI Standards, *Intelligent Transport Systems*, Disponível em: <http://www.etsi.org/index.php/technologies-clusters/technologies/intelligent-transport>, Acesso em junho, 2016a.

ETSI EN 302 665, *Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture*, (2010), Disponível em: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302600_302699/302665/01.01.01_60/en_302665v010101p.pdf, Acesso em junho 2016b.

ETSI TS 136 300, Technical Specification. LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) - Overall description, Stage 2, 2009. Disponível em: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136300/08.09.00_60/ts_136300v08090p.pdf, Acesso em junho 2016.

IEEE Standards Association, *1609 WG – Dedicated Short Range Communication Working Group*, Disponível em: <http://standards.ieee.org/develop/wg/1609_WG.html>, Acesso em junho, 2016.

ISO Standards, *ISO/TC 204 Intelligent Transport Systems*, Disponível em: <http://www.iso.org/iso/iso_technical_committee?commid=54706>, Acesso em junho, 2016.

NEO, *VANET/ITS Website*, Disponível em: <http://neo.lcc.uma.es/staff/jamal/vanet/?q=node/3>, Acesso em junho, 2016.

NS-3, Network Simulator, Disponível em <<http://www.nsnam.org/>>, Acesso em maio, 2016a.

NS-3, Network Simulator, Disponível em <<https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html#resource-allocation-model>>, Acesso em junho, 2016.

NS-3, LTE module documentation, Disponível em: <<http://lena.cttc.es/manual/>>, Acesso em maio, 2016b.

ARANITI, G.; CAMPOLO, C.; CONDOLUCI, M.; IERA, A.; MOLINARO, A. “LTE for vehicular networking: a survey”. *Communications Magazine, IEEE*, vol. 51, no. 5, pp. 148–157, May 2013.

AL-SULTAN, S.; AL-DOORI, M.; AL-BAYATTI, A.; ZEDAN, H. “A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network”. *Journal of Network and Computer Applications*, 2013.

ALI-YAHIYA, T. “Understanding LTE and its Performance”, Springer, 2011.

ALIEIEV, R.; KWOCZEK, A.; HEHN, T. “Automotive Requirements for Future Mobile Networks”. In *IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility*, 2015.

AMEIGEIRAS, P.; WIGARD, J.; MOGENSEN, P. “Performance of the M-LWDF Scheduling Algorithm for Streaming Services in HSDPA”. IEEE Vehicula Technology Conference, vol. 60, no. 2, pp. 999-1003, 2004.

ASADI, A.; WANG, Q.; MANCUSO, V. “A survey on device-to-device communication in cellular networks”. IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 1801-1819, 2014.

BARROS, J. “How to Build Vehicular Networks in the Real World”. 15th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Philadelphia, PA: ACM, pp. 123–124, 2014.

BENDAOUD, F.; ABDENNEBI, M.; DIDI, F. “Survey On Scheduling And Radio Resources Allocation In LTE”. In International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.6, No.1, 2014.

BHOI, S; KHILAR, P. “Vehicular communication: a survey”. IET Networks, Vol. 3, Iss. 3, pp. 204–217, 2014.

BISWAL, S. “On Board Unit Based Authentication for V2V Communication in VANET”. Dissertation (Master of Technology), Department of Computer Science and Engineering of The National Institute of Technology, Rourkela, 2014.

BITTENCOURT, D. Avaliação de Desempenho de redes tolerantes a atrasos e desconexões utilizando a técnica de virtualização. Dissertação (Mestrado em Informática), Programa de Pós-Graduação em Informática do Instituto de Computação da Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

BOJOVIC, B.; BALDO, N. “A new Channel and QoS Aware Scheduler to enhance the capacity of Voice over LTE systems”. Proceedings of 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices, 2014.

BRYDON, A. “LTE MIMO Theory and Practice”. 2013. Disponível em: <<http://www.unwiredinsight.com/2013/lte-mimo/>>. Acesso em junho, 2016.

CACHOV, N.; SONG, J.; VUJIČIĆ, B.; VUJIČIĆ, S.; TRAJKOVIĆ, L. “Simulation and Performance Evaluation of a Public Safety Wireless Network: Case Study”. SIMULATION, produced by The Society for Modeling and Simulation International, Vol. 81, Issue 8, 571-585, 2005.

CAPOZZI, F.; PIRO, G.; GRIECO, L.; BOGGIA, G.; CAMARDA, P. “Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey”. IEEE Comm. Surveys and Tutorials, 2012.

CORREA, S. Probabilidade e Estatística, 2ª Ed, Belo Horizonte: PUC Minas Virtual, 2003.

CHISUNG, B.; DONG, C. “Fairness-Aware Adaptive Resource Allocation Scheme in Multihop OFDMA System”. Communication letters IEEE, 134-136, 2007.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. “4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband”. Academic Press, 2011.

DEVARAJAN, V.; GUNASUNDARI, R.; MEGALAJOTHI, D.; UVARAJ, T. “Performance Analysis of Integrated VANET-LTE Architecture for Wireless Networks”. IEEE International Conference on Advanced Research in Engineering and Technology, IEEE ICARET , pp 337-341, 2013.

DIAS, J.; ISENTTO, J.; SOARES, V.; RODRIGUES, J. “Impact of Scheduling and Dropping Policies on the Performance of Vehicular Delay-Tolerant Networks”. IEEE International Conference on Communications (ICC), 2011.

DUTTA, A.; NORTON, D.; XIAO, J. “3GPP LTE – Evolved UTRA Radio Interface”, 2009. Disponível em: <<http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/LTE/radio.htm>>. Acesso em junho, 2016.

EICHLER, S. “Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard”. IEEE 66th Vehicular Technology Conference, pp. 2199-2203, 2007.

ELTAHIR, A.; SAEED, R.; MOKHTAR, R. “Vehicular Communication and Cellular Network Integration: Gateway Selection Perspective”. 5th International Conference on Computer & Communication Engineering, IEEE, pp. 64-67, 2014.

FOUZIYA SULTHANA, S.; NAKKEERAN, R. “Study of Downlink Scheduling Algorithms in LTE Networks”. In Journal of Networks, Vol. 9, No. 12, December 2014.

FUENTES, J.; GONZÁLEZ-TABLAS, A. “Overview of security issues in Vehicular Ad-hoc Networks”. Handbook of research on mobility and computing: Evolving technologies and ubiquitous impacts, pp.894-911, 2011.

GESSNER, C.; ROESSLER, A.; KOTTKAMP, M. “UMTS Long Term Evolution (LTE) - Technology Introduction”. Rohde & Schwarz GmBh& Co. KG, 2012.

HAN, C.; ARMOUR, S. “Computational Complexity and Energy Consumption Analysis of Dynamic Resource Scheduling Algorithms for LTE”. 75th Vehicular Technology Conference VTC Spring, 1-5, 2012.

IVANOV, S.; HERMS, A.; LUKAS, G. “Experimental validation of the ns-2 wireless model using simulation, emulation, and real network”. Proceedings of the 4th Workshop on Mobile Ad-Hoc Networks, 2007.

JAIN, R. “Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques for Experimental Design Measurements Simulation and Modeling”. Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc., 1991.

JOHNSON, T.; MARGALHO, M. “Avaliação de Desempenho de Sistemas Computacionais”. Editora LTC, 2011.

KRAJZEWICZ, D.; ERDMANN, J.; BEHRISCH, M.; BIEKER, L. “Recent Development and Applications of SUMO – Simulation of Urban Mobility”. International Journal on Advances in Systems and Measurements, vol 5, no 3 & 4, 2012.

KARAGIANNIS, G.; ALTINTAS, O.; EKICI, E.; HEIJENK, G.; JARUPAN, B.; LIN, K.; WEIL, T. "Vehicular Networking: A Survey and Tutorial on Requirements, Architectures, Challenges, Standards and Solutions". *IEEE Communications Surveys&Tutorials*, Vol.13, Iss. 4, pp. 584 – 616, 2011.

KATO, S.; HILTUNEN, M.; JOSHI, K.; SCHLICHTING, R. "Enabling vehicular safety applications over LTE networks". *Connected Vehicles and Expo (ICCVE), 2013 International Conference on*, pp. 747–752, 2013.

KELA, P.; PUTTONEN, J.; KOLEHMAINEN, N.; RISTANIEMI, T.; HENTTONEN, T.; MOISIO, M. "Dynamic Packet Scheduling Performance in UTRA Long Term Evolution Downlink". *International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, 2008.

KIHL, M.; BÜR, B.; MAHANTA, P.; COELINGH, E. "3GPP LTE Downlink Scheduling Strategies in Vehicle-to-Infrastructure Communications for Traffic Safety Applications". *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2012.

KIM, Y.; KIM, Y. "Security Issues in Vehicular Networks". *The International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 468 – 472, 2013.

KOROWAJCZUK, L. "LTE, WiMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis". Wiley, 2011.

LIU, K.; NG, J.; LEE, V.; SON, S.; STOJMENOVIC, I. "Cooperative Data Scheduling in Hybrid Vehicular Ad Hoc Networks: VANET as a Software Defined Network". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume: PP , Issue: 99, 2015.

LI, F.; WANG, Y. "Routing in vehicular ad hoc networks: a survey". *IEEE Veh. Technol. Mag.*, Vol. 2, Iss. 2, pp. 12–22, 2007.

LIN, X.; LAURIE, C. "Improving Fairness in Relay-based Access Networks". *ACM MSWIM*, 18-22, 2008.

LIU, R-H.; IDE, C.; DUSZA, B.; WIETFELD, C.; LIN, Y-B. “ QoE-Aware LTE Radio Link Control Parameters for Voice over IP in Vehicular Environments”. IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2014.

LOTTERMANN, C.; BOTSOV, M.; FERTL, P.; MÜLLNER, R. “Performance Evaluation of Automotive Off-board Applications in LTE Deployments”. IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), 2012.

LUNG-CHIH, T.; GERLA, M. “LTE Resource Scheduling for Vehicular Safety Applications”. 10th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), 2013.

MAHIDA, S.; DURVESH, A. “Design and Performance Evaluation of DL MAC Scheduling Model in LTE”. In International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, Volume 2, Issue 1, 2014.

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

MARQUES, T. “Strive: Partilha de Informação de Trânsito Citadino com Smartphones”; 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computadores e Telemática), Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática, Universidade de Aveiro, 2014.

MIR, Z.; FILALI, F. “LTE and IEEE 802.11p for Vehicular Networking: A Performance Evaluation”. EURASIP Journal on Wireless Communs. and Networking, vol. 2014, no. 1, 2014, p. 89, 2014.

MONGHA, G.; PEDERSEN, K.; KOVACS, Z.; MOGENSEN, P. “QoS Oriented Time and Frequency Domain Packet Schedulers for The UTRAN Long Term Evolution”. Proc. IEEE VTC, 2008.

NAGARAJ, U.; KHARAT, M.; DHAMAL, P. “Study of various routing protocols in VANET”. IJCST, Vol. 2, Iss. 4, pp. 45–52, 2011.

PAPADIMITRATOS, P.; DE LA FORTELLE, A.; EVENSSEN, K.; BRIGNOLO, R.; COSENZA, S. “Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation”. IEEE Communications Magazine, Vol. 47, Iss. 11, pp 84 – 95, 2009.

PENTTINEN, J. “The LTE/SAE Deployment Handbook”. Wiley, 2011

PETIT, J.; SCHAUB, F.; FEIRI, M.; KARGL, F. “Pseudonym Schemes in Vehicular Networks: A Survey”. IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol. 17, No. 1, First Quarter , 2015.

PHAN, M.-A.; REMBARZ, R.; SORIES, S. “A Capacity Analysis for the transmission of Event and Cooperative Awareness Messages in LTE Networks”. 18th ITS World Congress, 2011.

PIRO, G.; ORSINO, A.; CAMPOLO, C.; ARANITI, G.; BOGGIA, G.; MOLINARO, A. “D2D in LTE vehicular networking: system model and upper bound performance”. IEEE 7th International Congresson Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), pp. 281–286, 2015.

RAW, R.; KUMAR, M.; SINGH, N. “Security Challenges, Issues and their Solutions for VANET”. International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA), Vol.5, No.5, 2013.

SEZIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. “LTE–The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice”. 2nd ed. Wiley, 2011.

TRIVEDI, R.; PATEL, M. “Comparison of Different Scheduling Algorithm for LTE”. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 4, 2014.

VINEL, A. “3GPP LTE Versus IEEE 802.11p/WAVE: Which Technology is Able to Support Cooperative Vehicular Safety Applications?”. IEEE Wireless Communications Letters, Vol. 1, No. 2, pp 125-128, 2012.

ZHANG, L.; GAO, D.; ZHAO, W.; CHAO, H-C. "A multilevel information fusion approach for road congestion detection in VANETs". *Math. Comput. Model.*, 58, pp. 1206–1221, 2013.

ZHANG, R.; CHENG, X.; YANG, L.; SHEN, X.; JIAO, B. "A Novel Centralized TDMA-Based Scheduling Protocol for Vehicular Networks". *IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, No. 1, 2015.

ZHENG, K.; ZHENG, Q.;CHATZIMISIOS, P.; XIANG, W.; ZHOU, Y. "Heterogeneous Vehicular Networking: A Survey on Architecture, Challenges, and Solutions". *IEEE Communication Surveys & Tutorials*, Vol. 17, No. 4, pp 2377-2396, 2015.

ZHOU, D.; BALDO, N.; MIOZZO, M., "Implementation and Validation of LTE Downlink Schedulers for ns-3". 6th International Conference on Simulation Tools and Techniques ICST, 211-218, 2013.

ZHOU, D.; SONG, W.; BALDO, N.; MIOZZO, M. "Evaluation of TCP performance with LTE downlink schedulers in avehicular environment".9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013.

ZIMMERMANN, A.; GUNES, M.; WENIG, M.; MEIS, U.; RITZERFELD, J."How to study wireless mesh networks: A hybrid testbed approach". *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA'07)*. Ontario, Canada: IEEE Computer Society Press, May 2007.

ANEXO A

Script para a criação do modelo da rede

/*

Exemplo de uso

```
./waf --run "scratch/ns2-mobility-trace --traceFile=src/mobility/examples/40mobility.tcl --nodeNum=40 --duration=62.0 --logFile=ns2-mobility-trace.log --seed=1 --schedulerType=1"
```

*/

```
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <sstream>
#include "ns3/core-module.h"
#include "ns3/mobility-module.h"
#include "ns3/ns2-mobility-helper.h"
#include "ns3/netanim-module.h"
#include "ns3/lte-helper.h"
#include "ns3/epc-helper.h"
#include "ns3/network-module.h"
#include "ns3/ipv4-global-routing-helper.h"
#include "ns3/internet-module.h"
#include "ns3/lte-module.h"
#include "ns3/applications-module.h"
#include "ns3/point-to-point-helper.h"
#include "ns3/config-store.h"
#include <ns3/config-store-module.h>
#include "ns3/flow-monitor-helper.h"
#include "ns3/flow-monitor-module.h"
#include "ns3/evalvid-client-server-helper.h"
#include "ns3/csma-helper.h"
#include <ns3/buildings-module.h>
#include <cmath>
#define __STDC_FORMAT_MACROS
#include <inttypes.h>
#include <ctime>
#include <time.h>
#include <string>

using namespace ns3;

static ns3::GlobalValue g_srsPeriodicity ("srsPeriodicity",
    "SRS Periodicity (has to be at least "
    "greater than the number of UEs per eNB)",
    ns3::UintegerValue (160),
    ns3::MakeUintegerChecker<uint16_t> ());

int main (int argc, char *argv[])
{
```

```

std::string traceFile;
std::string logFile;

uint32_t nodeNum;
double duration;

uint16_t schedulerType = 1; // tipo do algoritmo de escalonamento
int seed = 1;

// Parse command line - atributos
CommandLine cmd;
cmd.AddValue ("traceFile", "Ns2 movement trace file", traceFile);
cmd.AddValue ("nodeNum", "Number of nodes", nodeNum);
cmd.AddValue ("duration", "Duration of Simulation", duration);
cmd.AddValue ("logFile", "Log file", logFile);
cmd.AddValue ("seed", "Seed", seed);
cmd.AddValue ("schedulerType", "schedulerType", schedulerType);
cmd.Parse (argc,argv);

if (traceFile.empty () || nodeNum <= 0 || duration <= 0 || logFile.empty ())
{
    std::cout << "Usage of " << argv[0] << " :\n\n"
    ".\waf --run \"ns2-mobility-trace"
    " --traceFile=src/mobility/examples/default.ns_movements"
    " --nodeNum=2 --duration=100.0 --logFile=ns2-mob.log\" \n\n"
    "NOTE: ns2-traces-file could be an absolute or relative path. You could use the file
default.ns_movements\n"
    " included in the same directory of this example file.\n\n"
    "NOTE 2: Number of nodes present in the trace file must match with the command line argument and
must\n"
    " be a positive number. Note that you must know it before to be able to load it.\n\n"
    "NOTE 3: Duration must be a positive number. Note that you must know it before to be able to load
it.\n\n";

    return 0;
}

const clock_t begin_time = clock();
const std::string folderName = "TESTE";
std::stringstream traceName;
std::stringstream traceNameeul;

DataRate VideodlDataRate = DataRate("440.0kb/s"); // video
int VideodlDataSize = 1203; //bytes

RngSeedManager::SetSeed (seed);

UIntegerValue uintegerValue;
GlobalValue::GetValueByName ("srsPeriodicity", uintegerValue);
uint16_t srsPeriodicity = uintegerValue.Get ();

Config::SetDefault ("ns3::LteEnbRrc::SrsPeriodicity", UintegerValue (srsPeriodicity));

traceName<< "DIRlcStats_" << seed << "_"<<nodeNum<< "_"<<schedulerType<< ".txt";
Config::SetDefault ("ns3::RadioBearerStatsCalculator::DIRlcOutputFilename", StringValue
(traceName.str()));

traceNameeul<< "UIRlcStats_" << seed << "_"<<nodeNum<< "_"<<schedulerType<< ".txt";
Config::SetDefault ("ns3::RadioBearerStatsCalculator::UIRlcOutputFilename", StringValue
(traceNameeul.str()));

```

```

// Criar Ns2MobilityHelper a partir de um trace log especifico como parâmetro (tracefile)
Ns2MobilityHelper uemobility = Ns2MobilityHelper (traceFile); //tracefile gerado com SUMO

// criar nos veiculos

NodeContainer ueNodes;
ueNodes.Create (nodeNum);

uemobility.Install (); // configura o movimento de cada no enquanto le arquivo

// Criar enb

NodeContainer enbNodes;
enbNodes.Create(1);

// Criar remote host
NodeContainer remoteHostContainer; //container que contém todos os remotes hosts
remoteHostContainer.Create (1);
Ptr<Node> V1remoteHost = remoteHostContainer.Get (0); // V fluxo vÃdeo

Ptr<LteHelper> lteHelper = CreateObject<LteHelper> ();

Ptr<PointToPointEpcHelper> epcHelper = CreateObject<PointToPointEpcHelper> ();
lteHelper->SetEpcHelper (epcHelper);

ConfigStore inputConfig;
inputConfig.ConfigureDefaults();

// substituir valores default a partir da linha de comando
cmd.Parse(argc, argv);

// Criar pgw

Ptr<Node> pgw = epcHelper->GetPgwNode ();

NodeContainer pgwContainer;
pgwContainer.Add (pgw);

// Instalar modelo de mobilidade

Ptr<ListPositionAllocator> positionAlloc1 = CreateObject<ListPositionAllocator> ();
positionAlloc1->Add (Vector(50, 50, 0));
positionAlloc1->Add (Vector(50, 150, 0));
positionAlloc1->Add (Vector(50, 100, 0));

MobilityHelper mobility; //assistente para mobilidade* eNB -> posicionamento da eNB

mobility.SetMobilityModel("ns3::ConstantPositionMobilityModel"); //eNB sem mobilidade
mobility.SetPositionAllocator(positionAlloc1); //posiciona a eNB em vector 0,0,0
mobility.Install(enbNodes);
mobility.Install(remoteHostContainer);
mobility.Install(pgwContainer);

InternetStackHelper internet; //assistente de topologia de internet
internet.Install (remoteHostContainer); //instala a pilha de protocolos de internet em cada no do container
Remotehost
//----- Criar Internet

PointToPointHelper p2ph; //assistente para conexao ponto a ponto

```

```

//configura os atributos da conexão p2ph
p2ph.SetDeviceAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate ("100Gb/s")));
p2ph.SetDeviceAttribute ("Mtu", UIntegerValue (1500));
p2ph.SetChannelAttribute ("Delay", TimeValue (Seconds (0.010)));

NetDeviceContainer V1internetDevices = p2ph.Install (pgw, V1remoteHost);

Ipv4AddressHelper V1ipv4h; //assistente para alocação de endereço ip

V1ipv4h.SetBase ("1.0.0.0", "255.0.0.0"); //endereço ip, máscara de sub-rede

Ipv4InterfaceContainer V1internetIpIfaces = V1ipv4h.Assign (V1internetDevices);

Ipv4Address remoteHostAddr = V1internetIpIfaces.GetAddress (1);

Ipv4StaticRoutingHelper ipv4RoutingHelper;

Ptr<Ipv4StaticRouting> V1remoteHostStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (V1remoteHost-
>GetObject<Ipv4> ());
V1remoteHostStaticRouting->AddNetworkRouteTo (Ipv4Address ("7.0.0.0"), Ipv4Mask ("255.0.0.0"), 1);

/* ----- escolha do escalonador ----- */

    if(schedulerType == 1){
        lteHelper->SetSchedulerType ("ns3::RrFfMacScheduler"); //Round Robin
    }else if(schedulerType == 2){
        lteHelper->SetSchedulerType ("ns3::TtaFfMacScheduler"); // Throughput to Average
    }else if(schedulerType == 3){
        lteHelper->SetSchedulerType ("ns3::PssFfMacScheduler"); //Priority Set
    }else if(schedulerType == 4){
        lteHelper->SetSchedulerType ("ns3::PffFfMacScheduler"); //Proportional Fair
    }else if(schedulerType == 5){
        lteHelper->SetSchedulerType ("ns3::CqaFfMacScheduler"); //Channel and QoS Aware
    }else{
        std::cout<<"Nao existe essa opção de schedulerType (apenas 1 a 5)";
        return 0;
    }
}

lteHelper->SetSchedulerAttribute ("CqiTimerThreshold", UIntegerValue (1));

//----- Atributos da transmissão -----//

//Modelo de Propagação
//lteHelper->SetAttribute ("PathlossModel", StringValue ("ns3::Cost231PropagationLossModel"));
lteHelper->SetAttribute ("PathlossModel", StringValue ("ns3::FriisSpectrumPropagationLossModel"));

lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("DIEarfcn", UIntegerValue (0));
lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("UIEarfcn", UIntegerValue (18000));
lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("DIBandwidth", UIntegerValue (50)); // 50 RBs ~ 10 MHz
lteHelper->SetEnbDeviceAttribute ("UIBandwidth", UIntegerValue (50));

// Install LTE Devices to the nodes
NetDeviceContainer enbLteDevs = lteHelper->InstallEnbDevice (enbNodes);
NetDeviceContainer ueLteDevs = lteHelper->InstallUeDevice (ueNodes);

// Install the IP stack on the UEs
internet.Install (ueNodes);
Ipv4InterfaceContainer ueIpIface;
ueIpIface = epcHelper->AssignUeIpv4Address (NetDeviceContainer (ueLteDevs));

```

```

// Assign IP address to UEs, and install applications
for (uint32_t u = 0; u < ueNodes.GetN (); ++u)
{
    Ptr<Node> ueNode = ueNodes.Get (u);
    // Set the default gateway for the UE
    Ptr<Ipv4StaticRouting> ueStaticRouting = ipv4RoutingHelper.GetStaticRouting (ueNode-
>GetObject<Ipv4> ());
    ueStaticRouting->SetDefaultRoute (epcHelper->GetUeDefaultGatewayAddress (), 1);
}

// Attach one UE per eNodeB
for (uint16_t i = 0; i < nodeNum; i++)
{
    lteHelper->Attach (ueLteDevs.Get(i), enbLteDevs.Get(0));
    // side effect: the default EPS bearer will be activated
}

//Aplicacao

Ptr<EpcTft> tftVIDEO = Create<EpcTft> ();

EpcTft::PacketFilter PacketFilterB1;
PacketFilterB1.localPortStart = 1234;
PacketFilterB1.localPortEnd = 1300;
tftVIDEO->Add(PacketFilterB1);

//configuraÃ§Ão do dedicated bearer VIDEO
enum EpsBearer::Qci qVID = EpsBearer::GBR_CONV_VIDEO;
GbrQosInformation VIDqos;
VIDqos.gbrDI = 440; // Downlink GBR
VIDqos.gbrUI = 0; // Uplink GBR
VIDqos.mbrDI = 800; // Downlink MBR
VIDqos.mbrUI = 0; // Uplink MBR
EpsBearer VIDbearer (qVID, VIDqos);

for (uint16_t i = 0; i < nodeNum; i++)
{
    lteHelper->ActivateDedicatedEpsBearer(ueLteDevs.Get(i), VIDbearer, tftVIDEO);
}

//----- configuraÃ§Ão das aplicacoes nos UEs e remote host -----

//declara as portas a serem utilizadas
uint16_t dlPort = 1234; //porta dl video
uint16_t ulPort = 2000; //porta ul video

uint32_t videoNodeNum = nodeNum - 20; //20 ues sao video
//std::cout<< videoNodeNum;

for (uint32_t u = videoNodeNum; u < nodeNum; ++u) //ultimos ues da lista
{
    ++dlPort;

//Downlink Video

    OnOffHelper V1dlVideonoff=OnOffHelper("ns3::UdpSocketFactory",InetSocketAddress
(ueIpIface.GetAddress (u), dlPort));
    V1dlVideonoff.SetAttribute ("OnTime", StringValue("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=1]"));
}

```

```

V1dlVideonoff.SetAttribute ("OffTime", StringValue("ns3::ConstantRandomVariable[Constant=0]"));
V1dlVideonoff.SetAttribute("PacketSize", UIntegerValue(VideodlDataSize));
V1dlVideonoff.SetAttribute("DataRate",DataRateValue(VideodlDataRate));
Config::SetDefault ("ns3::UdpSocket::RcvBufSize", UIntegerValue (1000000000)); // DEFINE
TAMANHO DO BUFFER
ApplicationContainer V1dlVideoapp = V1dlVideonoff.Install (V1remoteHost);
V1dlVideoapp.Start (Seconds(0.0));
V1dlVideoapp.Stop(Seconds(62.0));

} //fim aplicação DL

//inicio aplicação UL

for (uint32_t u = 0; u < videoNodeNum; ++u)
{

++ulPort;

ApplicationContainer clientApps; // CRIA INTERFACE CLIENTE
ApplicationContainer serverApps; // CRIA INTERFACE SERVIDOR

PacketSinkHelper ulPacketSinkHelper ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress
(Ipv4Address::GetAny (), ulPort));

clientApps = ulPacketSinkHelper.Install (V1remoteHost); // INSTALA INTERFACE SERVIDOR NO
DAU
UdpClientHelper ulClient (remoteHostAddr, ulPort);
ulClient.SetAttribute ("Interval", TimeValue (Seconds (0.1))); // DEFINE INTERVALO DE
TRANSMISSAO
ulClient.SetAttribute ("MaxPackets", UIntegerValue(100000000));
ulClient.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (256)); // DEFINE NUMERO MAXIMO DE
PACOTES
Config::SetDefault ("ns3::UdpSocket::RcvBufSize", UIntegerValue (1000000000)); // DEFINE
TAMANHO DO BUFFER
serverApps = ulClient.Install (ueNodes.Get(u)); // INSTALA INTERFACE CLIENTE NA ENB
serverApps.Start (Seconds (0.0)); // INICIA APLICACAO SERVER
clientApps.Start (Seconds (0.0)); // INICIA APLICACAOCLIENT
clientApps.Stop (Seconds (62.0)); // FINALIZA APLICACAO CLIENT
serverApps.Stop (Seconds (62.0)); // FINALIZA APLICACAO SERVER

}

//----- fim aplicacoes -----

Simulator::Stop (Seconds (duration));

//AnimationInterface anim ("animation2.xml");

lteHelper->EnableRlcTraces ();
lteHelper->EnablePdcPTraces ();

Simulator::Run ();

std::cout<<float(clock() - begin_time) / CLOCKS_PER_SEC;

Simulator::Destroy ();

return 0;
}

```