UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

HENRIQUE JÚNIOR JAQUES PEREIRA

Mecanismo de *handoff* definido por *software* com suporte à técnica de *multihoming* para redes veiculares heterogêneas

Recife
2021

HENRIQUE JÚNIOR JAQUES PEREIRA

Mecanismo de *handoff* definido por *software* com suporte à técnica de *multihoming* para redes veiculares heterogêneas

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Redes de Computadores
Orientador: Kelvin Lopes Dias

Recife
2021

Catalogação na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

P436m Pereira, Henrique Júnior Jaques
Mecanismo de *handoff* definido por *software* com suporte à técnica de *multihoming* para redes veiculares heterogêneas / Henrique Júnior Jaques Pereira. – 2021.
99 f.: il., fig., tab.

Orientador: Kelvin Lopes Dias.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2021.
Inclui referências.

1. Redes de computadores. 2. Redes veiculares. I. Dias, Kelvin Lopes (orientador). II. Título.

004.6 CDD (23. ed.) UFPE - CCEN 2021 – 111

HENRIQUE JÚNIOR JAQUES PEREIRA

"**Mecanismo de *handoff* definido por *software* com suporte à técnica de *multihoming* para redes veiculares heterogêneas**"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Aprovado em: 08/03/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andson Marreiros Balieiro
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. José Jailton Henrique Ferreira Junior
Faculdade de Computação / UFPA

Prof. Dr. Kelvin Lopes Dias (**Orientador**)
Centro de Informática / UFPE

Dedico este trabalho à minha família, especialmente ao meu pai e avô Pr. Raimundo Estevão Pereira (in memoriam) pelo exemplo, pelos conselhos e pelos seus ensinos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Grande Deus pela sua infindável misericórdia para comigo, sem a qual não seria possível concluir mais esta etapa em minha vida.

Agradeço ao meu orientador Professor Dr. Kelvin Lopes Dias pela confiança e oportunidade de participar do seu projeto e, assim, desenvolver esta pesquisa.

Agradeço à toda minha família, especialmente à minha mãe Elizeth Pereira, à minha vó Calina Jaques e ao meu padrasto Raimundo Nonato, pelo apoio e incentivo incansáveis durante minha jornada no mestrado.

Agradeço também ao meu pai e avô Pr. Raimundo Estevão Pereira que, embora não esteja mais entre nós, estará para sempre em meu coração. Foi meu melhor amigo, meu conselheiro, meu Pastor e um grande incentivador para que eu entrasse e concluísse o mestrado. Esta conquista teve participação ativa dele.

Um agradecimento especial aos meus amigos e colegas do grupo de pesquisa IANG pela parceria e amizade desenvolvida durante a pós-graduação.

RESUMO

As VANETs (*Vehicular Ad Hoc Networks*) são redes sem fio que visam suportar aplicações e serviços como entretenimento, controle de tráfego rodoviário e segurança para passageiros de veículos no âmbito dos Sistemas de Transporte Inteligente (ITS – *Intelligent Transportation Systems*) para as cidades inteligentes. As VANETs viabilizam processamento e comunicação direta entre veículos e com a infraestrutura de comunicação disposta ao longo das rodovias. Esta rede é altamente dinâmica tanto pelas características do meio sem fio quanto pela mobilidade dos veículos. Dessa forma, procedimentos efetivos de *handoff* ou *handover*, isto é, a transferência de conexão de uma sessão em andamento entre estações rádio-base, são de vital importância para a continuidade do fornecimento de conteúdo enquanto os veículos se locomovem. Em razão da característica peculiar das VANETs, o gerenciamento de mobilidade é uma tarefa desafiadora em termos de garantias de QoS (*Quality of Service*) e QoE (*Quality of Experience*) para aplicações de tempo real e não real, sobretudo em ambientes de redes heterogêneas com diversas tecnologias de acesso sem fio (por exemplo, LTE e 802.11p). Nesse contexto, esta dissertação propõe um mecanismo de *handoff* para cenários veiculares baseados em redes de acesso heterogêneas com o objetivo de assegurar requisitos de QoS e QoE exigidos por aplicações de tempo real e não real. A estratégia proposta aplica o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) nas tomadas de decisões de *handoff*, levando em consideração parâmetros como: RSSI (*Received Signal Strength Indication*), velocidade e posição dos veículos e outras informações de contexto. O sistema proposto utiliza o paradigma SDN (*Software Defined Networking*) para viabilizar a programabilidade do plano de controle, particularmente, em relação ao procedimento de *handoff*, através da visão global da rede para aplicação das políticas de gerenciamento de mobilidade, com o controlador SDN posicionado na nuvem da operadora ou provedor de acesso da rede veicular. Ademais, a proposta aplica também a técnica de *multihoming* para garantir que o processo de transferência de conexão ocorra sem interrupções, por meio da transmissão simultânea de pacotes das aplicações por múltiplos caminhos. Para a avaliação de desempenho e dos benefícios da proposta, as tecnologias IEEE 802.11p e LTE (*Long Term Evolution*), bem como o suporte SDN foram implementados em um modelo de simulação utilizando o simulador de eventos discretos OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*). Três aplicações foram consideradas nas avaliações: Navegação *Web*, além de VoIP (*Voice over Internet Protocol*) e *streaming* de vídeo, como aplicações de tempo real. Com base nas simulações realizadas, comparando a proposta com soluções tradicionais, os resultados indicam ganhos de 50% a 99% em relação às métricas de QoS, isto é, atraso fim a fim, perda de pacotes e *jitter*. Já em relação ao PSNR, métrica de QoE, a superioridade no desempenho obtido pela proposta chegou a 64%.

Palavras-chaves: VANETs. *Handoff*. AHP. SDN. *Multihoming*.

ABSTRACT

The VANETs(Vehicular Ad Hoc Networks) are wireless networks that aim to support applications and services such as entertainment, road traffic control and vehicle passenger safety under Intelligent Transportation Systems (ITS) for smart cities. The VANETs enable processing and direct communication between vehicles and with the communication infrastructure arranged along the highways. This network is highly dynamic both by the characteristics of the wireless medium and by the mobility of the vehicles. Thus, effective handoff or handover procedures, that is, the transfer of connection from an ongoing session between base stations, are of vital importance for the continuity of the supply of content while vehicles move. Due to the peculiar characteristic of the VANETs, mobility management is a challenging task in terms of Quality of Service (QoS) and Quality of Experience (QoE) guarantees for real-time and non-real-time applications, especially in heterogeneous network environments with various wireless access technologies(e.g., LTE and 802.11p). In this context, this dissertation proposes a handoff mechanism for vehicular scenarios based on heterogeneous access networks with the objective of ensuring QoS and QoE requirements required by real-time and non-real-time applications. The proposed strategy applies the AHP (Analytic Hierarchy Process) in handoff decision making, taking into account parameters such as: RSSI (Received Signal Strength Indication), speed and position of vehicles and other context information. The proposed system uses the SDN (Software Defined Networking) paradigm to enable the programmability of the control plan, particularly in relation to the handoff procedure, through the global view of the network for the application of mobility management policies, with the SDN controller positioned in the cloud of the operator or access provider of the vehicular network. In addition, the proposal also applies the multihoming technique to ensure that the connection transfer process occurs without interruptions, through the simultaneous transmission of application packets over multiple paths. For the evaluation of performance and the benefits of the proposal, the IEEE 802.11p and LTE (Long Term Evolution) technologies, as well as SDN support were implemented in a simulation model using the Discrete Event Simulator OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed in C++). Three applications were considered in the evaluations: Web Browsing, in addition to VoIP (Voice over Internet Protocol) and video streaming, as real-time applications. Based on the simulations performed, comparing the proposal with traditional solutions, the results indicate gains of 50% to 99% in relation to QoS metrics, that is, end-to-end delay, packet loss and jitter. In relation the PSNR, the QoE metric, the superiority in the performance obtained by the proposal reached 64%.

Keywords: VANETs. Handoff. AHP. SDN. Multihoming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comunicação em VANETs 21
Figura 2 – Topologia da rede LTE 23
Figura 3 – Camadas SDN 26
Figura 4 – Cenário de *handoff* horizontal 29
Figura 5 – Cenário de *handoff* vertical 29
Figura 6 – Rede com *multihoming* 31
Figura 7 – Estruturação de problema com AHP 33
Figura 8 – Arquitetura do Sistema 48
Figura 9 – Fases do Contexto do *Handoff* 51
Figura 10 – Camadas de protocolos do veículo 53
Figura 11 – Camadas de protocolos do controlador 54
Figura 12 – Redirecionamento de tráfego via SDN 57
Figura 13 – *Multihoming* via SDN 58
Figura 14 – Sinalização da Proposta 59
Figura 15 – Fluxograma da Inteligência 61
Figura 16 – Atraso fim a fim na aplicação WWW no cenário com 6 veículos 67
Figura 17 – *Jitter* na aplicação WWW no cenário com 6 veículos 68
Figura 18 – Atraso fim a fim na aplicação VoIP no cenário com 6 veículos 70
Figura 19 – Perda de pacotes na aplicação VoIP no cenário com 6 veículos 71
Figura 20 – Atraso fim a fim no *streaming* de vídeo no cenário com 6 veículos . . . 72
Figura 21 – PSNR do *streaming* de vídeo no cenário com 6 veículos 73
Figura 22 – Atraso fim a fim na aplicação WWW no cenário com 16 veículos 75
Figura 23 – *Jitter* na aplicação WWW no cenário com 16 veículos 76
Figura 24 – Atraso fim a fim na aplicação VoIP no cenário com 16 veículos 78
Figura 25 – Perda de pacotes na aplicação VoIP no cenário com 16 veículos 79
Figura 26 – Atraso fim a fim no *streaming* de vídeo no cenário com 16 veículos . . . 80
Figura 27 – PSNR do *streaming* de vídeo no cenário com 16 veículos 81
Figura 28 – Atraso fim a fim na aplicação WWW no cenário com 31 veículos 83
Figura 29 – *Jitter* na aplicação WWW no cenário com 31 veículos 84
Figura 30 – Atraso fim a fim na aplicação VoIP no cenário com 31 veículos 85
Figura 31 – Perda de pacotes na aplicação VoIP no cenário com 31 veículos 87
Figura 32 – Atraso fim a fim no *streaming* de vídeo no cenário com 31 veículos . . . 88
Figura 33 – PSNR no *streaming* de vídeo no cenário com 31 veículos 89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados 43
Tabela 2 – Tabela de decisão dos julgamentos dos parâmetros de *handoff* 56
Tabela 3 – Pesos dos parâmetros de decisão de *handoff* considerados no AHP . . . 56
Tabela 4 – Qualidade do valor do PSNR 64
Tabela 5 – Parâmetros de Simulação 65
Tabela 6 – Desempenho do mecanismo de *handoff* proposto, no cenário com 6 veículos 74
Tabela 7 – Desempenho do mecanismo de *handoff* proposto, no cenário com 16 veículos 82
Tabela 8 – Desempenho do mecanismo de *handoff* proposto, no cenário com 31 veículos 90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características do LTE 24
Quadro 2 – Comparação entre versões do *OpenFlow* 28
Quadro 3 – Graus de importância no julgamento com AHP 34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	*Third Generation*
3GPP	*3rd Generation Partnership Project*
4G	*Fourth Generation*
AHP	*Analytic Hierarchy Process*
API	*Application Programming Interface*
CMT-SCTP	*Concurrent Multipath Transfer for Stream Control Transmission Protocol*
dBm	*decibel miliwatt*
DPI	*Deep Packet Inspection*
DSRC	*Dedicated Short Range Communications*
eNodeB	*Evolved Node B*
EPC	*Evolved Packet Core*
E-UTRAN	*Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network*
GPS	*Global Position System*
HEVC	*High Efficiency Video Coding*
HSS	*Home Subscriber Server*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IETF	*Internet Engineering Task Force*
IoT	*Internet of Things*
IP	*Internet Protocol*
ITS	*Intelligent Transportation System*
LQPVH	*Link Quality and QoE aware Predictive Vertical Handoff*
LTE	*Long Term Evolution*
MADM	*Multiple Attribute Decision Making*
MANETs	*Mobile Ad Hoc Networks*
MME	*Mobility Management Entity*
MOFR	*Middle OpenFlow Router*
MPTCP	*Multipath TCP*
N-PMIPv6	*NEMO-enabled Proxy Mobile IPv6*
NDT	*Network Dwell Time*

OBU	*On Board Unit*
OF	*OpenFlow*
OFDMA	*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*
OHD-SDN	*Offloading with Handover Decision based on Software Defined Network*
OMNeT++	*Objective Modular Network Testbed in C++*
ONF	*Open Networking Foundation*
PGW	*Packet Data Network Gateway*
PSNR	*Peak Signal-to-Noise Ratio*
QoE	*Quality of Experience*
QoS	*Quality of Service*
RFC	*Request for Comments*
RSS	*Received Signal Strength*
RSSI	*Received Signal Strength Indication*
RSU	*Road-Side Unit*
RTP	*Real-Time Transport Protocol*
SC-FDMA	*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*
SCTP	*Stream Control Transmission Protocol*
SDN	*Software Defined Networking*
SGW	*Serving Gateway*
SNR	*Signal-to-Noise Ratio*
TBVH	*Time Before Vertical Handover*
TCP	*Transmission Control Protocol*
UDP	*User Datagram Protocol*
UE	*User Equipment*
V2I	*Vehicle-To-Infrastructure*
V2V	*Vehicle-To-Vehicle*
V2X	*Vehicle-To-Everything*
VANETs	*Vehicular Ad Hoc Networks*
VCC	*Vehicular Cloud Computing*
WI-FI	*Wireless Fidelity*
WiMax	*Worldwide Interoperability for Microwave Access*
WWW	*World Wide Web*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 MOTIVAÇÃO 15
1.2 OBJETIVO GERAL 17
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 18

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 19
2.1 REDES VEICULARES *AD HOC* (VANETS) 19
2.1.1 Características 19
2.1.2 O Padrão IEEE 802.11p 21
2.2 A TECNOLOGIA *LONG TERM EVOLUTION* (LTE) 22
2.2.1 Componentes Arquiteturais 22
2.2.2 Sistema LTE como Tecnologia de Rede Sem Fio para Cenários VANETs 24
2.3 REDES DEFINIDAS POR *SOFTWARE* 25
2.3.1 Protocolo *OpenFlow* 27
2.4 *HANDOFF* 27
2.4.1 Impactos causados pelo *Handoff* 29
2.5 *MULTIHOMING* 30
2.6 *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS* (AHP) 32
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 34

3 ESTADO DA ARTE 35
3.1 MECANISMOS DE *HANDOFF* PARA VANETS 35
3.2 MECANISMOS DE *HANDOFF* COM SDN PARA VANETS 39
3.3 *HANDOFF* COM *MULTIHOMING* EM VANETS 41
3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 46

4 ARQUITETURA PROPOSTA 47
4.1 ARQUITETURA EM CAMADAS 47
4.1.1 Camada Inferior - Plano de dados veicular 49
4.1.2 Camada Intermediária - Plano de dados da infraestrutura 49
4.1.3 Camada Superior - Controle e serviços 49
4.2 DETALHAMENTO FUNCIONAL DO MECANISMO DE *HANDOFF* 50
4.2.1 Monitoramento da Rede 52
4.2.2 Gerenciamento e Controle da Rede 52

4.2.3 Agente Inteligente . . . 54
4.2.4 Redirecionamento de Tráfego com SDN . . . 56
4.2.5 *Multihoming* com SDN . . . 58
4.3 SINALIZAÇÃO DA PROPOSTA . . . 59
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . 61

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL . . . 62
5.1 METODOLOGIA . . . 62
5.1.1 Aplicações . . . 63
5.1.2 Métricas . . . 63
5.1.3 Parâmetros de Simulação . . . 64
5.1.4 Cenários de simulação . . . 66
5.2 CENÁRIO COM 6 VEÍCULOS . . . 66
5.2.1 Resultados obtidos . . . 66
5.3 CENÁRIO COM 16 VEÍCULOS . . . 74
5.3.1 Resultados obtidos . . . 75
5.4 CENÁRIO COM 31 VEÍCULOS . . . 82
5.4.1 Resultados obtidos . . . 82
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . 90

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . 91
6.1 CONTRIBUIÇÕES . . . 91
6.2 TRABALHOS FUTUROS . . . 92

REFERÊNCIAS . . . 93

1 INTRODUÇÃO

Este Capítulo introduz os principais pontos que serão abordados neste trabalho, especialmente o contexto norteado pelas Redes Veiculares *Ad Hoc* e Redes Definidas por *Software*. Discute o problema abordado nesta dissertação, apontando os principais desafios para suprir as necessidades dos usuários no que diz respeito à conexão sem fio com a rede de dados. Além disso, são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos, e, por fim, é exibida a estrutura desta dissertação.

1.1 MOTIVAÇÃO

Em razão da constante e progressiva necessidade de desenvolver e aprimorar tecnologias que possibilitem a manipulação de grande volume de dados, as redes de conexão sem fio precisam evoluir. A massiva quantidade de informações que trafegam na *Internet*, por meio de *downloads* e *uploads*, se dá em razão do aumento do número de dispositivos móveis conectados com as mais diversas redes sem fio, por exemplo as tecnologias *Fourth Generation* (4G) e *Wireless Fidelity* (WI-FI). Segundo (KARUNARATHNE; KULAWANSA; FIRDHOUS, 2018), a quantidade de dispositivos conectados à *Internet* até 2050 ultrapassará os 100 bilhões.

A maioria dos dispositivos que surgirão, segundo (KARUNARATHNE; KULAWANSA; FIRDHOUS, 2018), fazem parte da chamada *Internet of Things* (IoT) (PERERA et al., 2015). Com o advento da IoT, qualquer dispositivo eletrônico, por exemplo geladeiras inteligentes, *smart* TVs, sensores sem fio entre outros, poderão produzir, armazenar e processar informações na Rede Mundial de Computadores. Ademais, a IoT abre espaço para o surgimento dos chamados dispositivos vestíveis (*Wearables*), isto é, equipamentos que são utilizados junto ao corpo humano, como relógios e pulseiras inteligentes, para coletar e enviar dados através da *Internet*. A IoT permite que pessoas e "coisas" sejam conectados a qualquer momento, em qualquer lugar e em qualquer rede de serviço de dados (PERERA et al., 2015).

Outra classe de dispositivos que tem surgido com o aparecimento da IoT são os carros inteligentes, que portam, dentre outras funcionalidades, a possibilidade de execução de aplicações que necessitam de conexão com a *Internet*. Os carros inteligentes saem de fábrica equipados, entre outros acessórios, com sensores e computadores de bordo. Desta forma, com o aparecimento dos veículos inteligentes, atrelado ao advento da IoT, tem surgido também uma nova classe de rede sem fio, denominada *Vehicular Ad Hoc Networks* (VANETs) (GLASS; MAHGOUB; RATHOD, 2017).

As VANETs são compostas, em especial, por veículos e por infraestruturas de acesso à conexão sem fio dispostas ao longo de uma via, denominadas de Unidade de Acostamento,

e foram concebidas perante a utilização dos princípios e das características das *Mobile Ad Hoc Networks* (MANETs). Logo, trata-se de uma rede sem fio para troca de dados em um cenário veicular, possibilitando a conexão com diversas tecnologias de acesso à rádio.

A união das RSUs *Road-Side Unit* (RSU), juntamente com os veículos com tecnologias de acesso à rádio, e ligados à execução de aplicações para a *Internet*, formam o denominado *Intelligent Transportation System* (ITS).

As redes VANETs têm sido objeto de estudos e debates na comunidade científica (KRISTIANA; SCHMITT; STILLER, 2016); (ABDENNOUR; JIA, 2018); (AL-HEETY et al., 2020) concernente à descoberta de meios que possam suprir as necessidades dos usuários no que tange a qualidade dos serviços oferecidos. *Streamings* de vídeos, jogos *online*, e chamadas por Voz sobre IP são aplicações que se popularizaram nos últimos anos, atraindo uma massa de usuários em razão dos seus benefícios e da praticidade. As redes VANETs possibilitam que os passageiros de veículos inteligentes possam usufruir dessas aplicações.

Um dos grandes desafios em pesquisas com as redes VANETs é conciliar o gerenciamento de mobilidade dos veículos com a preservação íntegra da conexão do usuário à rede sem fio. Aplicações *multimídia*, no geral, demandam alta largura de banda para que a sua execução ocorra sem interrupções no lado do usuário. Uma das tarefas desafiadora nas redes VANETs é evitar conexões intermitentes com a rede de dados durante a mobilidade dos veículos, provendo suporte para melhor *Quality of Service* (QoS) e *Quality of Experience* (QoE) das aplicações. Além disso, há aplicações que requerem diferentes graus de QoS e QoE, por exemplo uma chamada de vídeo em tempo real necessita de maior QoS (menor tempo no atraso fim a fim, por exemplo) em relação a um *download* de vídeo. Nesse sentido, os esforços da comunidade científica se concentram em prover a qualidade de serviço e qualidade de experiência exigidos pelos diversos tipos de aplicações em uma rede veicular, perante a mobilidade do veículo.

Devido as redes móveis terem se tornadas bastante complexas, no que diz respeito à gerência das infraestruturas responsáveis pelo tráfego de dados e controle da rede, a comunidade científica tem procurado novas estratégias para otimizar o gerenciamento das tecnologias de conexão sem fio. Um novo paradigma que está em voga é o *Software Defined Networking* (SDN), que provê gerenciamento efetivo para as atuais infraestruturas de rede.

SDN separa o plano de dados, ou seja, o encaminhamento de tráfego, e o plano de controle dos dispositivos de núcleo, viabilizando a programabilidade da rede (AMIN; REISSLEIN; SHAH, 2018). Com SDN, soluções engessadas e estritamente ligadas à plataforma e fabricantes se tornam programáveis, otimizando o gerenciamento da rede. Logo, através de soluções que envolvem este paradigma, a rede pode mudar dinamicamente seu comportamento por meio de aplicações executadas em um controlador centralizado.

Ao separar o plano de dados e o plano de controle dos dispositivos de rede, o SDN deixa bem definidas as funções que cada dispositivo irá desempenhar. Primeiramente,

os *switches* e roteadores ficarão responsáveis apenas pelo encaminhamento do tráfego de dados, ou seja, seus comportamentos serão gerenciados através de regras definidas no controlador central. Por conseguinte, o plano de controle ficará sob responsabilidade do controlador da rede, isto é, a lógica de funcionalidades como roteamento, segurança, balanceamento de carga, gerenciamento de mobilidade e de QoS serão implementadas no dispositivo gerenciador central do sistema. Antes do SDN, tais funcionalidades eram implementadas diretamente nos equipamentos, restringindo o comportamento da rede.

Devido às vantagens e facilidades do SDN, os pesquisadores em redes veiculares têm estudado formas de combinar o paradigma de redes definidas por software com as VANETs, com o intuito de flexibilizar o gerenciamento da rede (AL-HEETY et al., 2020).

As VANETs são redes altamente dinâmicas, ou seja, os veículos, em razão de sua constante mobilidade, frequentemente ficam deslocando-se entre células de redes diferentes. Por esse motivo, as VANETs se propõem serem um cenário de redes heterogêneas sem fio, isto é, um cenário onde o veículo terá mais de uma opção de conexão com uma tecnologia de acesso à rádio. A migração automática da conexão para a melhor rede disponível é conhecido como *handoff*.

Devido à velocidade dos veículos nas vias, torna-se necessário conceber um mecanismo inteligente e flexível que possa gerenciar de forma dinâmica o *handoff* dos veículos, com intuito de garantir sempre a melhor conexão de rede sem fio e evitar quebras na conexão do usuário. Em razão disso, o SDN é pensado como um meio viável para prover o melhor controle da rede.

Em razão do cenário especial das redes veiculares, uma nova tecnologia de acesso à rádio foi desenvolvida para atender demandas e fornecer suporte ao QoS das aplicações executadas pelos usuários. O padrão IEEE 802.11p (KENNEY, 2011), uma tecnologia de rede sem fio, foi projetado para suprir as necessidades de conexão para os veículos.

Para corroborar a heterogeneidade das redes VANETs, a tecnologia *Long Term Evolution* (LTE), tecnologia da quarta geração das rede móveis, foi apresentada em (RENGARAJU; LUNG, 2016) e em (THOTA et al., 2017) como suporte e infraestrutura em um cenário VANETs.

Levando em consideração o cenário heterogêneo de redes sem fio, é fundamental a presença de um agente inteligente que gerencie a mobilidade dos veículos e o *handoff*, ou seja, a seleção da melhor conexão sem fio. Em razão disso, este trabalho consiste em propor um mecanismo de gerenciamento de *handoff* em cenários VANETs, visando garantir o QoS e QoE requeridos pelas aplicações de usuário.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo desta dissertação é propor um mecanismo inteligente de seleção de tecnologia de acesso a rádio sem fio em cenários VANETs com base nas informações de contexto da

rede e do veículo, com o intuito de garantir ao usuário a melhor conexão sem fio disponível e assegurar os níveis de QoS e QoE necessários para as aplicações.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um agente eficiente para a tomada de decisão de *handoff* vertical com base nas informações de contexto da rede e do veículo.
- Definir uma arquitetura SDN para o gerenciamento de mobilidade dos veículos e para o gerenciamento das decisões de *handoff*.
- Desenvolver um esquema com *multihoming* via SDN para garantir que o *handoff* ocorra sem causar interrupções na conexão do usuário.
- Empregar a técnica *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para compor o agente inteligente responsável pelo gerenciamento do *handoff*.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em 6 capítulos, dispostos da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta os conceitos intrínsecos às redes VANETs, protocolos e arquitetura geral dessa tecnologia. Também é detalhada a definição da rede LTE, bem como os componentes que formam sua arquitetura. É realizada uma explanação sobre o paradigma SDN, destacando o protocolo que é utilizado na sua aplicação. É feita a conceituação de *handoff*, pontuando suas variações e seus impactos na conexão do usuário. É feita também uma abordagem sobre a técnica de *multihoming*, elencando as principais vantagens da sua utilização no *handoff*. Por fim, é apresentada a técnica *Analytic Hierarchy Process* (AHP).

O Capítulo 3 expõe e discute os trabalhos relacionados que protagonizam os debates acerca do tema proposto.

O Capítulo 4 descreve a arquitetura da solução proposta, os elementos do sistema de decisão, a função de custo concebida e os detalhes da sinalização da solução.

O Capítulo 5 detalha as avaliações realizadas por meio de simulações com a ferramenta *Objective Modular Network Testbed in C++* (OMNeT++), especificando os cenários de simulação, os parâmetros das aplicações e os resultados obtidos com o mecanismo proposto.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas e as considerações finais do trabalho, elencando as contribuições alcançadas e apontando para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo será dado destaque às tecnologias que embasaram o desenvolvimento da proposta desta dissertação. O Capítulo está dividido em 6 seções. A Seção 2.1 trata sobre os conceitos gerais das VANETs, comunicação e os componentes arquiteturais de rede. A Seção 2.2 apresenta a tecnologia LTE, tocando nas suas características, na arquitetura de rede e abordando os fatores que fazem com que a tecnologia possa ser um integrante das redes veiculares. A Seção 2.3 expõe a definição de SDN, suas características, protocolo utilizado e a arquitetura geral. A Seção 2.4 detalha o conceito de *handoff*, destacando os motivos que geram esse fenômeno, as suas variações e os impactos que ele pode causar na conexão do usuário. A Seção 2.5 conceitua a técnica de *multihoming*, e aborda as vantagens do seu uso no procedimento de *handoff*. A Seção 2.6 apresenta a técnica AHP, que será utilizada como um dos componentes principais para as decisões de *handoff*. Por fim, a Seção 2.7 destaca as considerações finais sobre este Capítulo.

2.1 REDES VEICULARES *AD HOC* (VANETS)

As VANETs têm seu surgimento fundamentado em três campos: na necessidade de novas aplicações/serviços que facilitem as operações dos usuários, principalmente nos meios de transportes rodoviários. Nas amplas pesquisas sobre veículos autônomos. Por fim, na explosão de trabalhos científicos sobre IoT.

De forma geral, VANETs é um cenário de rede móvel onde os nós são veículos com conexão sem fio. Com o advento deste novo paradigma, assim como nas demais redes sem fio, surge também a necessidade de novos protocolos de comunicação, novas aplicações, arquiteturas e infraestruturas mais robustas entre outros desafios.

É interessante frisar que, com o aparecimento da IoT, surge também o conceito de Cidades Inteligentes (*Smart Cities*), cujo objetivo genérico é, através da tecnologia, melhorar a infraestrutura urbana e contribuir com a melhor vivência nos centros urbanos (PAUL; SARASWATHI, 2017). Nesse sentido, as VANETs se destacam como uma área de pesquisa promissora, bem como considerada uma infraestrutura catalisadora de soluções para, especialmente, a mobilidade urbana nas Cidades Inteligentes.

2.1.1 Características

É importante ressaltar que quando há referências ao modelo de comunicação definido para o ITS, a comunidade científica tem levado em consideração o conceito de VANETs como arquétipo para esse padrão (ULLAH et al., 2020); (VADHWANI; BUCH, 2019); (MUTALIK et al., 2016). Em VANETs são oferecidos serviços/aplicações que visam maior segurança, mobilidade e detecção de congestionamento, melhorando o dia a dia de seus usuários. Além

disso, as VANETs propiciam a execução de aplicações na *Internet*, por exemplo *streaming* de vídeo, jogos *online*, *downloads* de arquivos entre outros, por meio da conexão com as RSUs, que viabilizam a comunicação com a rede de dados externa (KUMAR et al., 2015).

Uma característica que é bastante peculiar às redes VANETs é o modelo de comunicação entre os nós que compõem a rede. Por ser uma rede *ad hoc*, nas VANETs os veículos podem manter conexões com outros nós e trocar informações através de enlaces diretos, bem como via múltiplos saltos. Desse modo, as VANETs podem operar em, basicamente, três tipos de comunicação:

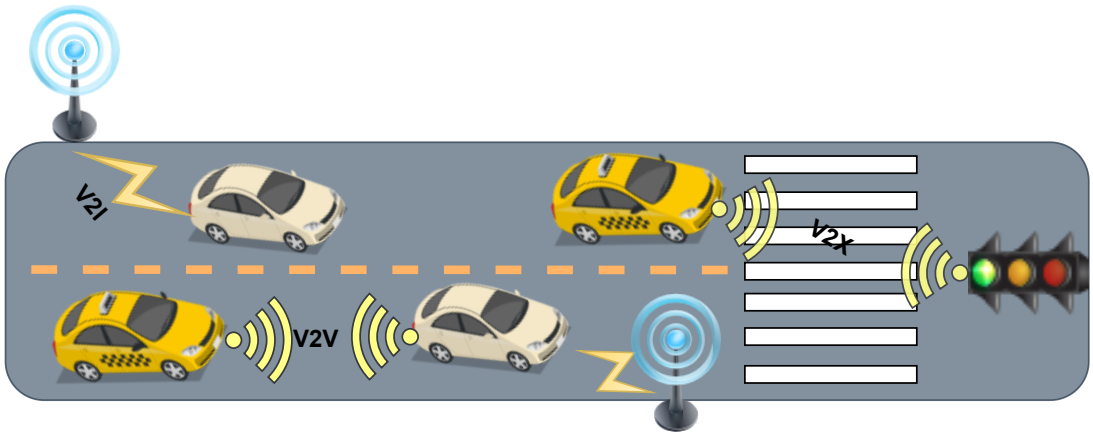
- ***Vehicle-To-Infrastructure*** **(V2I)**: Conhecida também como infraestruturada, neste tipo de comunicação os veículos trocam dados e informações com as RSUs, ou seja, pontos de acesso dispostos ao longo de uma via. Os veículos se comunicam com essas estruturas para obterem acesso ao serviço desejado, por exemplo a conexão com a *Internet*. A grande vantagem desse modelo é a possibilidade do veículo se conectar à diversas redes externas.

- ***Vehicle-To-Vehicle*** **(V2V)**: Conhecida também como comunicação *ad hoc*, nesse modelo todos os nós, isto é, os veículos, se comunicam diretamente entre si, desempenhando o papel de rotear o fluxo de dados para o devido emissor e receptor. Nesse caso, não há a necessidade de uma estrutura externa responsável pela troca de informações entre os veículos, ou seja, a comunicação é realizada exclusivamente entre dois terminais. Para que essa comunicação aconteça, cada veículo é equipado com uma *On Board Unit* (OBU) que se conecta à rede.

- ***Vehicle-To-Everything*** **(V2X)**: Este tipo de comunicação é tratada como híbrida, pois engloba as características dos modelos anteriores, além de possuir características próprias. A comunicação V2I será usufruída em sua totalidade dentro dos cenários de *Smart Cities*, onde um veículo poderá se comunicar com qualquer dispositivo em uma rodovia, por exemplo aos semáforos inteligentes ou aos *smartwatches* dos pedestres.

A Figura 1 ilustra os três tipos de comunicações presentes em um cenário de rede veicular.

Figura 1 – Comunicação em VANETs



Fonte: Elaborada pelo autor

Dados os vários tipos de comunicação que um veículo pode ter, é trivial inferir que qualquer nó poderá ser equipado com diversas interfaces de rede heterogêneas, por exemplo LTE, Wi-Fi e *Bluetooth*. Dessa forma, esse esquema possibilita que um veículo tenha acesso à diversas redes de dados externas, além de viabilizar a execução de serviços como obtenção de informações sobre condições da via, congestionamentos, acidentes, bem como aplicações de entretenimento.

2.1.2 O Padrão IEEE 802.11p

A pluralidade de aplicações *multimídia* tem aumentado significativamente ao longo da última década. O compartilhamento de imagens, vídeos, documentos, jogos, arquivos em nuvem, muito em função das redes sociais, têm exigido cada vez maior capacidade de processamento nos dispositivos móveis e, principalmente, nas redes de dados. Inevitavelmente, as VANETs terão que dar suporte ao processamento desse tráfego de dados.

Com o intuito de prover uma solução para essa problemática, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) desenvolveu um novo padrão pertencente à tecnologia IEEE 802.11 para prover o acesso sem fio em ambientes veiculares. O padrão IEEE 802.11p foi projetado como modelo de protocolo para as *Dedicated Short Range Communications* (DSRC), e possui um espectro na faixa de 5.9 GHz (BENKIRANE; BENAZIZ, 2018).

O IEEE 802.11p possui uma taxa de transferência de até 27Mbps (CAILEAN et al., 2014), prioriza fluxos de dados com tempo crítico na camada 2 e possibilita a comunicação entre terminais que viajam com uma velocidade de até 200Km/h (BENKIRANE; BENAZIZ, 2018). Desse modo, a tecnologia facilita a baixa latência e dá suporte a alta taxa de dados em comunicações de veículos com alta mobilidade. Nesse sentido, o padrão propicia o QoS necessário para a execução dos mais diversificados tipos de aplicações/serviços e para a troca de dados na intercomunicação V2X.

O IEEE 802.11p é a tecnologia sem fio de acesso à rádio mais popular para os ambientes VANETS. No entanto, outras tecnologias de rede sem fio também são candidatas para compor o cenário heterogêneo das redes VANETs. Por exemplo, a tecnologia LTE se apresenta como rede promissora para operar dentro de cenários veiculares.

2.2 A TECNOLOGIA *LONG TERM EVOLUTION* (LTE)

A rede LTE foi proposta/especificada pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) (ERGEN, 2008) como tecnologia de rede sem fio capaz de oferecer melhor serviço ao usuário concernente ao suporte para o tráfego do grande volume de dados com a *Internet*. A tecnologia utiliza o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) para *downlink* de arquivos, enquanto que para o *upload* é utilizado o *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA).

As vantagens em utilizar o OFDMA e o SC-FDMA consiste na facilidade de métodos de reutilização de frequência. Além disso, o emprego dessas técnicas possibilita o aumento do rendimento do sistema ao mitigar a aleatoriedade seletiva de frequência, isto é, a dispersão da frequência (ABU-ALI et al., 2014).

Em condições perfeitas, os picos de velocidade da taxa de dados do LTE podem chegar até 300Mbps para *download* e 75Mbps no *upload* (ERGEN, 2008), além de proporcionar maior estabilidade na taxa de transmissão de dados, se comparado com as redes anteriores à ela. Todavia, em cenários reais favoráveis, o LTE fornece uma taxa de dados de aproximadamente 100Mbps e 50Mbps para *download* e *upload*, respectivamente.

Segundo (CAO et al., 2014), o sistema LTE é projetado para ser uma tecnologia baseada em pacotes e com menos elementos de rede. Esse fato faz com que o LTE tenha maior área de cobertura, melhor desempenho no *throughput*, largura de banda flexível, baixa latência entre outros benefícios.

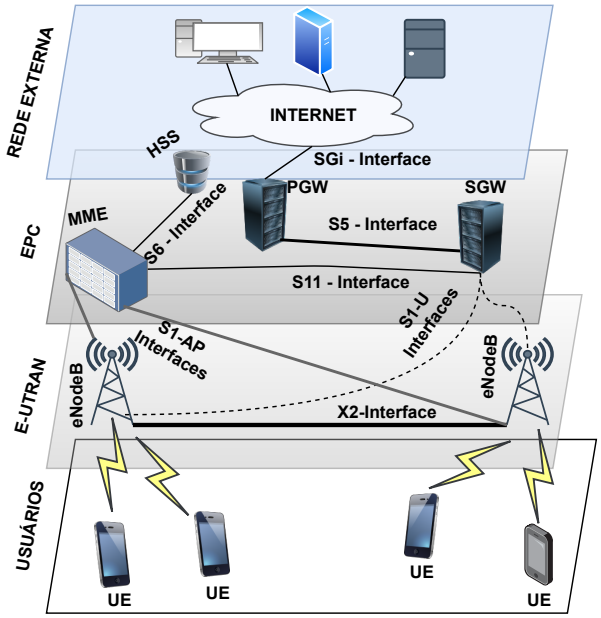
Segundo (CHANG; ABICHAR; HSU, 2010) uma aplicação de tempo real, por exemplo uma chamada VoIP, tolera atrasos que variam de 50ms a 200ms, e a rede LTE, em condições favoráveis, produz uma latência de até 30ms. Logo, a tecnologia LTE fornece uma infraestrutura robusta para a execução de aplicações em tempo real.

2.2.1 Componentes Arquiteturais

Partindo de uma visão holística, o sistema LTE é constituído basicamente pela rede de acesso *Evolved-Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), e pela rede de núcleo *Evolved Packet Core* (EPC). A rede de acesso é constituída pelas *Evolved Node B* (eNodeB) e pelos terminais finais, isto é, *User Equipment* (UE), e a rede de núcleo é composta pelo *Serving Gateway* (SGW), *Packet Data Network Gateway* (PGW), *Mobility Management Entity* (MME) e *Home Subscriber Server* (HSS). O EPC fornece conexão, por exemplo, para várias redes de acesso (HE; YAN; ATIQUZZAMAN, 2018), além

do controle de gerenciamento dos dispositivos móveis e o estabelecimento de fluxo *Internet Protocol* (IP) (GHAVIMI; CHEN, 2015). A Figura 2 exibe a topologia genérica do LTE.

Figura 2 – Topologia da rede LTE



Fonte: Elaborada pelo autor

A seguir, será feita uma breve descrição dos principais componentes arquiteturais do sistema e suas intercomunicações.

- **UE**: Trata-se do dispositivo móvel que o usuário utiliza para se conectar com a tecnologia sem fio.
- **eNodeB**: Estação base, conectada à rede de telefonia móvel, que se comunica diretamente com os dispositivos sem fio, ou seja, os UEs. É a eNodeB quem provê conexão para o UE à rede sem fio.
- **E-UTRAN**: É a rede de acesso à rádio, ou seja, a interface aérea do sistema LTE. O E-UTRAN é composto por várias eNodeBs, onde cada estação se conecta à outra por intermédio da interface X2.
- **MME**: É a entidade responsável pelo gerenciamento da mobilidade do usuário, funções de segurança, *handoff*, estabelecimento de conexões, *roaming* entre outras funções. Além disso, o MME é o elemento chave pertencente ao plano de controle para a rede de acesso.
- **SGW**: O SGW reside no plano de usuário, sendo encarregado pelo direcionamento de pacotes IP de usuários entre o LTE e outras redes de dados externas, como o 2G, 3G ou a *Internet*. Além de garantir a interoperabilidade da rede, o SGW atua

como um ponto de ancoragem de mobilidade para o *handoff* inter eNodeB local e mobilidade inter 3GPP.

- **PGW**: Basicamente, o PGW atua como um roteador de borda entre o EPC e uma rede externa, por exemplo a *Internet*.
- **HSS**: O HSS atua como um banco de dados para armazenar as informações relacionadas à autenticação do usuário na rede LTE, e atualizá-las quando necessário.

2.2.2 Sistema LTE como Tecnologia de Rede Sem Fio para Cenários VANETs

Em razão das vantagens e características do sistema LTE, a tecnologia tem sido pensada como um potencial integrante para a expansão de capacidade do processamento/gerenciamento de fluxo de tráfego em cenários de redes veiculares. Ressalta-se ainda que devido a taxa de dados no *download*, em cenários realísticos, ser de aproximadamente 100Mbps, e a latência de no máximo 30ms, a tecnologia propicia a QoS necessária para execução de aplicações em VANETs. Por fim, trabalhos como em (KONG et al., 2017) e (SHOKET; AULAKH, 2018), que envolve o LTE com VANETs, provêem um sistema de segurança que podem ser aplicados em uma rede de veículos conectados.

Vários trabalhos têm combinado o sistema LTE com as redes VANETs. Por exemplo, em (SYFULLAH; LIM, 2017) é proposto um sistema que combina o padrão IEEE 802.11p com a rede LTE para formar uma *Cloud*-VANET híbrida, cujo objetivo é diminuir a sobrecarga de rede com um gerenciamento de alta mobilidade e alta cobertura. Em (VINEL, 2012) é feita uma análise comparativa, por meio de modelos matemáticos, das tecnologias IEEE 802.11p e LTE para verificar a probabilidade de a entrega de *beacons* acontecer antes do *timeout* de entrega. O trabalho de (UCAR; ERGEN; OZKASAP, 2016) propôs uma arquitetura híbrida, o VMaSC-LTE, articulando o *multihop clustering* baseado no padrão IEEE 802.11p com a tecnologia LTE, cujo objetivo é alcançar um alto índice na taxa de dados de entrega de pacotes e baixa latência.

Portanto, há um consentimento na academia de que o sistema LTE pode ser utilizado como tecnologia de acesso a rádio em um ambiente veicular. O Quadro 1 resume as características que apontam a potencialidade do LTE em compor o cenário heterogêneo de conexão sem fio nas VANETs.

Quadro 1 – Características do LTE

Taxa de dados no *downstream*	Até 100Mbps em cenários realísticos
Taxa de dados no *upstream*	Até 50Mbps em cenários realísticos
Raio de cobertura	45Km com frequência na faixa de 700MHz
Latência	No máximo 30ms em situações favoráveis

Fonte: Elaborado pelo autor

2.3 REDES DEFINIDAS POR *SOFTWARE*

Com o passar dos anos as aplicações móveis têm se multiplicado e, com isso, o fluxo de tráfego nas redes sem fio e cabeadas tem aumentado exponencialmente. Com o aparecimento das chamadas redes sociais virtuais, o compartilhamento de arquivos de *mídia* em geral tem se intensificado cada vez mais, aumentando a carga de processamento e memória, e tornando o gerenciamento das tecnologias sem fio e cabeadas mais complexo.

Quando se atenta para as características dos dispositivos que compõe, principalmente, o núcleo de uma rede de dados, especialmente *gateways* e *switches*, fica mais clara a razão da grande complexidade de gerenciar todo o sistema, especialmente o encaminhamento de fluxo de dados. Geralmente, os comutadores do núcleo da rede são proprietários, e, em grande parte, são de código fechado ou, em outro termo, tem o seu *firmware* restrito. Esse fato acaba deixando o comportamento da rede limitado, já que, por vezes, a comunicação entre comutadores pode ser interrompida devido às particularidades de cada um.

O SDN surge como um novo paradigma de rede, cuja finalidade principal é separar o plano de controle de um dispositivo de rede do seu plano de dados, facilitando o controle de todo o sistema, seja ele sem fio ou cabeado. Toda política de segurança, fluxo de dados, roteamento e comunicação passa por um nó central chamado controlador. Este agente é responsável por gerenciar toda rede através de regras de encaminhamento injetadas nos dispositivos de núcleo, ou seja, ele instrui os comutadores sobre as ações que devem ser tomadas em relação ao tráfego de dados iniciado pelos usuários. Esse fato torna factível a programabilidade da rede, permitindo ao administrador, por exemplo, definir o comportamento dela.

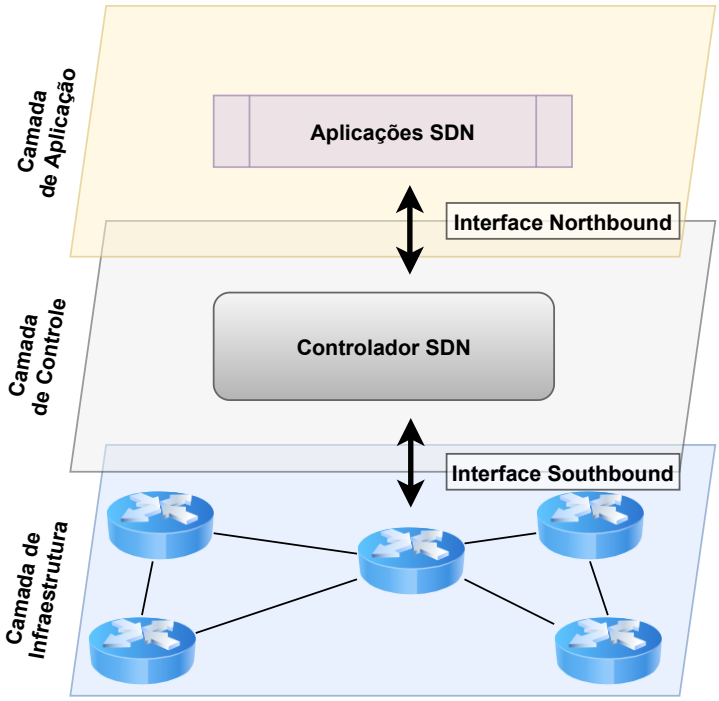
Uma das grandes vantagens do SDN em relação às redes tradicionais é a facilidade de desenvolvimento de aplicações de segurança, além de maior controle/gerenciamento do sistema, como já foi dito. No entanto, um dos fatores que dificulta a implantação total desse paradigma é o alto orçamento que ele demanda, fazendo com que empresas do setor fiquem relutantes em investir tempo e altos valores na instalação de uma infraestrutura do zero (AMIN; REISSLEIN; SHAH, 2018). Uma saída para essa problemática é a implantação de redes SDN híbridas, conforme discutido em (AMIN; REISSLEIN; SHAH, 2018), ou seja, implantar um número limitado de dispositivos SDN juntamente aos dispositivos tradicionais, levando a substituição gradativa dos comutadores usuais por equipamentos com suporte ao SDN.

Ao atentar para a arquitetura dos comutadores tradicionais, nota-se que esses dispositivos são constituídos, basicamente, por duas camadas. A camada de *firmware* é responsável por controlar as ações do *hardware* concernente ao encaminhamento de pacotes, ou seja, é o *firmware* quem decide para onde os pacotes devem ser direcionados. A camada de *hardware* se limita em apenas executar os comandos definidos pela camada mais acima. Em posição divergente, as arquiteturas SDN desacoplam essas camadas, tirando a inteligência do *firmware* e passando ao controlador central, tornando-se uma tendência emergente por

simplificar o gerenciamento complexo das redes tradicionais (YU et al., 2019).

Em uma rede SDN o controlador central tem a visão de todo o sistema, viabilizando o controle dos comutadores, por exemplo, através de encaminhamento de pacotes. Ademais, nestes dispositivos existem estruturas, chamadas tabelas de fluxo, onde as informações e regras injetadas pelo controlador são armazenadas. As tabelas de fluxo são utilizadas para encaminhar pacotes específicos para uma determinada porta, por exemplo. Este comportamento é definido pelo administrador da rede no controlador centralizado. A Figura 3 fornece uma visão arquitetural em camadas do paradigma SDN.

Figura 3 – Camadas SDN



Fonte: Elaborada pelo autor

Basicamente, o SDN possui três camadas, Camada de Infraestrutura, Camada de Controle e a Camada de aplicação.

A Camada de Infraestrutura, ou Plano de Dados, é composta pelos roteadores e *switches OpenFlow* que são os responsáveis pelo encaminhamento do fluxo de dados. A camada acima, Camada de Controle, ou Plano de Controle, é composta pelos controladores da rede, isto é, dispositivos encarregados de gerenciar toda a rede. É nesta camada onde é programada a maneira que o sistema deverá se comportar em situações específicas. Por exemplo, pacotes maliciosos presentes na rede, que não tiverem nenhuma especificação do controlador, poderão ser descartados pelos comutadores de forma instantânea.

A Camada de Controle se comunica com a camada mais baixa, Camada de Infraestrutura, através de sua interface *Southbound*, que pode ser, por exemplo, o protocolo *OpenFlow* (que será abordado em seguida). Além disso, a Camada de Controle se comu-

nica com a camada mais acima, Camada de Aplicação, através da interface *Northbound*, que geralmente é uma *Application Programming Interface* (API).

Por fim, a camada superior, Camada de Aplicação, como o termo sugere, refere-se às aplicações SDN que serão, em grande parte, executadas no controlador central. As aplicações são condições, regras e políticas definidas pelo administrador para a operação eficiente da rede. Essa estratégia com SDN, possibilita com que o administrador tenha controle e ciência do comportamento de todo sistema.

2.3.1 Protocolo *OpenFlow*

O *OpenFlow* é o protocolo padrão e mais popular, operante nas arquiteturas SDN. Foi projetado pela universidade de *Stanford* (MCKEOWN et al., 2008) e padronizado pela *Open Networking Foundation* (ONF). Devido à natureza da organização ONF, o protocolo foi disponibilizado de forma aberta, tornando viável seu uso em larga escala pela acadêmia e pela indústria.

O *OpenFlow* atende satisfatoriamente os preceitos definidos no paradigma SDN, pois garante a comunicação íntegra entre os dispositivos de núcleo e o controlador central. Por exemplo, quando chega um pacote em um comutador, este dispositivo dispara uma mensagem até o controlador, requerendo as ações que devem ser tomadas quanto ao encaminhamento do pacote. Essa ligação é feita via protocolo *OpenFlow*. Da mesma forma, quando o controlador envia regras ou instruções aos *switches*, a mensagem chega até os dispositivos através da comunicação *OpenFlow*.

O *OpenFlow* começou na versão 1.0, a partir de então, seis versões do protocolo foram desenvolvidas, encontrando-se atualmente na versão 1.6 disponível apenas para membros da ONF. A utilização de cada versão do protocolo depende muito da necessidade do projetista de rede e do cenário. O Quadro 2 apresenta um comparativo entre as características principais de cada versão do protocolo.

2.4 *HANDOFF*

Quando se trata das redes móveis sem fio, a primeira ponderação a ser feita é sobre a mobilidade do usuário. As redes móveis, como o próprio nome sugere, surgiram para dar praticidade ao usuário e, especialmente, facilitar a mobilidade deste, enquanto usufrui dos serviços disponibilizados pela tecnologia. Desse modo, nos sistemas sem fio o usuário tem a liberdade de se mover para qualquer lugar sem, necessariamente, está preso em uma conexão cabeada.

Contudo, mesmo com a viabilidade dessa vantagem, surge outro grande desafio, o gerenciamento da conexão dos nós perante sua mobilidade. Para que um terminal final possa ter comunicação com a rede, é necessário a presença de uma infraestrutura, ou ponto de acesso, que possa estabelecer a conexão do dispositivo com a tecnologia de acesso à

Quadro 2 – Comparação entre versões do *OpenFlow*

Principais Funcionalidades	**Versões do *OpenFlow***					
	v1.0	**v1.1**	**v1.2**	**v1.3**	**v1.4**	**v1.5**
FlowTables	Única	Várias	Várias	Várias	Várias	Várias
MPLS	**Não**	**Sim**	**Sim**	**Sim**	**Sim**	**Sim**
IPv6	**Não**	**Não**	**Sim**	**Sim**	**Sim**	**Sim**
Múltiplos Controladores	**Não**	**Não**	**Sim**	**Sim**	**Sim**	**Sim**
Group Table	**Não**	**Não**	**Não**	**Sim**	**Sim**	**Sim**
Meter	**Não**	**Não**	**Não**	**Sim**	**Sim**	**Sim**
Interfaces de fibra óptica	**Não**	**Não**	**Não**	**Não**	**Sim**	**Sim**
Engress Tables	**Não**	**Não**	**Não**	**Não**	**Não**	**Sim**

Fonte: (SILVA, 2018)

rádio. Quando um nó começa a se movimentar, ele acaba se afastando do seu ponto de acesso, ficando com uma qualidade de sinal ruim e necessitando que sua conexão seja transferida para a infraestrutura de comunicação mais próxima.

O *handoff* é o processo de transferência da sessão de dados ativa do dispositivo de uma antena de conexão para outra antena, mantendo a sessão ininterrupta (GODOR et al., 2015). O *handoff* é um procedimento fundamental nos sistemas sem fio, pois ele transfere a conexão do usuário de uma antena A para a antena B, por exemplo, sem findar a execução de aplicações.

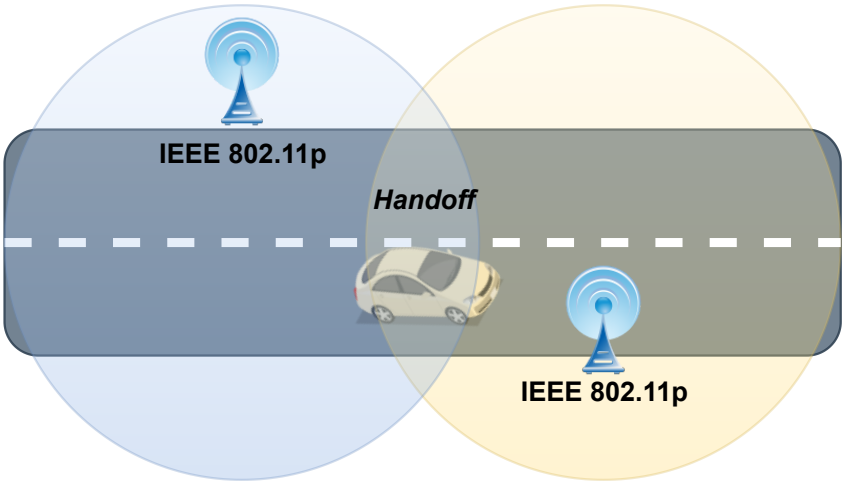
Quando se trata de ambientes veiculares, o desafio de garantir a qualidade do gerenciamento de *handoffs* é ainda maior, pois os veículos se movem em velocidades muito altas, podendo causar *handoffs* frequentes, originando atrasos no sinal e perda da comunicação (SALIHIN et al., 2018). Desta forma, uma das grandes dificuldades no gerenciamento de mobilidade em VANETs é prover o QoS necessário para execução de aplicações, como *streaming* de vídeo, durante o procedimento de *handoff*.

Segundo (TINKHEDE; INGOLE, 2014), o *handoff* pode ser classificado, quanto ao domínio, de duas formas:

- ***Handoff* Horizontal**: Ou *handoff* homogêneo, é o procedimento de transferência da sessão de dados entre duas torres da mesma tecnologia. Por exemplo, entre um ponto de acesso IEEE 802.11p e outro ponto de acesso também IEEE 802.11p. A Figura 4 expõe um cenário onde ocorre o *handoff* horizontal.

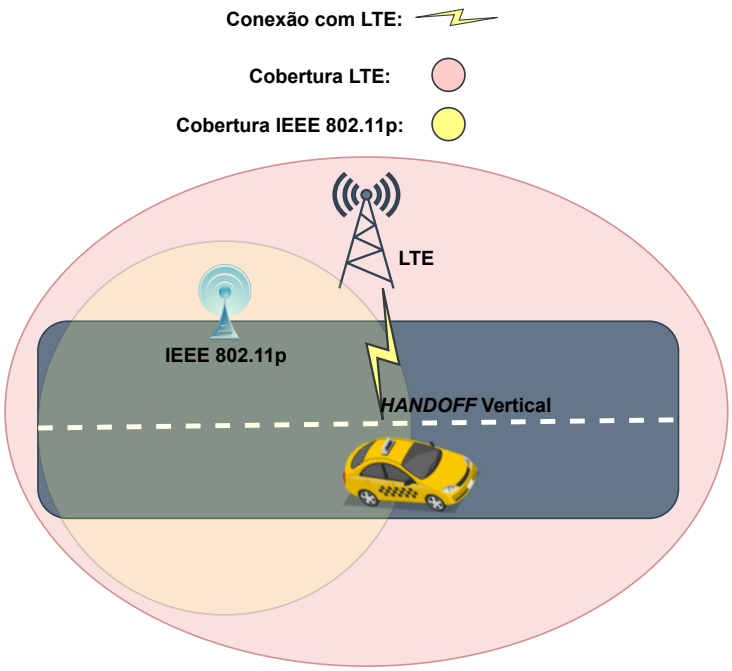
- ***Handoff* Vertical**: Ou *handoff* heterogêneo, é o procedimento de transferência da sessão de dados entre antenas de tecnologias diferentes. Por exemplo, entre uma eNodeB (LTE) e um ponto de acesso IEEE 802.11p. A Figura 5 apresenta um cenário típico do *handoff* vertical.

Figura 4 – Cenário de *handoff* horizontal



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5 – Cenário de *handoff* vertical



Fonte: Elaborada pelo autor

2.4.1 Impactos causados pelo *Handoff*

Devido à sua natureza, o *handoff* pode se tornar um processo custoso porque abrange tarefas complexas que podem originar quebras e degradações no desempenho de aplicações. Quando ocorrido em ambientes VANETs, o gerenciamento do processo se torna mais desafiador, pois o número de *handoffs* de um mesmo veículo pode se tornar maior. O grande interesse da comunidade científica é assegurar que a transição da conexão do nó entre estações rádio-base ocorra de modo transparente para o usuário.

Quando um veículo conectado está em movimento, sua mobilidade pode provocar o *handoff*. A seguir, são elencados alguns dos principais impactos ocorridos durante a execução do procedimento.

- **Interrupção da conexão do usuário**: Uma das etapas do *handoff* é processo de desconexão do antigo ponto de acesso e a ancoragem com a atual estação de conexão. Este fenômeno pode ocorrer de forma perceptível para o usuário.
- **Aumento das perdas de pacotes de aplicações em execução**: Durante a transferência de conexão alguns pacotes, assim que passam pelos comutadores de núcleo, podem ser perdidos na rede, pois poderão permanecer com o roteamento do caminho para o antigo ponto de conexão do *host*.
- **Queda no *throughput* das aplicações**: Durante o *handoff* ocorre a seleção de um novo ponto de acesso. Enquanto ocorre a desconexão com a antiga estação base e a conexão com a atual estação, por exemplo, o fluxo de tráfego de dados pode sofrer uma interrupção e ser reestabelecido para o atual ponto de acesso do *host*, causando uma queda no *throughput*.
- **Aumento no atraso de pacotes de aplicações em execução**: Quando o procedimento é desencadeado, os comutadores do núcleo atualizam suas tabelas de roteamento para encaminhar o tráfego de dados para o novo ponto de conexão. Se um pacote chegar ao comutador durante este processo, ele deverá aguardar até o momento de ser enviado, aumentando o seu tempo de encaminhamento.

2.5 *MULTIHOMING*

Comumente, um terminal final é conectado em apenas uma rede, isto é, por mais que possua uma interface de rede Wi-Fi e uma interface LTE, por exemplo, ele receberá/enviará dados por apenas uma rede de cada vez. No entanto, em algumas circunstâncias, por exemplo em transmissões de vídeo em tempo real ou chamada VoIP, é desejável que o *host* receba os dados por mais de uma interface para assegurar o bom desempenho dessas aplicações.

O *Multihoming* é uma técnica que consiste em conectar um computador, por exemplo, em mais de uma rede, ou seja, trata-se de um mecanismo que permite o usuário transferir/receber dados de forma automática, eficiente e simultânea através de duas ou mais interfaces de rede (FINLEY; BASAURE, 2018). Essa técnica é empregada geralmente para aumentar a taxa de transferência de dados do usuário, garantir a entrega de pacotes, assegurar QoS para execução de aplicações de tempo real e aumentar a confiabilidade da rede.

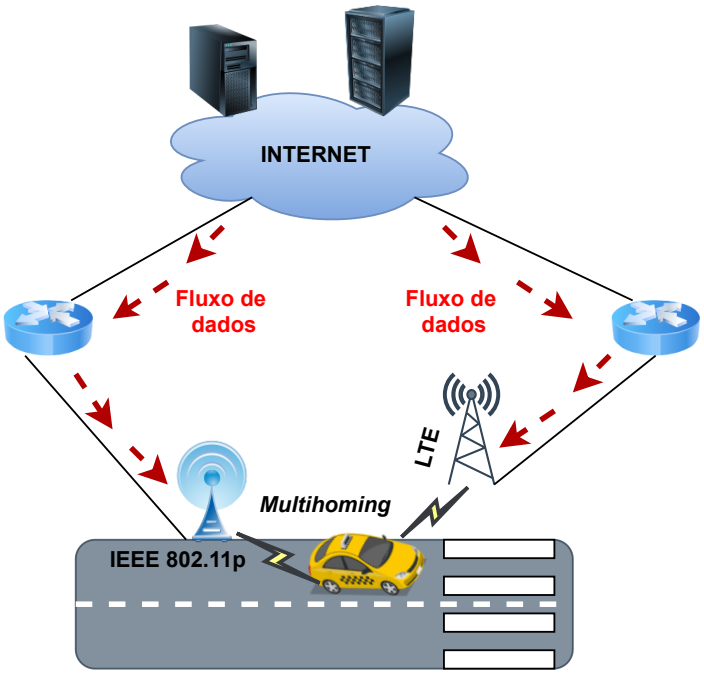
Outra vantagem acerca do emprego de técnicas de *multihoming*, é que se uma das interfaces de rede falhar, os dados poderão ser recebidos pela segunda interface, evitando

a queda de desempenho da aplicação. Além disso, com o *multihoming* é possível dividir o tráfego de dados entre duas ou mais redes, o ganho com essa estratégia é o balanceamento de carga do sistema (LEE et al., 2008), além de possibilitar o envio de uma porcentagem de pacotes pela melhor rede disponível.

O protocolo projetado para empregar o *multihoming* foi o *Stream Control Transmission Protocol* (SCTP). O SCTP é um protocolo da camada de transporte confiável padronizado pelo *Internet Engineering Task Force* (IETF) na *Request for Comments* (RFC) 2960 (IETF, 2000) e que estende as funcionalidades do *Transmission Control Protocol* (TCP) com entrega de dados orientado à mensagens por meio de conexão *full duplex*, mecanismos de controle de congestionamento e suporte para dispositivos com mais de uma interface de rede. Todavia, o SCTP não suporta a recepção/envio de dados por múltiplas interfaces, ele usa o *multihoming* apenas como serviço de backup, ou seja, quando um endereço IP fica inacessível, o SCTP tentará se recuperar enviando novos dados para um endereço IP secundário (WALLACE; SHAMI, 2011).

Para suprir a lacuna do SCTP, foi desenvolvida uma extensão para o protocolo, que permite o envio/recebimento de dados por múltiplos caminhos. O *Concurrent Multipath Transfer for Stream Control Transmission Protocol* (CMT-SCTP) (IYENGAR; AMER; STEWART, 2006) permite a distribuição de dados fim a fim entre vários caminhos em associação com o SCTP e possibilita o aumento da taxa de transferência de dados no lado do usuário. A Figura 6 mostra uma visão holística de uma rede com *multihoming*.

Figura 6 – Rede com *multihoming*



Fonte: Elaborada pelo autor

Com os benefícios e facilidades da técnica *multihoming*, é possível obter maior eficiência

no *handoff*, pois a técnica permite que um veículo, equipado com duas ou mais interfaces de rede sem fio, possa receber os dados pela rede LTE, enquanto faz o *handoff* na interface IEEE 802.11p, ou de forma inversa, por exemplo. Esse processo é conhecido como *handover seamless* (LABIOD; LIN; NONNI, 2010); (LEE; CHEN; SUN, 2014); (GUPTA; SINGH, 2019), ou *handoff* transparente, isto é, o veículo pode estar recebendo os dados do servidor por duas interfaces simultaneamente, e quando uma das redes do veículo sofrer o *handoff*, em razão da mobilidade do nó e degradação do sinal recebido, o tráfego poderá ser migrado para a conexão sem fio ativa, evitando a interrupção do fluxo de dados. Além disso, se um veículo estiver recebendo dados pelo IEEE 802.11p, e estiver na iminência de fazer *handoff*, automaticamente sua interface LTE poderá ser ativada e o tráfego migrado para ela.

2.6 *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS* (AHP)

O AHP é um método analítico multicritério criado por *Thomas Saaty* em 1970 (SAATY, 1988) que usa um processo de ponderação aditiva, no qual vários atributos relevantes são representados por sua importância relativa (CHOU et al., 2013). O AHP ajuda estruturar, organizar, analisar e tomar decisões de grande complexidade através de princípios matemáticos.

O método apresenta um processo inteligível e lógico para estruturar problemáticas de decisão, representando e quantificando elementos pertencentes à natureza do problema. Com isso, o AHP fornece um suporte robusto para tomadas de decisão que envolvem múltiplos fatores determinísticos para o resultado.

Uma das vantagens do AHP é que ele permite a inclusão de variáveis mensuráveis tanto de forma quantitativa como qualitativa, permitindo a análise e comparação rápida de possíveis resultados. Este fato serve como apoio para a redução de falhas, principalmente em sistemas críticos.

Em razão do seu modelo criterioso de definição de um problema, o AHP é muito utilizado na acadêmia, na indústria, na área da saúde, no agronegócio entre outros. Especificamente na área computacional, a técnica é bastante utilizada como componente para a composição de soluções em cenários complexos como em (LI et al., 2019); (SARASWAT; CHAURASIA, 2013); (XIN et al., 2019).

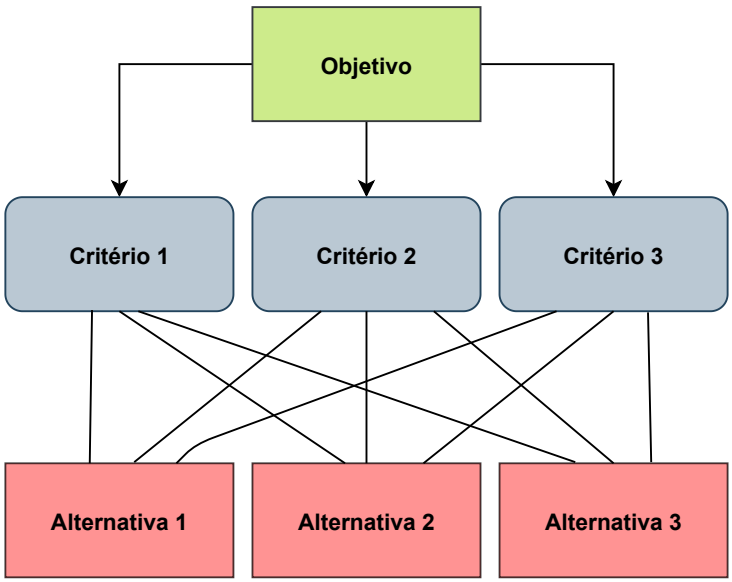
Para modelar uma problemática utilizando o AHP, primeiro deve-se identificar os elementos de entrada do sistema, ou seja, as variáveis, que serão processadas nos julgamentos para compor a decisão mais apropriada. A significância/importância de cada elemento é definida pelos tomadores de decisão. Em sequência, os tomadores de decisão ponderam sobre suas preferências de saída, isto é, qual alternativa é melhor perante os elementos de entrada. Os elementos são comparados entre si, e o resultado é registrado em uma matriz, cujo julgamento é feito através de seus autovalores. Se cada elemento da matriz tiver a mesma importância após os julgamentos, então o valor 1, que é a razão de coerência, será

atribuído para todos os elementos, significando que todos têm igual importância. Se um elemento X, por exemplo, for mais importante que o elemento Y, então será definido um valor dentro da escala de 1 a 9 para representar o quanto o elemento X é mais importante que Y. A Figura 7 ajuda a compreender de forma visual o processo do AHP.

Para solucionar uma problemática com AHP, deve-se estruturar o problema em níveis. O primeiro nível é o objetivo a ser alcançado. O segundo nível é a definição dos critérios que devem ser levados em conta para obter o resultado final, ou seja, cada critério terá um papel influenciador na decisão final. Por fim, o último nível são as alternativas para a tomada de decisão, isto é, com base nos critérios definidos, várias alternativas serão possíveis para solucionar a problemática.

Após a estruturação do problema, é necessário realizar o cálculo do peso de cada atributo do segundo nível, ou seja, ponderar numericamente o grau de importância de cada critério. O Quadro 3 apresenta os valores do grau de importância para cada critério.

Figura 7 – Estruturação de problema com AHP



Fonte: Elaborada pelo autor

Em função da sua estrutura e do seu processo enxuto, que possibilita conclusões de forma ágil, o AHP se mostra uma ferramenta promissora para auxiliar as tomadas de decisão de *handoff* em redes veiculares, pois ele possibilitará a tomada de decisão em tempo hábil. Tratando-se especialmente de redes sem fio altamente dinâmicas, a decisão de *handoff* deve ser um processo instantâneo e preciso para que as aplicações do usuário não percam desempenho, seja em razão da degradação do sinal, ou na quantidade de *handoffs* desnecessários.

Quadro 3 – Graus de importância no julgamento com AHP

Grau de Importância	**Definição**
1	Iguais em importância
2	Intermediário
3	Importância moderada
4	Intermediário
5	Mais importante
6	Intermediário
7	Muito mais importante
8	Intermediário
9	Extremamente mais importante

Fonte: Elaborado pelo autor

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo fez uma breve explanação dos principais conceitos que embasam o desenvolvimento da proposta desta dissertação. Inicialmente, foram abordadas as principais conceituações relacionadas as VANETs, destacando, especialmente, os seus tipos de comunicações. Em seguida, a arquitetura, características e os benefícios da tecnologia LTE foram discutidos, enfatizando sua adoção em cenários de redes veiculares. O Capítulo discutiu também o paradigma SDN, destacando suas vantagens, arquitetura, protocolo e sua adoção em VANETs. A definição de *handoff*, suas variações, impactos e desafios, especialmente em um cenário de rede de veículos, também foram tratados neste Capítulo. Além disso, foi efetuada a conceituação da técnica de *multihoming*, dando destaque para suas vantagens e praticidade, especialmente no seu emprego na seleção de rede como suporte para garantir o *handoff* transparente. Por fim, foi feita uma apresentação sucinta da técnica AHP como elemento pertinente para auxiliar a tomada de decisão do *handoff*.

3 ESTADO DA ARTE

Este Capítulo tem por objetivo discutir os principais trabalhos identificados na literatura que estão relacionados ao *handoff* em redes VANETs.

3.1 MECANISMOS DE *HANDOFF* PARA VANETS

Em (SMIDA; FANTAR; YOUSSEF, 2018) os autores propuseram um mecanismo de *handoff* vertical, denominado *Link Quality and QoE aware Predictive Vertical Handoff* (LQPVH), que se baseia em um método que prevê a qualidade de *link* entre a RSU e o veículo. A estratégia do trabalho consiste em realizar o *handoff* vertical de camada cruzada através de um modelo analítico preditivo que leva em consideração, como parâmetros de decisão, a qualidade de *link* das RSUs e os parâmetros de QoE da aplicação. Com essa estratégia, os autores almejam diminuir o tempo de *handoff* e melhorar o QoE do vídeo, minimizando o tempo de interrupção do *streaming*, durante o procedimento.

A abordagem feita em (SMIDA; FANTAR; YOUSSEF, 2018) tem relevância para o campo das VANETs, pois propõe um arcabouço baseado na predição em que o veículo irá sofrer o *handoff*, mitigando os impactos na aplicação do usuário. Contudo, a intenção dos autores é minimizar o tempo de interrupção do *streaming*, quando o desejável é que não haja interrupções na aplicação em execução. Um esquema com *multihoming*, por exemplo, garantiria o *handoff* transparente e evitaria interrupções no *streaming* de vídeo.

Com o intuito de melhorar a qualidade de um *streaming* vídeo baixado por um veículo em movimento, em seu trabalho anterior (SMIDA; FANTAR; YOUSSEF, 2017) propuseram um mecanismo de *handoff* preditivo que leva em consideração as informações de contexto sobre a qualidade de *link* de uma RSU, o valor do *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), a velocidade e posição do veículo. Os autores utilizaram como RSUs os pontos de acesso IEEE 802.11p para fornecer conexão sem fio aos veículos, e empregaram uma arquitetura *cloudlet* para diminuir o tempo de *download* do vídeo. A utilização de informações de contexto da rede e do usuário, isto é, o veículo, é vital para projetar um esquema de seleção de rede eficiente, principalmente em VANETs onde a mobilidade é um fator determinante.

Todavia, os autores não consideraram nenhum esquema, como o *multihoming*, para prover o *handoff* transparente, com o intuito de assegurar o QoS e evitar interrupções na conexão do nó, mantendo o desempenho da aplicação de usuário. Além disso, os autores não adotaram um cenário heterogêneo de redes sem fio como IEEE 802.11p e LTE, fator característico das VANETs. A adoção de duas ou mais redes possibilita o usuário usufruir da melhor tecnologia sem fio, sem ficar refém de apenas uma rede.

Com o intuito de prover comunicação contínua entre veículo e infraestrutura, isto é, em um comunicação V2I, (GHOSH et al., 2015) proporam um esquema de *handoff* baseado

em uma abordagem de cobertura probabilística. Os autores admitiram três parâmetros como informações de contexto para o *handoff*, a saber: *Time Before Vertical Handover* (TBVH), que é o tempo em que o *handoff* deve ocorrer, *Network Dwell Time* (NDT), que é o tempo que nó permanece na rede, e a velocidade do veículo. Os autores mostraram a importância de considerar, principalmente, o TBVH e NDT no processo, argumentando que seria menos complexo prever o momento em que o veículo fosse mudar de célula de cobertura, e utilizaram um esquema com rede de filas para evidenciar essa alegação. Levar em conta o TBVH e NDT, ou seja, o cálculo probabilístico da duração de *handoff* e do tempo que o usuário fica na rede conforme sua mobilidade, são fatores pertinentes para garantir o bom desempenho na seleção de redes. Contudo, não admitir as informações de contexto da rede, como a potência de sinal ou qualidade de *link*, é um fator que afeta de forma negativa a eficiência do mecanismo desenvolvido pelos autores, pois a qualidade da rede influência diretamente no QoS (atraso fim a fim, *jitter*, taxa de dados enviados/recebidos) de aplicações.

Ademais, (GHOSH et al., 2015) não levaram em consideração o fato de um ambiente de redes veiculares ser um cenário heterogêneo de conexão sem fio, ou seja, o usuário ficará dependendo apenas de uma rede, o IEEE 802.11p por exemplo, e, caso essa rede falhe, ou apresente um nível de *overhead* muito alto, as aplicações/serviços seriam degradadas.

Em (SKONDRAS et al., 2017) foi apresentado um esquema de *handoff* vertical para otimizar o gerenciamento da mobilidade dos veículos para sistemas *Vehicular Cloud Computing* (VCC). Para a implementação do esquema, os autores assumiram um cenário heterogêneo sem fio composto pelas tecnologias LTE e IEEE 802.11p. Os autores consideraram o *Received Signal Strength* (RSS), a velocidade dos veículos e o serviço oferecido pela rede (atraso fim a fim, *jitter*, taxa de dados enviados/recebidos e perda de pacotes) como informações de contexto, da rede e do usuário, para apoiar as decisões de disparo do *handoff*. Na proposta, os autores configuraram os veículos para terem sempre a melhor conexão entre as redes disponíveis baseada no RSS. Esta abordagem pode aumentar o desempenho do *handoff*, pois o mecanismo se certificará que os veículos sempre estarão com a melhor conexão.

Os objetivos principais dos autores são a redução do custo das operações, a melhoria do gerenciamento da mobilidade do usuário e a garantia da melhor conexão aos veículos. Porém, por mais que (SKONDRAS et al., 2017) tenham esquematizado um cenário heterogêneo para que o veículo tenha sempre a melhor conexão, o tráfego na rede ainda ficará engessado porque o fluxo de dados ficará exclusivamente dependente do conhecimento de cada comutador em relação para qual destino encaminhar os pacotes. Esse fato pode gerar vários pontos de *overhead* na rede. A adoção de uma arquitetura com SDN evitaria o congestionamento no núcleo, pois o controlador, em razão da sua visão global, poderia precisamente escolher o melhor caminho para que os dados pudessem trafegar. Além disso, os autores não mencionam nenhum esquema de chaveamento entre as redes, para

que, caso uma delas falhe, os dados sejam migrados para a outra.

Com o intuito de prover o *seamless handoff*, (GOUDARZI et al., 2018) propuseram um mecanismo de *handoff* vertical inteligente para fornecer QoS para os serviços móveis em redes veiculares. Os autores modelaram um agente de decisão com base em otimização em biogeografia e Cadeias de Markov. Na pesquisa, os autores utilizaram métodos probabilísticos para calcular a probabilidade de um nó mudar de célula, além de considerarem um cenário heterogêneo de tecnologias *wireless* composto pelo *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMax), *Third Generation* (3G) e Wi-Fi.

Para que os autores pudessem alcançar seus objetivos, eles adotaram a geolocalização do veículo, a largura de banda da rede, a latência da rede, a perda de pacotes e o *throughput* como informações de contexto relevantes para o *handoff*. A técnica utilizada por (GOUDARZI et al., 2018) baseada na probabilidade em que o veículo mudará de rede é oportuna para tornar eficiente decisões de *handoff* em redes VANETs. No entanto, os autores não levaram em consideração a velocidade do veículo, elemento vital para decisões de *handoff* em ambientes altamente dinâmicos. Além disso, por mais que os autores tenham esquematizado um ambiente com múltiplas conexões sem fio, eles não implementaram um esquema com *multihoming* no cenário para, de fato, assegurar o QoS das aplicações no momento da ocorrência do *handoff*.

Em (LIN; LIN, 2011) foi apresentado um mecanismo de *handoff* baseado na potência de sinal da RSU. Os autores idealizaram um transceptor que faz uma estimativa de máxima verossimilhança na camada física (PHY) do IEEE 802.11p, com o intuito de garantir maior eficiência do *handoff* nessa rede. A proposta tem contribuição para a composição de um mecanismo eficiente. No entanto a adoção de apenas uma métrica como elemento de decisão, que é a potência de sinal, não trará benefícios para o QoS no lado do usuário. As VANETs são redes altamente dinâmicas, ou seja, no momento da seleção de rede vários fatores estarão envolvidos, além da potência do sinal, principalmente a velocidade e posição do veículo, que caracterizam a mobilidade veicular. Além disso, o desprezo do cenário heterogêneo não possibilitará a eficiência no QoS dos serviços executados pelo usuário, pois ele ficará dependendo de apenas uma conexão sem fio e, se essa conexão falhar ou tiver um alto nível de *overhead*, a aplicação executada perderá desempenho.

Em (HASSOUNE; MAAZA; SENOUCI, 2017) foi apresentada uma estratégia de *handoff* vertical para VANETs cujo objetivo é diminuir a quantidade de transferências desnecessárias e evitar o efeito *ping-pong* que o veículo venha sofrer em uma rodovia. Segundo os autores, a estratégia desenvolvida estabiliza o desempenho de aplicações de *streaming multimídia* ao evitar *handoffs* desnecessários. Os autores apresentaram um modelo analítico que calcula o tempo que um nó leva para atravessar a área de cobertura de sua RSU. Além disso, o mecanismo leva em consideração a velocidade do veículo, densidade, *jitter* da rede e localização do veículo como informações de contexto para a tomada de decisão do *handoff*. A estratégia do trabalho é interessante, pois considera aspectos tanto da rede

como do usuário para a tomada de decisão do *handoff*, principalmente a velocidade e localização do veículo e densidade da rede, informações relevantes em redes veiculares.

Contudo, o esquema não considera a potência de sinal das RSUs, elemento primordial da rede, como parâmetro de decisão. Além disso, por mais que o mecanismo desenvolvido fosse para cenários heterogêneos, (HASSOUNE; MAAZA; SENOUCI, 2017) simularam apenas um cenário com a tecnologia IEEE 802.11p, sem considerar outra tecnologia de acesso à rádio. Por fim, o trabalho não aplica um esquema, como o *multihoming*, para assegurar o *handoff* transparente, evitando, assim, interrupções na conexão do usuário.

Visando aumentar o tempo de conectividade do veículo, a redução da taxa de falha do *handoff* e a redução de transferências desnecessárias, (EVANGELINE; KUMARAVELU, 2017) propuseram uma estratégia de *handoff* vertical para VANETs. O esquema dos autores considerava apenas o *Received Signal Strength Indication* (RSSI) das RSUs como informação de contexto, e, a partir do RSSI, era calculado o tempo de viagem do veículo para auxiliar o processo de decisão.

A proposta de (EVANGELINE; KUMARAVELU, 2017) tem um lado vantajoso, que é a redução da quantidade de vezes que o *handoff* falha, fator essencial para garantir o bom desempenho de aplicações e serviços em VANETs. Entretanto, aumentar o tempo de conectividade dos veículos pode afetar negativamente o QoS das aplicações, pois o veículo pode permanecer por muito mais tempo com uma conexão de baixa qualidade com a rede. Embora os autores tenham projetado o mecanismo para um ambiente heterogêneo, não especificaram quais tecnologias sem fio foram adotadas para compor o cenário. Além disso, a estratégia proposta não garante o *handoff* transparente.

A proposta feita por (SAAFI; HAMOUDA; KALLEL, 2018) é uma estratégia de decisão de *handoff* baseada em técnicas de ponderação subjetiva e objetiva. Os autores combinam as técnicas AHP e Entropia para melhorar a inteligência baseada em *Multiple Attribute Decision Making* (MADM) e, assim, compor um novo agente inteligente responsável pelas as decisões de *handoff*, denominado eMADM. O eMADM leva em consideração o QoS do serviço *multimídia* (*throughput*, atraso de pacote e *jitter*) e a velocidade do veículo como parâmetros para o sistema de decisão.

A intenção do trabalho é reduzir atraso de pacotes e *jitter*, e estabilizar o *throughput* dos serviços durante o *handoff*. O mecanismo proposto por (SAAFI; HAMOUDA; KALLEL, 2018) é pertinente pois envolve técnicas de ponderação, o AHP e Entropia, ou seja, são ferramentas que auxiliam em uma tomada de decisão instantânea, o que é bastante desejável, principalmente em redes altamente dinâmicas. Porém, por mais que os autores considerem um cenário heterogêneo composto pelo LTE e pelo IEEE 802.11p, o trabalho não emprega nenhuma técnica de *multihoming* para garantir o *handoff* transparente e, assim, assegurar o QoS exigido pelos serviços durante o processo. Ademais, o gerenciamento da rede, concernente ao encaminhamento do fluxo de dados entre as tecnologias, fica restrito ao conhecimento que os comutadores têm dos enlaces vizinhos.

A proposta feita por (WANG et al., 2014) é a criação de um mecanismo de *handoff* vertical baseado em árvore de decisão de auto-seleção para redes veiculares. Os autores desenvolveram uma distribuição de probabilidade baseada no RSSI, na taxa de transmissão, taxa de erro de *bit* (BER), como informações de contexto das redes sem fio, e tendência de movimento, como informação de contexto do *host*, para alimentar a árvore de decisão e, dessa forma, disparar o *handoff*. Além disso, os autores desenvolvem um modelo matemático que compõe o sistema de *feedback* do veículo em relação ao seu *handoff* anterior, para que a próxima transferência seja otimizada. O cenário do trabalho em questão considerou o *handoff* entre as tecnologias IEEE 802.11p, WiMAX e 3G. O objetivo da proposta é reduzir o tempo de *switching*, garantir a taxa de atualização da rede e prover QoS para os serviços executados pelos usuários.

A proposta de (WANG et al., 2014) é pertinente para redes veiculares, pois a inteligência é composta por uma distribuição de probabilidade que modela as informações de contexto da rede e do veículo, e alimenta árvore de auto-seleção, tornando o mecanismo consistente. Além disso, o esquema de *feedback* proposto pelos autores é relevante para análise de *handoffs* anteriores, com o intuito de melhorar *handoffs* futuros. Todavia, os autores não empregam o *multihoming* no cenário heterogêneo para garantir o *handoff* transparente e, assim, assegurar o bom desempenho das aplicações em execução. Ademais, sem a utilização do SDN, o gerenciamento da rede se torna engessado, isto é, limitando o comportamento do sistema, em relação ao reencaminhamento do fluxo de dados, quando alguma das tecnologias falhar ou apresentar vários pontos de congestionamentos.

3.2 MECANISMOS DE *HANDOFF* COM SDN PARA VANETS

Em (DUO et al., 2018) foi apresentado um mecanismo de *handoff* vertical baseado em SDN para suportar um ambiente veicular dinâmico. Como o SDN provê maior flexibilidade, escalabilidade e programabilidade da rede, os autores aplicaram esse paradigma no mecanismo para manter a conexão na camada de transporte inalterada durante o processo. Os autores consideraram as tecnologias IEEE 802.11p e LTE como redes de conexão sem fio para os veículos.

O emprego do SDN para compor mecanismos de *handoff* é uma técnica promissora para ambientes VANETs, pois o SDN possibilita o controle de toda rede, ou seja, em casos de desconexão ou *overhead*, o redirecionamento do tráfego para caminhos livres evitará que pacotes sejam perdidos, devido à programabilidade do sistema. Embora a aplicação do SDN por (DUO et al., 2018) possa facilitar o gerenciamento da rede e, consequentemente, das tomadas de decisão de *handoff*, os autores não consideraram informações de contexto da rede, como potência do sinal, e nem informações do veículo, como velocidade.

A literatura defende que a melhor forma para haver o *handoff* eficiente, é desenvolver o mecanismo para garantir a continuidade da conexão na camada física da rede. Os autores,

porém, desenvolveram a estratégia para garantir a continuidade da conexão na camada de transporte.

Os autores em (RIZVI; AKRAM, 2018) desenvolveram uma estratégia de *handoff* baseada na interface X2 do LTE, ou seja, eles empregaram a tecnologia LTE como rede sem fio para os veículos. A proposta considera um ambiente VANETs onde o mecanismo atua sob a gerência de uma rede SDN. A ideia de aplicar o SDN para gerenciamento do *handoff* é uma técnica interessante porque expande a programabilidade da rede, possibilitando o sistema adotar outros comportamentos de forma a não prejudicar o QoS das aplicações.

Os objetivos principais dos autores são diminuir o tempo de preparação para o *handoff* e diminuir o tempo de entrega. Além disso, o trabalho buscou manter íntegra a taxa de dados do usuário durante a preparação e conclusão do processo. Todavia, os autores não especificaram quais parâmetros foram utilizados para a tomada de decisão, realizaram o *handoff* somente na tecnologia LTE, desprezando o IEEE 802.11p que é a tecnologia sem fio padrão para VANETs, e não mencionaram qual tipo de inteligência foi implementada para a decisão de transferência. Por fim, os autores não esquematizaram uma estratégia com *multihoming* para assegurar o *handover seamless*.

Em (HE et al., 2018) foi desenvolvido um esquema de seleção dinâmica de rede que reutiliza parte das tabelas de fluxo dos *switches* para reduzir o custo de sinalização e diminuir o atraso de *handoff*. Os autores criaram o *framework* SDVMM que aplica a arquitetura SDN em redes VANETs, e projetaram o mecanismo de *handoff* no *framework*. O parâmetro de decisão utilizado no esquema foi a velocidade do veículo, e o mecanismo foi inserido no controlador central da rede.

O objetivo da proposta é mitigar o custo de sinalização, reduzir a latência do *handoff* e diminuir a taxa de perda de pacotes da aplicação do usuário. A abordagem de (HE et al., 2018) pode ser proveitosa, pois o sistema de decisão foi inserido no controlador da rede, e isso facilita o gerenciamento de seleção de redes porque o controlador tem a visão geral de todo o sistema. Porém, os autores não consideraram a potência de sinal, elemento vital para os processos de *handoff*, das RSUs como parâmetro de decisão e não admitiram um ambiente heterogêneo de conexão sem fio para os veículos, podendo causar degradações nas aplicações se caso a rede venha a falhar ou apresentar vários pontos de congestionamento. Ademais, a arquitetura proposta pelos autores não aplica uma estratégia de *multihoming* para assegurar que o processo de seleção de rede não cause interrupções na conexão do usuário.

Em (HUANG et al., 2017) os autores apresentam o *Offloading with Handover Decision based on Software Defined Network* (OHD-SDN), onde as decisões de *offloading* e *handoff* são gerenciadas no controlador da rede. No OHD-SDN, o controlador central utiliza a velocidade, localização e direção do veículo, e a localização das RSUs como parâmetros para o sistema de decisão. A ideia é prever quando o veículo irá fazer o *handoff* para, então, acionar as políticas de *offloading*, ou seja, o controlador analisa se o veículo deve

fazer o *offloading* antes do *handoff* ou se deve aguardar a transferência da conexão.

Através de um cálculo analítico, o controlador consegue estimar o momento em que o veículo irá sofrer o *handoff* e quanto tempo durará o processo para, então, decidir se o *offloading* deve ou não acontecer. Embora os autores tenham considerado um ambiente heterogêneo com as tecnologias 4G e IEEE 802.11p, acabaram desprezando a potência de sinal da rede como parâmetro para realizar o *handoff*. Os autores também não mencionam um esquema com *multihoming* para prover o *handoff* transparente.

O *framework* NS-V2X com arquitetura SDN para redes VANETs foi proposto por (MOUAWAD; NAJA; TOHME, 2019) com o intuito de balancear a carga da rede e reduzir o número de *handoffs* desnecessários. Os autores elaboraram um cenário rede veicular heterogêneo, onde os veículos têm a disposição as tecnologias sem fio IEEE 802.11p e LTE. Para alimentar o sistema de decisão, foram levados em consideração a direção do veículo e a qualidade de sinal das antenas como informações de contexto.

O NS-V2X emprega a função Sigmóide juntamente com a Teoria de Jogos para compor o agente inteligente encarregado de disparar o *handoff*. Quando a degradação do sinal recebido pelo veículo é detectada, o controlador, executando o agente inteligente, busca novos pontos de conexão, de acordo com a direção do carro, para fazer o *handoff*.

A abordagem de (MOUAWAD; NAJA; TOHME, 2019) é interessante para composição de sistemas inteligentes para *handoff*, pois combina a função Sigmóide com a Teoria de Jogos. Porém, os autores não especificam se o NS-V2X é capaz de realizar o *handoff* vertical, ou seja, a transferência da conexão do veículo entre as tecnologias IEEE 802.11p e LTE. Além disso, o trabalho não garante o *handoff* transparente, para garantir o QoS necessário para execução de aplicações no momento da transferência da conexão.

3.3 *HANDOFF* COM *MULTIHOMING* EM VANETS

Em (CASTRO et al., 2017) foi desenvolvido um gerenciador de *uplink* para redes VANETs que provê o *multihoming*, facilitando a diferenciação de tráfego, viabilizando o balanceamento de carga e aumentando o desempenho da rede. Os autores utilizam um esquema com N-PMIPv6, isto é, o PMIPv6 adaptado para redes veiculares, para fazer a seleção de rede e para realizar o *multihoming* do tráfego *uplink*. Os autores fazem a diferenciação de tráfego no *gateway* móvel presente na OBU dos veículos, ou seja, o mecanismo utiliza a rede Wi-Fi para rotear o tráfego dos sensores do carro, e a rede IEEE 802.11p para rotear o tráfego de usuários.

O mecanismo proposto por (CASTRO et al., 2017) se mostra viável para equilibrar a carga na rede, pois usa um cenário heterogêneo de conexão sem fio e realiza a diferenciação do tráfego de dados. Entretanto, o gerenciamento/comportamento da rede ficará restrito ao conhecimento limitado dos comutadores em relação ao sistema, isto é, os comutadores poderão rotear o tráfego de dados por caminhos congestionados. Portanto, o emprego do SDN facilitaria a programabilidade da rede, expandindo o seu comportamento.

A estratégia apresentada por (LOPES; LUÍS; SARGENTO, 2019) consiste em dividir o tráfego de transmissão de vídeo no *downlink* de forma que os *frames* críticos possam ser enviados pelo caminho mais confiável, evitando a degradação da aplicação em razão da má qualidade do sinal da RSU. Os autores adicionaram um gerenciador de mobilidade entre a rede externa, onde reside o vídeo para ser transmitido, e a rede VANETs para ter conhecimento da localização do nó. No gerenciador de mobilidade, foi desenvolvido um processador de seguimento de vídeo responsável por reconhecer os *frames* críticos e definir para qual caminho/RSUs eles deveriam ser enviados. O trabalho utiliza o *NEMO-enabled Proxy Mobile IPv6* (N-PMIPv6) acrescido do processador de seguimento de vídeo para fazer o *multihoming*.

O trabalho de (LOPES; LUÍS; SARGENTO, 2019) tem relevância para o *multihoming* em VANETs porque faz a diferenciação do tráfego de vídeo em nível de *frames*, ou seja, os *frames* críticos e vitais são enviados sempre pelo caminho mais confiável. Contudo, os autores não especificam a técnica utilizada para o veículo realizar o *handoff* entre as RSUs. Além disso, o trabalho não propõe um cenário heterogêneo de redes *wireless* para que o veículo possa receber os dados por diferentes interfaces, ele apenas menciona que cada nó será equipado com a tecnologia IEEE 802.11p, deixando os usuários reféns de uma única rede.

Em (RENE et al., 2015) é proposta uma arquitetura com *multihoming* e *handoff* na camada TCP para redes VANETs com o objetivo de garantir o QoE de um vídeo recebido. Os autores levaram em consideração um ambiente heterogêneo composto pelas tecnologias IEEE 802.11p e Rede de Satélites para implementar o *Multipath TCP* (MPTCP). O trabalho combina o MPTCP com o *Deep Packet Inspection* (DPI) para fazer a diferenciação de tráfego a nível de *frames* e, então, selecionar a melhor rede por onde o veículo irá receber o vídeo. Além disso, o DPI é empregado no trabalho para descartar os pacotes menos importante quando alguma das redes ficar saturada.

A proposta feita por (RENE et al., 2015) é respeitável para assegurar o QoE de aplicações como *streaming* de vídeo em redes VANETs, pois faz a diferenciação do tráfego no nível de *frames*, ou seja, os pacotes mais importantes do vídeo serão priorizados na transmissão. Além disso, a utilização das Redes de Satélites, por mais instável que elas sejam em cenários chuvosos, por exemplo, pode ser uma alternativa em VANETs, quando não houver nenhuma cobertura das demais tecnologias sem fio. Entretanto, o trabalho dos autores não especifica qual técnica é utilizada para fazer o *handoff* na camada TCP. Ademais, não é satisfatório realizar o *handoff* no TCP em razão da janela de congestionamento. Por fim, os autores não empregam nenhuma técnica de gerenciamento, como o SDN, para evitar o engessamento da rede e viabilizar a programabilidade dela.

A solução de (MORE; NAIK, 2018) é uma estratégia de roteamento *multipath* para transmissão de vídeo em redes veiculares. Os autores utilizaram Algoritmo Genético baseado em otimização para encontrar o melhor caminho para, então, realizar a transmissão

de vídeo. No trabalho, é feita a conversão do vídeo a ser transmitido em fluxos de *bits* através da codificação *High Efficiency Video Coding* (HEVC), e é levado em consideração a distância do nó em relação ao seu ponto de acesso para ser decidido qual o melhor caminho para a transmissão *multimídia*.

O mecanismo de (MORE; NAIK, 2018) visa reduzir o atraso fim a fim e aumentar a taxa de transferência de dados no lado do usuário. Porém, os autores não especificam quais redes compõem o cenário VANETs para o fluxo de dados e não empregam nenhuma técnica de roteamento *multipath* durante o *handoff*. Além disso, o gerenciamento da rede é limitado às políticas de encaminhamento de pacotes de cada comutador, ou seja, cada dispositivo de núcleo tem suas próprias instruções de encaminhamento do fluxo de dados.

O trabalho de (SINGH et al., 2019) propôs uma arquitetura que utiliza o MPTCP e SDN para *multihoming* e *handoff* em redes veiculares. Na proposta, o *handoff* é gerenciado através do controlador central que tem ciência da mobilidade do veículo, e quando este está na iminência de sofrer o *handoff*, o controlador injeta regras de reencaminhamento de tráfego nas *flowtables* dos *switches* via *OpenFlow*. A arquitetura proposta leva em consideração um cenário heterogêneo composto pelo IEEE 802.11p e pelo Wi-Fi, onde o nó recebe os dados por essas duas interfaces simultaneamente.

A proposta de (SINGH et al., 2019) tem relevância para comunicação em redes veiculares pois utiliza o SDN para tornar o comportamento da rede mais dinâmico e emprega o *multihoming* com MPTCP para recepção de dados. O problema da proposta é que o MPTCP utiliza subfluxos TCP, isto é, para cada conexão do veículo será criado um subfluxo TCP, e o TCP não é indicado para procedimentos que envolvam *handoff*, pois ele quebra a janela de congestionamento, e nem para, por exemplo, execução de *streaming* de vídeo, também pelo mesmo motivo. Além disso, os autores não deixam claro quais parâmetros são utilizados no *handoff*.

A Tabela 1 sintetiza as principais características dos trabalhos destacados acima e faz o comparativo com a proposta feita nesta dissertação.

Tabela 1 – Comparação dos trabalhos relacionados

Proposta	**Objetivo Central**	**Estratégia de *Handoff***					**Técnica de Avaliação**
		Parâmetros	**Inteligência**	**SDN**	***Multihoming***	**Cenário Heterogêneo?**	

(SMIDA; FANTAR; YOUSSEF, 2018)	Minimizar o tempo de interrupção do *streaming* de vídeo	Qualidade de *link* das RSUs e métricas de QoE	Baseada em função matemática	✗	✗	✗	Simulação
(SMIDA; FANTAR; YOUSSEF, 2017)	Minimizar a interrupção e latência do *handoff*	Qualidade de *link* das RSUs e SNR	Baseada em função matemática	✗	✗	✗	Simulação
(GHOSH et al., 2015)	Prever e garantir o *handoff* proativo para otimizar a alocação de canal	TBVH, NDT e velocidade do veículo	Modelo matemático	✗	✗	✗	Simulação + *Testbed*
(SKONDRAS et al., 2017)	Otimizar o gerenciamento de mobilidade dos veículos	RSS, velocidade do veículo e serviço de QoS	Baseada em função matemática	✗	✗	LTE e IEEE 802.11p	Modelagem Matemática
(GOUDARZI et al., 2018)	Prover QoS de serviços móveis em redes veiculares	Localização do veículo e serviços de QoS	Baseada em função matemática	✗	✗	WiMAX, 3G e Wi-Fi	Modelagem Matemática
(LIN; LIN, 2011)	Diminuir o tempo de conexão com a RSU	RSS	Baseada em função matemática	✗	✗	✗	Simulação
(HASSOUNE; MAAZA; SENOUCI, 2017)	Evitar *handoffs* desnecessários para melhorar os serviços de *streaming multimídia* em rodovias	Velocidade e posição do veículo, densidade e *jitter* da rede	Modelo Analítico	✗	✗	✗	Simulação
(EVANGELINE; KUMARAVELU, 2017)	Aumentar o tempo de conectividade para reduzir o número de *handoffs* desnecessários	RSSI	Baseada em função matemática	✗	✗	✗	Não especificado

(SAAFI; HAMOUDA; KALLEL, 2018)	Reduzir o atraso de pacotes e *jitter*, e estabilizar o *throughput* dos serviços	Velocidade do veículo e parâmetros de QoS	AHP e Entropia	✗	✗	LTE e IEEE 802.11p	Não especificado
(WANG et al., 2014)	Prover QoS para os serviços executados pelos usuários	RSSI, taxa de transmissão, BER e tendência de movimento do veículo	Árvore de decisão de autoseleção	✗	✗	IEEE 802.11p, WiMAX e 3G	Simulação
(DUO et al., 2018)	Prover suporte para ambientes veiculares altamente dinâmicos	Não especificado	Não especificado	✔	✗	IEEE 802.11p, LTE	Simulação
(RIZVI; AKRAM, 2018)	Reduzir o tempo de preparação e entrega do *handoff*	Não especificado	Não especificado	✔	✗	✗	Simulação
(HE et al., 2018)	Reduzir custo de sinalização e atraso de *handoff*	Velocidade do veículo	PMIPv6	✔	✗	✗	Emulação
(HUANG et al., 2017)	Reduzir o número de *handoffs* desnecessários para otimizar o processo de *offloading*	Velocidade, posição e direção do veículo, e posição das RSUs	Modelo Analítico	✔	✗	4G e IEEE 802.11p	Simulação
(MOUAWAD; NAJA; TOHME, 2019)	Prover Qos para aplicações em execução e balancear a carga na rede	Direção do veículo e qualidade de sinal das antenas	Função Sigmóide + Teoria de Jogos	✔	✗	LTE e IEEE 802.11p	Emulação
(CASTRO et al., 2017)	Prover Qos para aplicações e balancear a carga da rede com a diferenciação do tráfego de dados	Não especificado	N-PMIPv6	✗	✔	Wi-Fi e IEEE 802.11p	*Testbed*

(LOPES; LUÍS; SARGENTO, 2019)	Mitigar a degradação de aplicações através da priorização de *frames* críticos	Não especificado	N-PMIPv6	✗	✔	✗	Não especificado
(RENE et al., 2015)	Garantir QoE de um vídeo recebido	Área de cobertura	✗	✗	✔	IEEE 802.11p e Rede de Satélites	Simulação
(MORE; NAIK, 2018)	Otimizar transmissão e recepção de vídeos em redes veiculares	Posição do veículo	Algoritmo Genético	✗	✔	✗	Simulação
(SINGH et al., 2019)	Manter o QoS das aplicações estável durante o *handoff*	Não especificado	✗	✔	✔	IEEE 802.11p e Wi-Fi	Emulação
Esta Dissertação	Prover o *handoff* transparente garantindo a estabilidade do QoS e QoE das aplicações	RSSI, velocidade e posição do veículo	AHP	✔	✔	IEEE 802.11p e LTE	Simulação

Legenda para a Tabela 1:
✔ Empregou. ✗ Não empregou.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo examinou os trabalhos na literatura relacionados a estratégia proposta desta dissertação. Os trabalhos discutidos foram classificados em três subgrupos de acordo com as características e propostas de cada um. Após a análise dos trabalhos acima, observa-se a necessidade de desenvolver um arcabouço robusto para *handoff* em redes veiculares que assegure que o procedimento ocorra de modo transparente para o usuário, que simplifique o gerenciamento da rede e propicie um cenário heterogêneo de redes sem fio.

4 ARQUITETURA PROPOSTA

Este Capítulo descreve o mecanismo proposto neste trabalho, cuja finalidade é garantir o *handoff* transparente com *multihoming* em um cenário heterogêneo de redes VANETs definida por software, com base nas informações de contexto da rede e dos veículos. As metas principais a serem alcançadas com o arcabouço proposto são garantir o QoS exigido pelas aplicações WWW, VoIP e *streaming* de vídeo, e garantir o bom desempenho de QoE do *streaming* durante o *handoff* no lado cliente.

As Seções que constituem este Capítulo estão dispostas da seguinte maneira. A Seção 4.1 faz uma explanação sobre a visão arquitetural do sistema proposto. A Seção 4.2 descreve minuciosamente a operação do mecanismo de *handoff*. Em seguida, a Seção 4.3 apresenta a sinalização da proposta e o fluxograma da inteligência. Por fim, a Seção 4.4 expõe as considerações finais sobre o Capítulo.

4.1 ARQUITETURA EM CAMADAS

O mecanismo proposto é constituído por três camadas, onde cada uma exerce seu papel no processo de decisão do *handoff*. As camadas são descritas da seguinte forma:

- Camada Inferior (Plano de dados veicular): É a camada de usuários, isto é, os veículos em mobilidade, que solicitam os serviços oferecidos pela nuvem, e sofrem o *handoff* entre seus pontos de conexão. No esquema proposto, os clientes executarão as aplicações *World Wide Web* (WWW), VoIP e receberão o *streaming* de vídeo da nuvem via *multihoming* durante o processo de transferência de conexão. Cada veículo está equipado com a tecnologia LTE e com o padrão IEEE 802.11p, como interfaces de rede sem fio, sendo o responsável por enviar os parâmetros de decisão até o controlador central através do seu ponto de conexão.

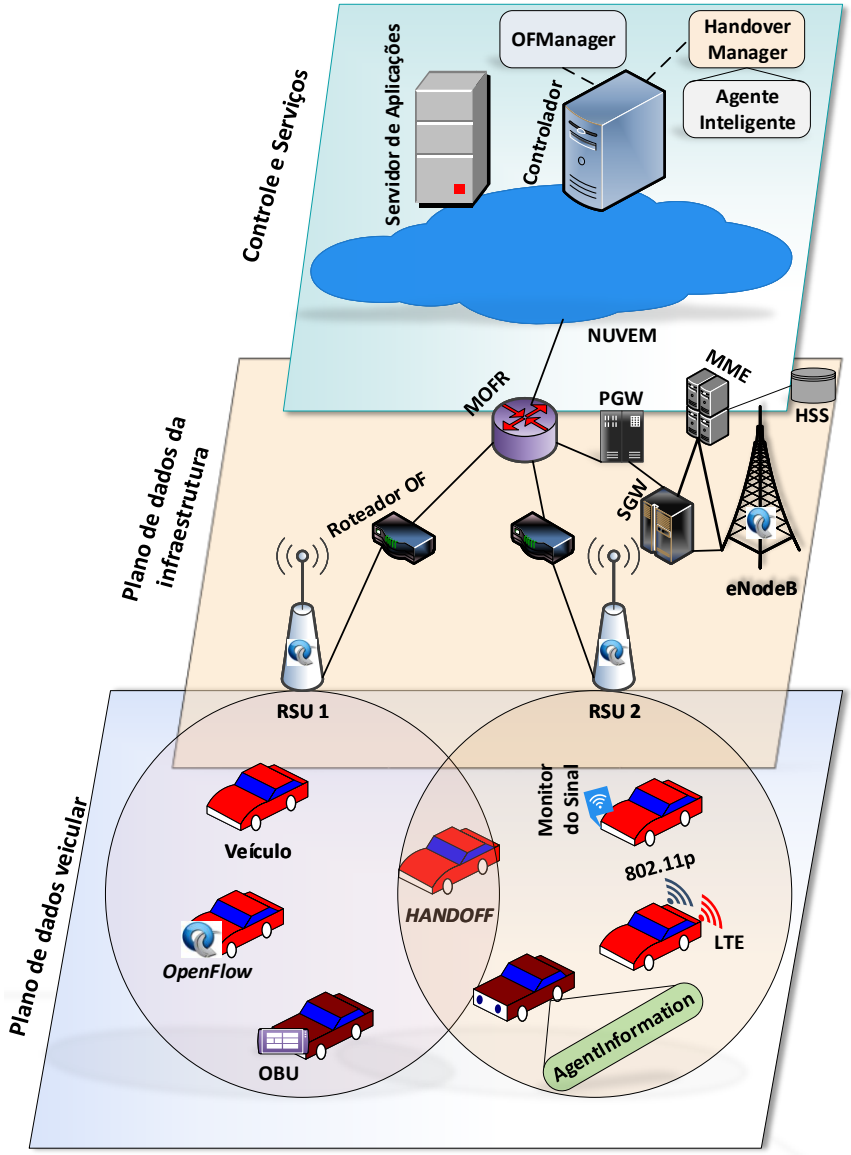
- Camada Intermediária (Plano de dados da infraestrutura): Trata-se de toda infraestrutura de rede que provê conexão sem fio para os veículos com a nuvem, além dos comutadores responsáveis pelo encaminhamento dinâmico do fluxo de dados da fonte até o destino. Aqui, estão presentes as eNodeBs (LTE), o S/PGW (LTE), as RSUs (IEEE 802.11p) e os roteadores *OpenFlow*. É nesta camada, também, onde serão realizados os procedimentos de *handoff* e o tráfego *multihoming* de pacotes.

- Camada Superior (Controle e serviços): É a camada onde se encontra toda infraestrutura de nuvem do provedor responsável por armazenar os serviços remotos que serão solicitados pelos veículos, isto é, as aplicações WWW, VoIP e o *streaming* de vídeo. Além disso, nesta camada se encontra também o controlador central, agente

responsável pelo gerenciamento dinâmico da rede, e responsável por tomar as decisões de *handoff* na Camada Intermediária com base nos parâmetros recebidos pelo veículo.

Todo o planejamento da arquitetura proposta, especialmente a adoção dos elementos que compõem cada camada, foi feito com o intuito de atender às necessidades dos usuários em redes veiculares, no que diz respeito às garantias de QoS e QoE exigidos pelas aplicações executadas. Portanto, é fundamental ter uma visão clara do sistema como um todo. A Figura 8 exibe a disposição da arquitetura e, em sequência, é feito o detalhamento de cada elemento arquitetural.

Figura 8 – Arquitetura do Sistema



Fonte: Elaborada pelo autor

4.1.1 Camada Inferior - Plano de dados veicular

Na camada inferior está presente um dos elementos vitais de todo o sistema, cujo todos os processos estão focados nele, os veículos. Este trabalho assume que cada veículo está equipado com uma OBU, e que este dispositivo fornece acesso aos passageiros às aplicações disponíveis. Além disso, cada *host* executará três tipos de aplicações, sendo duas de caráter em tempo real, VoIP e *streaming* de vídeo, e uma aplicação WWW simulando uma navegação *web*. A proposta deste trabalho foca em garantir o bom desempenho dessas aplicações durante o *handoff*.

Os veículos estão equipados com duas interfaces de rede, a tecnologia LTE e o padrão IEEE 802.11p, sendo, dessa forma, beneficiados pelas múltiplas opções de conexão sem fio, tornando mais robusta a caracterização de um ambiente VANETs. Além disso, os carros transitarão linearmente com velocidades variadas, causando de forma natural a mudança entre células de cobertura das infraestruturas de acesso, ou seja, o *handoff*.

4.1.2 Camada Intermediária - Plano de dados da infraestrutura

Na camada intermediária está toda infraestrutura que fornece acesso à conexão sem fio para os veículos, e os equipamentos responsáveis pelo encaminhamento dinâmico do fluxo de dados na rede. As eNodeBs representam o sistema LTE como rede celular e provêem conexão sem fio dos veículos para a tecnologia de acesso à rádio. As eNodeBs têm a característica de maior abrangência de área de cobertura em relação às infraestruturas IEEE 802.11p. O PGW, componente do LTE, será o dispositivo que estenderá a conectividade dos veículos à qualquer rede de dados externa, isto quando os carros estiverem utilizando o LTE.

Nesta camada estão presentes, também, as RSUs que fornecem acesso sem fio dos veículos para a tecnologia IEEE 802.11p. Se comparadas com as eNodeBs, as RSUs tem menor área de cobertura (KENNEY, 2011); (JAMEEL et al., 2018), fazendo com que seu número seja maior ao longo de uma via. Por fim, a camada também comporta os roteadores *OpenFlow* que se comunicarão com o controlador central via protocolo *OpenFlow*. Os roteadores OF registrarão em suas *flowtables* as instruções do controlador central em relação ao encaminhamento de pacotes, ou seja, eles serão responsáveis pelo tráfego dinâmico dentro da rede. Além disso, a conexão do meio sem fio IEEE 802.11p e da rede LTE com a nuvem será provida por um roteador OF, cujo nome denominou-se *Middle OpenFlow Router* (MOFR).

4.1.3 Camada Superior - Controle e serviços

A camada superior comporta toda infraestrutura de nuvem onde estão armazenados os serviços que serão solicitados pelos veículos. Nesta camada está presente o servidor onde encontram-se as aplicações WWW, VoIP e o vídeo a ser transmitido. A conexão da nu-

vem com as redes sem fio na camada intermediária será cabeada, tendo como agente intermediador, o MOFR.

Aqui localiza-se também um dos componentes fundamentais da arquitetura, o controlador central. O controlador desempenhará basicamente três tarefas:

- **Injeção de regras *OpenFlow* (OF)**: O controlador injetará regras nos roteadores OF, através do protocolo *OpenFlow*, especificando as ações que estes dispositivos irão tomar em relação a cada pacote que chegar em suas portas.
- **Decisão de *handoff***: O controlador será o responsável por tomar as decisões de *handoff* na camada intermediária. Com base nas informações recebidas dos veículos, o controlador decidirá quando a camada mais abaixo deverá fazer a transferência de conexão dos carros.
- **Decisão de realizar o *multihoming***: Quando o controlador tomar a decisão de que a camada intermediária deverá fazer o *handoff*, ele enviará regras para os roteadores OF especificando a ação *multihoming* que deve ser tomada.

4.2 DETALHAMENTO FUNCIONAL DO MECANISMO DE *HANDOFF*

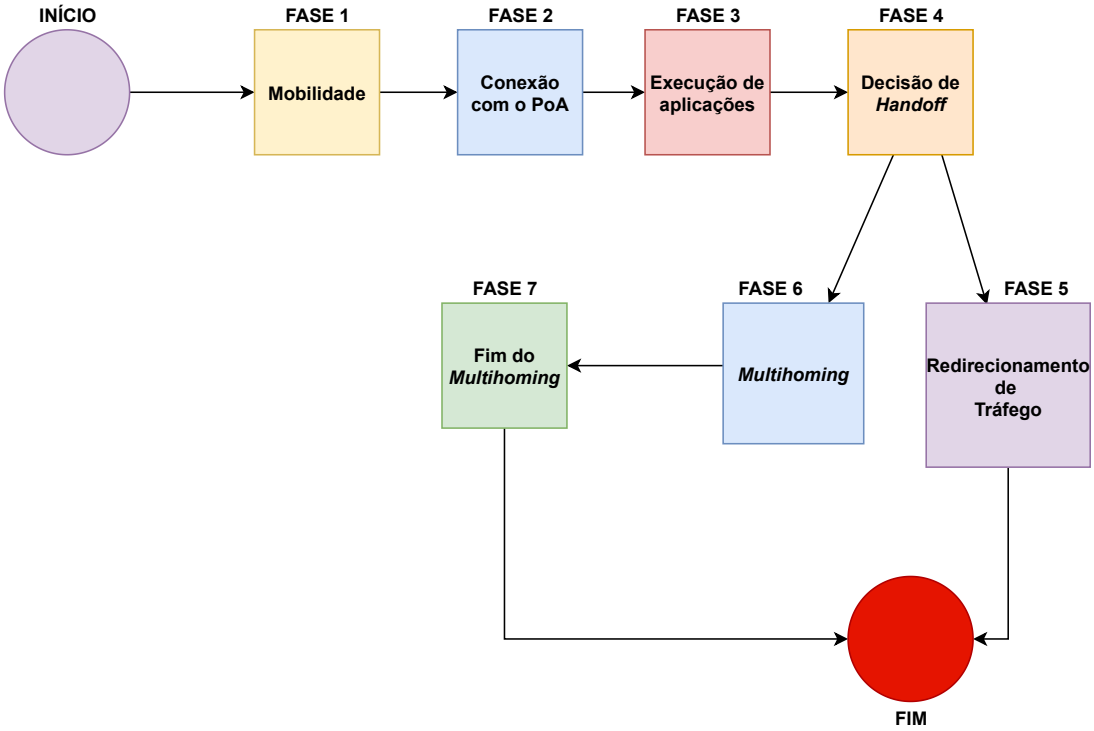
Esta dissertação apresenta um mecanismo de *handoff* vertical definido por *software* em redes VANETs. Como já foi destacado, a estratégia foi desenvolvida levando em consideração o paradigma SDN, onde as tomadas de decisões são feitas no controlador central da rede localizado na nuvem da operadora. A vantagem de ter o controlador localizado na nuvem é que ele terá visão global de todo o sistema, aumentando a eficiência das decisões de *handoff*, bem como no desempenho do procedimento em si.

Neste trabalho, a abordagem principal para o *handoff* é na comunicação entre o veículo e a infraestrutura de conexão, ou seja, comunicação V2I. A Figura 9 apresenta em nível macro as fases que ocorrem durante o contexto do *handoff*.

A primeira fase é onde os veículos começam a se movimentar pela via com velocidades variadas no sentido linear. Foi utilizado o sentido linear para garantir que os veículos sofreriam o *handoff* e para analisar os impactos em cada ponto de ocorrência do procedimento. A segunda fase é onde os veículos encontram e realizam a conexão com o ponto de acesso IEEE 802.11p e com a eNodeB (LTE) e, então, começam a fazer a medição da potência de sinal recebida. Depois que o veículo consegue estabelecer conexão com a RSU, ele solicita os serviços da nuvem e começa a executar as aplicações que estão rodando no servidor, marcando a terceira fase.

Em razão de sua mobilidade, o veículo começa a se afastar de sua RSU, fazendo com que a potência de sinal recebida fique fraca, necessitando, dessa forma, que sua conexão seja transferida para a RSU com melhor sinal. O veículo notifica o controlador central

Figura 9 – Fases do Contexto do *Handoff*



Fonte: Elaborada pelo autor

sobre o serviço degradado de sua RSU, o controlador, por sua vez, toma a decisão de que o *handoff* precisa ser feito, marcando a quarta fase.

Após o controlador tomar a decisão de que o *handoff* deve ser executado na camada intermediária, ele notifica os roteadores OF sobre o destino para o qual o veículo está se dirigindo, para que eles possam redirecionar o fluxo de dados para a RSU onde o veículo irá se conectar, caracterizando a quinta fase. Concorrentemente à fase anterior, o controlador notifica o MOFR para que ele realize o *multihoming* dos pacotes com a rede LTE, marcando a sexta fase.

Por fim, a sétima fase ocorre depois que o *handoff* e o redirecionamento de tráfego são finalizados. O controlador notifica o MOFR para que ele interrompa o *multihoming* dos pacotes com a rede LTE, concluindo o ciclo. É importante ressaltar que em razão da quantidade de RSUs IEEE 802.11p em uma rodovia ser maior em relação às eNBs LTE, consequentemente ocorrem a formação de um número maior de células de cobertura. Por esse motivo, e também pelo fato das antenas IEEE 802.11p estarem mais próximas dos veículos, fator que agiliza o processo de conexão com a infraestrutura, o sistema encaminhará a conexão dos nós móveis para a rede IEEE 802.11p. A seguir, é feito o detalhamento de todo o ciclo do *handoff*, bem como os principais agentes envolvidos.

4.2.1 Monitoramento da Rede

Os veículos são os terminais finais da rede que se conectam com as infraestruturas de conexão sem fio, e desempenham um papel vital no processo de decisão do *handoff*. Quando estes terminais se conectam com uma RSU, a sua camada física começa a medir a intensidade do sinal que está sendo recebido. Quando a intensidade do sinal está se enfraquecendo, resultando na degradação no desempenho das aplicações, os veículos notificam o controlador central sobre a debilidade do sinal.

A potência do sinal, isto é, o RSSI, é medida em *decibel miliwatt* (dBm), e quando ele fica abaixo de -65dBm, o veículo aciona o controlador sobre a sua baixa intensidade. Foi estabelecido o limiar de -65dBm como valor mínimo da intensidade do sinal para que as aplicações WWW, VoIP e *streaming* de vídeo possam funcionar satisfatoriamente (BEN-MUBARAK et al., 2013); (MAHARDHIKA; ISMAIL; MAT, 2012); (ZHIOUA et al., 2012).

A notificação do veículo consiste no envio de um pacote, denominado *decisionParameters*, em forma de mensagem, contendo o valor atual do RSSI recebido de sua RSU, o valor do RSSI das RSUs vizinhas, o valor da velocidade em metros por segundo e as coordenadas de sua posição atual como parâmetros para o sistema de decisão localizado no controlador. É assumido que o carro contém um *Global Position System* (GPS) que registra a sua localização. Os veículos não tem conhecimento da localização do controlador, apenas disparam a mensagem através da infraestrutura de conexão. Os roteadores *openflow* contém uma regra de encaminhamento da mensagem de notificação do veículo até o controlador. A regra especifica que a mensagem *decisionParameters* deve ser encaminhada para a porta que dá acesso ao *host* de controle da rede.

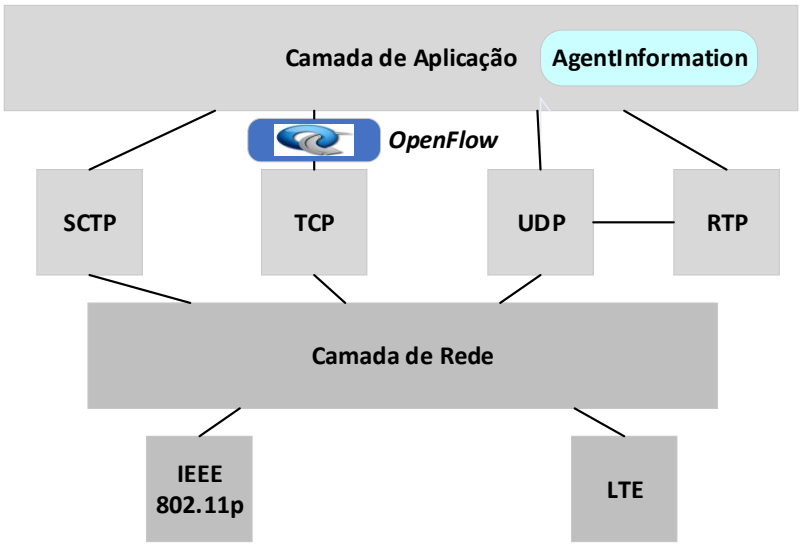
No veículo há a presença de um agente na camada de aplicação, chamado *AgentInformation*, que é o responsável por agrupar as informações do RSSI, que é coletado pela camada física, da velocidade e coordenadas da posição, e disparar essas informações, através da RSU conectada, até à nuvem da operadora. A Figura 10 expõe a estrutura interna do veículo.

4.2.2 Gerenciamento e Controle da Rede

O controlador é um dos elementos principais do sistema, pois ele é o responsável pelo gerenciamento e controle de toda rede. O controlador está posicionado na nuvem da operadora e, devido ao seu posicionamento e às suas particularidades, ele tem a visão global de toda rede, tendo ciência de cada processo.

Quando o veículo dispara a mensagem *decisionParameters*, ela chega até o controlador como uma notificação de que o terminal final está na iminência de perder desempenho nas aplicações em razão da baixa intensidade do sinal. O controlador realiza o desenvelopamento da mensagem e extrai as informações dos parâmetros de decisão contidos nela.

Figura 10 – Camadas de protocolos do veículo



Fonte: Elaborada pelo autor

No controlador, há um gerenciador intitulado *handoverManager* que é o responsável por extrair as informações da mensagem *decisionParameters* e encaminhá-las ao agente inteligente (que será descrito mais à frente). Quando o controlador constata que o valor do RSSI está abaixo de -65dBm, ele verifica os valores de RSSI das RSUs próximas ao veículo e cruza com a posição e velocidade do nó para definir a RSU com o melhor sinal oferecido. É importante mencionar que nos cenários de simulação não são considerados obstáculos que possam afetar a potência de sinal, ou seja, a medição do RSSI pelo carro ocorre sem interferências. Ressalta-se também que o controlador extrai as informações das coordenadas enviadas pelo veículo, e calcula a distância dele até a RSU mais próxima através da Equação 4.1. Com base nas informações dos RSSIs das RSUs vizinhas, na velocidade e na posição do veículo, o controlador decide para qual RSU o *handoff* será feito.

$$\sqrt{(X_{Prsu} - X_{Pvei})^2 + (Y_{Prsu} - Y_{Pvei})^2} \tag{4.1}$$

Onde:

- X_{Prsu} e Y_{Prsu}: São, respectivamente, as coordenadas X e Y da RSU.
- X_{Pvei} e Y_{Pvei}: São, respectivamente, as coordenadas X e Y do veículo.

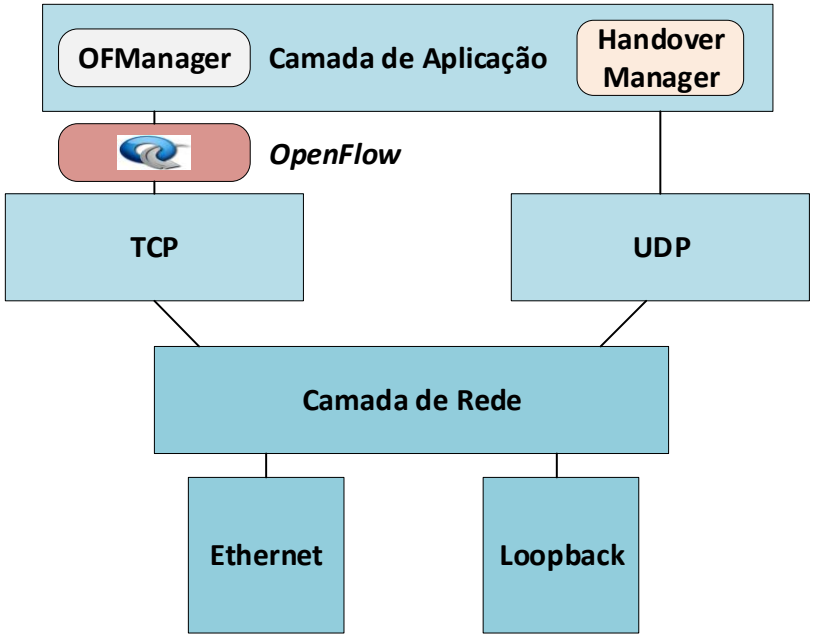
Depois que o controlador decide qual RSU irá receber a conexão do veículo, ele envia uma regra que será armazenada nas *flowtables* dos roteadores OF contendo o número da porta para onde o fluxo de dados será redirecionado em cada um deles. O controlador se comunica com os roteadores via protocolo *OpenFlow*, e cada roteador, através da regra

injetada pelo controlador, terá o conhecimento sobre qual porta deverá encaminhar os dados. A regra do controlador injetada nos roteadores fará com que estes dispositivos encaminhem o fluxo de dados até a RSU onde o veículo se conectará.

No controlador central existe um segundo gerenciador, intitulado *OFManager*, que é o responsável por estabelecer a comunicação *OpenFlow* com os roteadores OF, criar e disparar as regras para estes dispositivos. O módulo *OFManager* cria uma regra, envelopa ela dentro de um pacote e envia para a os roteadores OF via protocolo *OpenFlow*. A Figura 11 apresenta a arquitetura do controlador da rede.

Dois pontos devem ser destacados em relação ao controlador central. O primeiro ponto é que, embora ele esteja na nuvem do provedor, a sua conexão com a camada intermediária ocorre de forma cabeada através da interface *Ethernet*. O segundo ponto é que os gerenciadores *OFManager* e *handoverManager* compõem a camada de aplicação do dispositivo.

Figura 11 – Camadas de protocolos do controlador



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2.3 Agente Inteligente

O agente inteligente responsável por avaliar os parâmetros recebidos do veículo e decidir se o *handoff* deve ser feito reside no gerenciador *handoverManager*, localizado no controlador da rede. A estratégia utilizada para arquitetar a inteligência do mecanismo foi o AHP, onde foram definidos diferentes pesos para cada parâmetro de decisão. Além disso, foi esquematizada uma fórmula para calcular o custo do *handoff*, isto é, para saber se o custo do veículo continuar na RSU 1 é maior que o custo de transferência da conexão do nó

para a RSU 2, por exemplo. A fórmula esquematizada está representada pela Equação 4.2.

$$CtH = ({}_pR * Rn) + ({}_pV * Vn) + ({}_pD * Dn) \tag{4.2}$$

A fórmula do custo (CtH) foi utilizada para que o controlador pudesse ponderar, de forma eficiente e instantânea, a decisão de disparar o *handoff*. A fórmula é composta pelos três parâmetros recebidos do veículo e foram normalizados (n) através da técnica min-max (HANN; KAMBER, 2000). O elemento R representa o RSSI das RSUs, é o elemento principal na tomada de decisão do *handoff*, pois indica toda a potência de sinal que o veículo está recebendo e é diretamente proporcional ao desempenho da execução de aplicações, ou seja, quanto maior o RSSI, melhor será o funcionamento das aplicações, e quanto menor o RSSI, o serviço será degradado.

O parâmetro V indica a velocidade do veículo, sendo um elemento indispensável na tomada de decisão, pois representa a mobilidade do terminal final. Logo, dependendo da velocidade do veículo, o controlador pode optar por realizar o *handoff*, ou aguardar mais algum instante, caso o nó esteja com uma velocidade muito baixa.

Por fim, o parâmetro D, elemento importante para o processo, referencia a distância do veículo para a RSU vizinha. Se a distância entre a RSU atual do nó aumenta em razão da mobilidade deste, e a distância da RSU vizinha com o mesmo nó diminui em razão do mesmo fator, o controlador poderá optar por realizar o *handoff*.

De forma resumida, a função de custo CtH funciona da seguinte forma: ${}_pR$ é o peso do RSSI, calculado com o AHP, que é multiplicado com Rn, valor do RSSI normalizado. ${}_pV$ é o valor do peso da velocidade, que também foi calculado com AHP, e é multiplicado com Vn, valor normalizado da velocidade. ${}_pD$ é o peso da distância do veículo para RSU, cujo cálculo também foi feito com AHP, e é multiplicado com Dn, valor normalizado da posição. Por fim, os valores das multiplicações são somados, resultando no valor final da fórmula.

Portanto, a razão de haver o emprego da fórmula de custo CtH (Equação 4.2) neste trabalho, se dá pelo fato de ter sido levado em consideração três tipos de informações de contexto no processo de tomada de decisão de transferência da conexão do veículo. É importante destacar que o agente responsável pela decisão de *handoff* compara o valor do custo de transferência de conexão, gerado pela fórmula, com o custo do veículo permanecer em sua célula de cobertura. Se o custo de *handoff* for menor que o custo do usuário permanecer em sua ´célula, o agente decide que o *handoff* deverá ocorrer. Se o custo de transferência for maior, então o agente optará por deixa o nó móvel em sua rede atual.

A utilização dos parâmetros RSSI, velocidade e distância do veículo para RSU, torna a tomada de decisão do controlador mais consistente e eficiente, pois ele não se baseará em um fator somente. Por exemplo, o carro pode estar enfrentando uma conexão ruim com a RSU, porém sua velocidade pode estar muito baixa, fazendo com que o controlador

opte por não disparar o *handoff*. Se o controlador fosse se basear somente na potência de sinal, e realizar o *handoff*, poderiam ser causados inúmeros efeitos *ping-pong* na conexão do veículo, isto é, o veículo estaria na RSU 1, sofreria o *handoff* para a RSU 2, e retornaria no mesmo instante para a RSU 1, prejudicando o QoS das aplicações. Além disso, a utilização da fórmula *CtH* evita que o controlador faça análises isoladas sobre cada parâmetro, fato que culminaria em maior tempo na decisão do *handoff*. Com a fórmula de custo, o agente decisor engloba todas as três informações de contexto em uma única ponderação e retorna o resultado para o controlador, viabilizando a eficiente, segura e instantânea decisão de *handoff*.

Outro fator importante a ser destacado é a utilização da técnica AHP para definir os pesos ($_p$) de cada elemento da fórmula *CtH*. Foram realizadas comparações em pares com todos os três parâmetros destacados, com o intuito de conceber os pesos de cada um. A Tabela 2 apresenta os resultados adquiridos com base nos julgamentos feitos utilizando a técnica AHP.

Tabela 2 – Tabela de decisão dos julgamentos dos parâmetros de *handoff*

	R	***V***	***D***
R	1	3	5
V	$\frac{1}{3}$	1	2
D	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{2}$	1

Após a tabela com o resultado dos julgamentos ter sido concebida, foi feita a verificação da consistência dos julgamentos executados. O AHP gera um índice intitulado *Consistency Ratio* (CR) que indica se os julgamentos concernente ao grau de importância dos elementos da tabela está consistente, validando os pesos de cada parâmetro. Para que os pesos possam ser validados, o valor de CR deve ser inferior a 0,1. A Tabela 3 apresenta os valores dos pesos de cada elemento.

Tabela 3 – Pesos dos parâmetros de decisão de *handoff* considerados no AHP

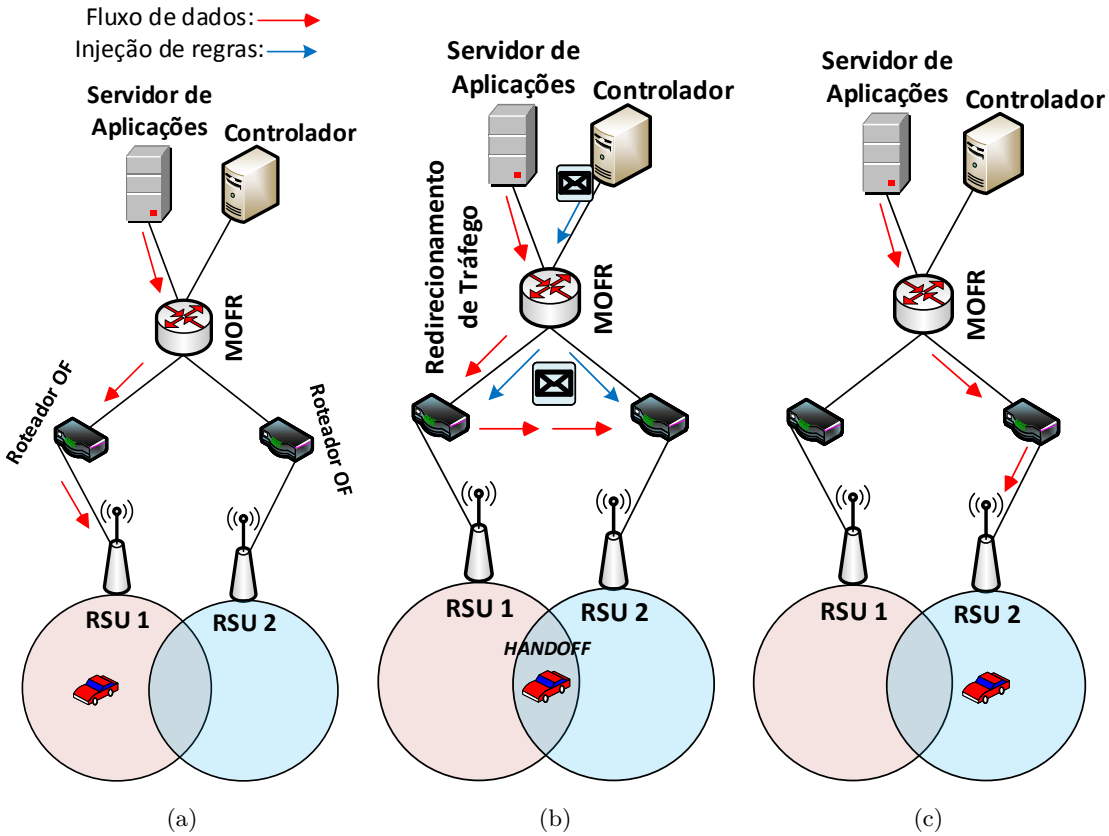
Parâmetro	**Peso**	**CR**
RSSI (R)	0,648	**0,004**
VELOCIDADE (V)	0,230	
DISTÂNCIA (D)	0,122	

4.2.4 Redirecionamento de Tráfego com SDN

A Figura 12 demonstra como o processo de redirecionamento de tráfego é realizado. Quando o controlador toma a decisão de fazer o *handoff*, o gerenciador *OFManager* cria a regra que instrui os roteadores OF a fazerem o redirecionamento do tráfego, e dispara a

regra até estes dispositivos através do protocolo *OpenFlow* (Figura 12b). A regra, quando chega aos roteadores, é anexada nas *flowtables* dos dispositivos, especificando para qual porta os pacotes das aplicações WWW, VoIP e *streaming* de vídeo devem ser encaminhados. O controlador, em virtude da sua visão global da rede, tem ciência do caminho do servidor até à RSU onde o veículo se conectará, e tem o conhecimento das portas dos roteadores que poderão conduzir os pacotes pelo mesmo caminho.

Figura 12 – Redirecionamento de tráfego via SDN



Fonte: Elaborada pelo autor

Em razão do desempenho e da falta de recursos computacionais relacionados à carga de processamento exigida para que a identificação das portas pelo controlador ocorresse de forma dinâmica, foi especificado em todos os roteadores o mesmo número de porta para que os pacotes cheguem a cada RSU, ou seja, para cada RSU há um número de porta específico, e esse número é definido em todos os roteadores. Por exemplo, a porta 1111 encaminha os pacotes até a RSU1, então todos os roteadores, quando forem encaminhar pacotes até essa RSU, conduzirão os dados para as suas respectivas portas 1111.

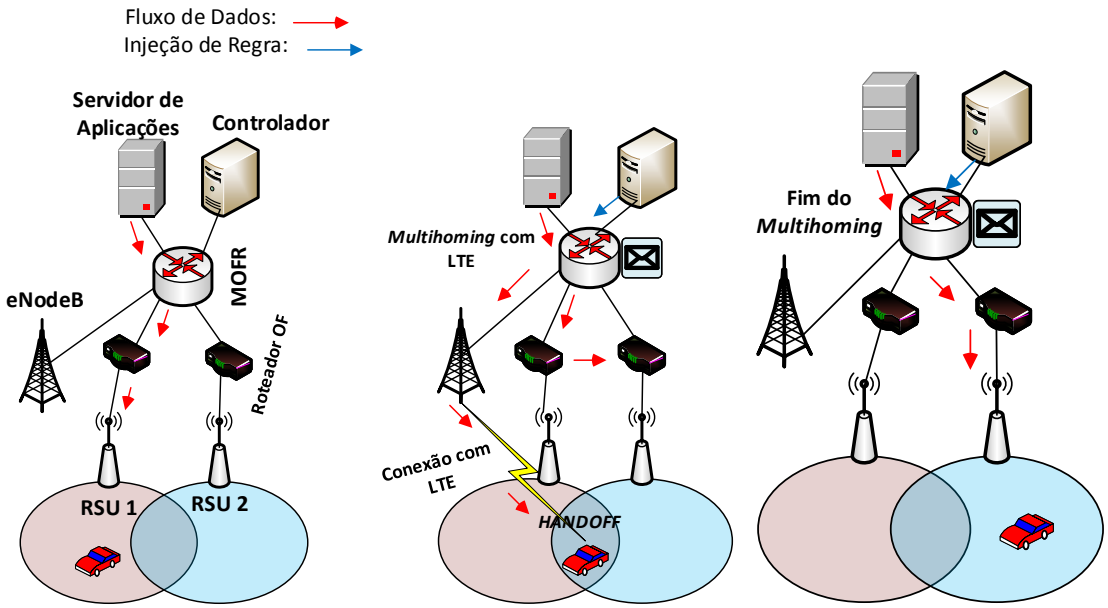
É importante ressaltar que este trabalho assume que, quando ocorre a primeira comunicação entre os roteadores OF e o controlador, este dispara as *flowtables* para cada dispositivo. Portanto, quando a regra chega nos equipamentos OF é assumido que estes já estão com suas *flowtables*.

Nesta operação, fica explícita a visão do emprego do SDN na proposta, onde o plano de controle, isto é, decisões de *handoff*, decisões de redirecionamento de tráfego e instruções para onde cada pacote deve ser enviado através de injeção de regras, é gerenciado pelo controlador central, e o plano de dados, ou seja, a ação de encaminhar os pacotes para o devido destino, é desempenhado pelos roteadores OF.

4.2.5 *Multihoming* com SDN

A Figura 13 apresenta como o *multihoming* via SDN é realizado. Concomitantemente à fase anterior, depois que o controlador decide que o *handoff* deverá ser feito, ele se comunica com o MOFR através do protocolo *OpenFlow* sobre a execução do *multihoming* com o LTE. Assim como ocorre com os demais roteadores OF da rede, o gerenciador *OFManager* cria uma regra específica, detalhando a ação de *multihoming*, e injeta a regra no MOFR (Figura 13b).

Figura 13 – *Multihoming* via SDN



Fonte: Elaborada pelo autor

Na regra criada pelo *OFManager*, é identificado um número de porta específico que dá aos pacotes acesso à rede LTE. Dessa forma, quando a regra é disparada pelo controlador, ela é guardada na *flowtable* do MOFR, a regra especifica que o roteador deve encaminhar os pacotes das aplicações WWW, VoIP e do *streaming* de vídeo para a porta 1212, que dá acesso à rede LTE (Figura 13b). Desse modo, enquanto o *handoff* está ocorrendo e os roteadores estão se articulando para redirecionar o tráfego para a RSU de destino do *host* na rede IEEE 802.11p, o veículo passa a receber o fluxo de dados pela sua interface

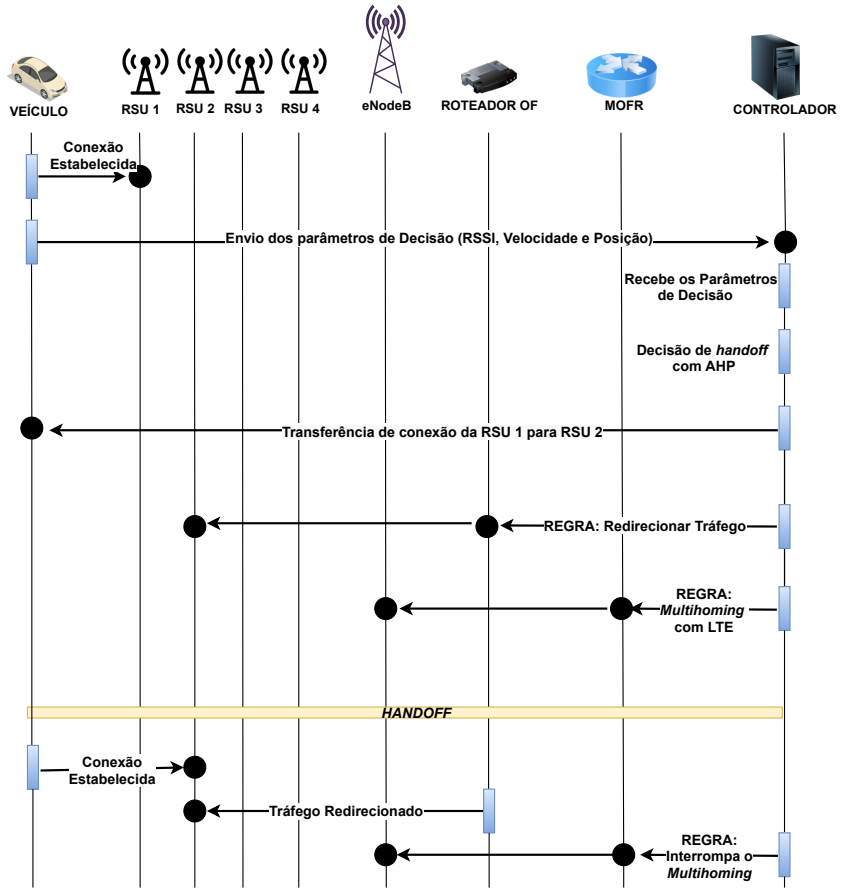
LTE. É importante frisar que a regra especificadora do *multihoming* é restrita ao MOFR da rede.

Quando o *handoff* é finalizado, e o caminho dos pacotes até a nova RSU do veículo na rede IEEE 802.11p encontra-se concluído, o controlador, por meio do gerenciador *OFManager*, cria uma regra específica para o MOFR para que o *multihoming* seja interrompido (Figura 13c). A nova regra injetada pelo controlador na *flowtable* do MOFR especifica que o dispositivo deve interromper o encaminhamento de pacotes WWW, VoIP e de *streaming* para a porta 1212, cujo caminho é para rede LTE, e manter o encaminhamento desses pacotes para a porta 2323, que dá acesso à rede IEEE 802.11p, finalizando, assim, o ciclo do *handoff*.

4.3 SINALIZAÇÃO DA PROPOSTA

Esta Seção destaca a estratégia de sinalização que ocorre durante o procedimento de *handoff*. A Figura 14 exibe detalhadamente a comunicação entre os agentes envolvidos no processo.

Figura 14 – Sinalização da Proposta



Fonte: Elaborada pelo autor

Primeiramente, o veículo encontra um ponto de conexão, isto é, a RSU 1, e estabelece

a comunicação através da sua interface de rede IEEE 802.11p. Sequencialmente, conforme o veículo vai se afastando da RSU 1, a intensidade do sinal recebido vai diminuindo até atingir o limiar mínimo para a execução satisfatória das aplicações WWW, VoIP e *streaming* de vídeo, então o *host* envia em um pacote os parâmetros RSSI, Velocidade e as coordenadas da posição, como notificação para o controlador central.

O controlador central, por sua vez, recebe a mensagem advinda do veículo, extrai as informações e alimenta o agente inteligente. O controlador, em virtude da inteligência com AHP, toma a decisão de que o *handoff* deve ser feito. Logo em seguida, o dispositivo faz a notificação para a camada intermediária de que o veículo terá sua conexão transferida da RSU 1 para a RSU 2.

Assim que a decisão de *handoff* é tomada, o controlador injeta uma regra no roteador *OpenFlow* especificando que o tráfego deverá ser redirecionado da RSU 1 para a RSU 2. Concomitantemente, o controlador também injeta uma regra no MOFR instruindo o dispositivo a realizar o *multihoming* dos pacotes WWW, VoIP e pacotes de *streaming* de vídeo com a rede LTE.

O *handoff* é finalizado com o estabelecimento bem sucedido da conexão do veículo com a RSU 2. De forma simultânea, o tráfego de dados, que antes era encaminhado para a RSU 1, é agora direcionado para a RSU 2.

Após a finalização do *handoff*, e do redirecionamento bem sucedido do tráfego de dados, o controlador central injeta outra regra no MOFR. A segunda regra especifica que o dispositivo interrompa o *multihoming* com a rede LTE, a fim de evitar sobrecarga sobre o próprio MOFR, concluindo o ciclo do *handoff*. Embora haja sobreposição de coberturas IEEE 802.11p, os veículos estão equipados somente com uma interface de rede da tecnologia, fator que inviabilizaria o *multihoming* entre as RSUs. Além disso, o *multihoming* entre RSUs durante o *handoff* faria o usuário ficar dependente de apenas uma tecnologia sem fio.

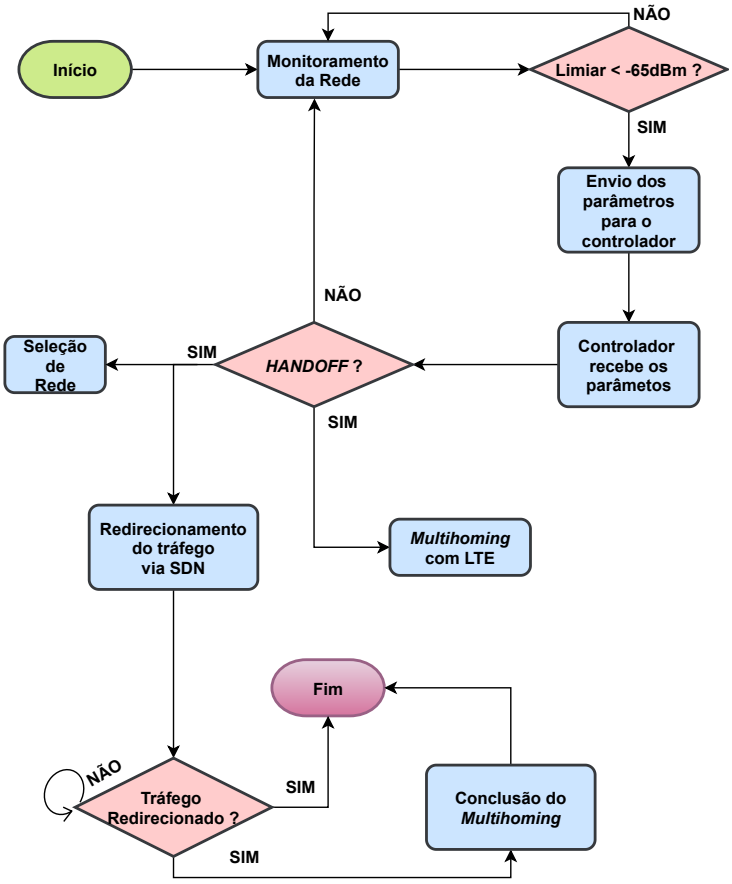
A Figura 15 expõe o fluxograma da inteligência do sistema. O mecanismo entra em operação quando o veículo começa a fazer o monitoramento da intensidade do sinal recebido de sua RSU. Se a intensidade do sinal ficar abaixo de -65dBm, o carro dispara os parâmetros para o controlador da rede, caso contrário, se intensidade estiver acima do limiar estabelecido, o veículo continua o monitoramento.

Caso o veículo envie os parâmetros para o controlador, este recebe a mensagem, extrai as informações e repassa para o seu agente inteligente. Com base nas informações recebidas, o agente inteligente pondera se o *handoff* deve ser executado. Se a conclusão for uma resposta negativa do agente, o algoritmo retorna para a etapa de monitoramento da rede. Caso a ponderação do agente seja positiva, o controlador notifica a camada intermediária sobre a seleção de nova rede para o veículo. Além disso, o controlador, através de regras *OpenFlow*, instrui os roteadores a realizarem o redirecionamento de tráfego entre a RSU de origem e a RSU de destino do veículo. Simultâneamente, o controlador instrui o MOFR

a executar o *multihoming* com a rede LTE.

Após essa etapa, o controlador e verifica se o redirecionamento de tráfego foi concluído. Caso o redirecionamento tenha sido concluído, o controlador instrui novamente o MOFR para concluir o *multihoming*.

Figura 15 – Fluxograma da Inteligência



Fonte: Elaborada pelo autor

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo exibiu os principais componentes da proposta feita por esta dissertação. Foi realizada uma introdução sobre a visão arquitetural de todo o sistema, bem como dos integrantes de cada camada da arquitetura. Foi desenvolvida uma descrição minuciosa sobre a operação do mecanismo proposto, especificando a função de cada agente envolvido no contexto do *handoff*, apresentando os fluxos das mensagens de comunicação entre os agentes e detalhando a inteligência do mecanismo.

5 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

Este Capítulo detalha o processo de avaliação de desempenho do mecanismo proposto nesta dissertação. A Seção 5.1 destaca a metodologia adotada, bem como as ferramentas e as métricas utilizadas no processo de avaliação. As Seções 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam os resultados obtidos em cenários com diferentes densidades de veículos, considerando a rede heterogênea IEEE 802.11p e LTE. Por fim, a Seção 5.5 exibe as considerações finais sobre o Capítulo.

5.1 METODOLOGIA

Para a avaliação do mecanismo proposto, foi aplicada a metodologia de simulações de eventos discretos. Esta técnica faz referência ao processo de aferição de um sistema baseado na esquematização de modelos, isto é, abstrações da realidade, que capturam aspectos essenciais do objeto em estudo. Em uma simulação, cada evento transcorre em um determinado instante de tempo e assinala uma mudança de estado do sistema.

A ferramenta utilizada para realizar as simulações foi o simulador OMNeT++ (VARGA; HORNIG, 2008) na versão 5.1, que se trata de uma biblioteca e estrutura de simulação *C++* extensível, modular e baseada em componentes, para a construção de *frameworks* de simulação. O OMNeT++ é uma plataforma popular para construção de simuladores de rede na comunidade científica, bem como em ambientes industriais. Além disso, foi empregada a ferramenta *INET* (KELLERBAUER; HIRSCH, 2011), uma biblioteca de modelos de código aberto para o OMNeT++ que fornece protocolos, tecnologias de rede sem fio e outros modelos, para aqueles que utilizam o simulador com a finalidade de trabalhar com redes de comunicação.

Ressalta-se ainda o emprego do simulador *SimuLTE* (VIRDIS; STEA; NARDINI, 2015), que é uma ferramenta construída sobre o OMNeT++ para simular a tecnologia LTE. Ademais, foi utilizado também o *VEINS* (SOMMER; GERMAN; DRESSLER, 2010), estrutura de simulação desenvolvida sobre o OMNeT++ para executar simulações de redes veiculares.

Para realizar a aferição da qualidade de *streaming* de vídeo, foi feito uso do *Evalvid* (KLAUE; RATHKE; WOLISZ, 2003), que é um *framework* para avaliar a qualidade de um vídeo transmitido em uma rede de comunicação real ou simulada. O *Evalvid*, além de possibilitar a avaliação de métricas de QoS, fornece uma análise consistente sobre o *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR), que é uma das métricas principais para determinar a qualidade de um vídeo.

5.1.1 Aplicações

Para avaliar a eficiência do mecanismo proposto no Capítulo 4, foram consideradas três aplicações em execução nos veículos, a saber: WWW, VoIP e *Streaming* de Vídeo.

- **Aplicação WWW**: É uma aplicação que simula uma navegação *web*, onde o cliente realiza uma requisição e o servidor retorna uma resposta. Em um cenário VANETs será comum os passageiros de veículos navegarem pela *Internet* . A aplicação WWW utilizada faz parte do pacote de aplicações da estrutura INET.
- **Aplicação VoIP**: Conhecida também como serviço de telefonia por *Internet*, é uma aplicação que permite a transmissão de voz por IP, ou seja, é a entrega de comunicações de voz e sessões *multimídias* através da *Internet*. Com a popularização dos serviços de banda larga de *Internet*, os serviços VoIP têm se destacado como aplicação promissora para ampliar as diversidades de comunicações. Em um ambiente de redes veiculares, o VoIP se apresenta como um serviço oportuno para a comunicação dos passageiros dos veículos. A aplicação VoIP utilizada também faz parte do pacote de aplicações da ferramenta INET.
- ***Streaming* de Vídeo**: É uma aplicação onde o cliente recebe um vídeo de um provedor em tempo real. Com a evolução das redes móveis, os serviços de *streaming* se popularizaram no mundo. Em um cenário de redes veiculares, as aplicações de *streaming* de vídeo surgem como ferramentas de entretenimento para os passageiros dos veículos.

Para aplicar o *streaming* de vídeo nos experimentos, foi feito uso dos protocolos *Real-Time Transport Protocol* (RTP) e *User Datagram Protocol* (UDP), da biblioteca INET, no servidor de aplicação e nos veículos. Além disso, o vídeo utilizado foi o *Akiyo (University)*, que contém 300 quadros e resolução 352x288, e é utilizado amplamente pela comunidade acadêmica para realizar testes de QoE.

5.1.2 Métricas

As métricas utilizadas em cada aplicação, para a avaliação do desempenho da proposta desta dissertação, estão descritas abaixo.

- **Atraso Fim a Fim**: É tempo que um pacote leva para ser transmitido da origem e ser entregue ao destino. No caso desta dissertação, é o tempo que um pacote leva para sair do servidor na nuvem e chegar até o veículo.
- ***Jitter***: O *jitter* é uma variação do atraso, isto é, a diferença de tempo entre a chegada de cada pacote até o destino. Quando determinados pacotes seguem rotas diferentes da origem até o destino, o tempo de chegada pode sofrer variações, e isto pode afetar o desempenho de aplicações do usuário final.

- **Perda de Pacotes**: É a métrica que se refere a quantidade de pacotes que são perdidos na transmissão da origem até o destino. Gargalos, estouro de filas e quebra de conexão são alguns dos fatores que ocasionam a perda de pacotes na rede. Este fato pode degradar a qualidade de serviço e o desempenho da aplicação.

- **PSNR**: É a relação entre a energia máxima de um sinal original (potência) e o ruído que afeta a qualidade de sua representação (HUYNH-THU; GHANBARI, 2008); (ZAIDI; BITAM; MELLOUK, 2017). Habitualmente, o PSNR é utilizado para medir o QoE de um vídeo, por exemplo. Ele pondera a qualidade de um vídeo em valores decibéis, realizando a comparação do vídeo original com o arquivo que foi transmitido para o receptor. A Tabela 4 apresenta a relação entre os valores de PSNR e a sua qualidade.

Tabela 4 – Qualidade do valor do PSNR

PSNR	> 37	31 - 37	25 - 31	20 - 25	< 20
Qualidade	Excelente	Bom	Aceitável	Baixo	Péssimo

Fonte: (SANTOS, 2019)

5.1.3 Parâmetros de Simulação

A seguir, serão descritos os parâmetros de simulação utilizados nos experimentos.

- **Tempo de Simulação (s)**: Refere-se ao tempo total em que ocorrem os eventos discretos do sistema. Especificamente nesta dissertação, foi adotado o valor de 120 segundos para o tempo das simulações em todos os cenários de testes.

- **Quantidade de veículos**: É o número total de veículos que trafegam em cada cenário. Em relação ao trabalho em destaque, foram adotados três cenários de testes. O primeiro cenário com 6 veículos, o segundo cenário com 16 veículos e, por fim, o terceiro cenário com 31 veículos.

- **Tamanho de pacote (B)**: Refere-se ao tamanho dos pacotes de cada aplicação em execução. Especificamente para as aplicações WWW e VoIP, foram utilizados os valores 1000 *bytes* (B) e 512 *bytes* (B) (MAJEED; FLEURY, 2014); (WU; OBAIDAT; CHAN, 2015), respectivamente.

- **Velocidade (m/s)**: Refere-se à velocidade com que os veículos trafegam nos cenários. Neste trabalho, os veículos se movimentam com velocidades variadas, que correspondem aos valores de 15m/s, 20m/s e 30m/s ((HASSOUNE; MAAZA; SENOUCI, 2017)); ((SMIDA; FANTAR; YOUSSEF, 2018)); ((DUO et al., 2018)). O objetivo da variação deste parâmetro é avaliar os impactos do *handoff* na conexão sem fio, e

consequentemente nas aplicações executadas, quando o veículo estiver trafegando com essas velocidades.

- **Topologia**: Faz referência aos elementos arquiteturais essenciais dos cenários. Nos três cenários foram utilizados 4 roteadores, 4 RSUs, 1 eNodeB e 1 controlador central. O cenário de simulação consiste em um plano com área de 2200m X 900m, onde os veículos se locomovem de forma linear, com velocidades de 15m/s, 20m/s e 30m/s em cada caso analisado. Além disso, as células de cobertura das quatro RSUs se intersectam duas a duas, ou seja, RSU1 com a RSU2, RSU2 com a RSU3 e a RSU3 com a RSU4, em sentido linear. Ademais, o raio de cobertura da eNodeB cobre toda a área do plano.
- **Modelo de mobilidade**: É o modelo como os veículos se locomovem em cada cenário de teste. Nos três cenários, os veículos se locomovem linearmente entre as coberturas das RSUS.
- **Modelo de propagação**: São funções matemáticas que representam o deslocamento de ondas de rádio no meio.

A Tabela 5 faz um resumo dos parâmetros de simulação adotados nos cenários.

Tabela 5 – Parâmetros de Simulação

Parâmetros	**Valores**
Tempo de simulação	120s
Quantidade de veículos	6, 16 e 31
Tamanho de pacote da aplicação	WWW = 1000B e VoIP = 512B
Velocidade	15m/s, 20m/s e 30m/s
Roteadores	4
RSUs	4
eNodeB	1
Controlador	1
Modelo de mobilidade	Linear
Modelo de propagação	Two-Ray

O mecanismo proposto foi avaliado em termos de métricas de QoS (atraso fim a fim, perda de pacotes e *jitter*) e QoE (PSNR), medidas durante a ocorrência dos *handoffs* e com o usuário do veículo consumindo serviços da aplicação WWW, VoIP e *streaming* de vídeo. Seus resultados foram comparados àqueles obtidos com o uso da abordagem baseada somente no RSSI e sem a programabilidade da rede, denotada como tradicional. Nela, o disparo do *handoff* e a seleção do ponto de acesso ou BS para onde a conexão será transferida considera apenas a intensidade do sinal (ex. RSSI), onde o primeiro acontece

quando o RSSI está abaixo de um dado limiar (ex. -65dBm) e o segundo seleciona a BS/AP com maior valor de RSSI (AHMED; BOULAHIA; GAITI, 2013).

5.1.4 Cenários de simulação

Para a avaliação de desempenho do mecanismo proposto nesta dissertação, foram esquematizados 3 cenários distintos de simulação.

- **Cenário com 6 veículos**: No primeiro cenário de simulação foram inseridos 6 veículos com velocidades variadas conforme apresentado na Tabela 5.
- **Cenário com 16 veículos**: O segundo cenário foi estendido para 16 veículos, ou seja, dez veículos a mais em relação ao primeiro cenário. O objetivo é verificar o comportamento e eficiência do mecanismo proposto perante o aumento da quantidade de veículos na rede.
- **Cenário com 31 veículos**: No terceiro cenário de simulação foram adicionados 30 veículos, quinze a mais que o segundo cenário e vinte e cinco a mais que o primeiro. O propósito é analisar a eficiência e o desempenho do mecanismo concernente à extensão da quantidade de veículos na rede.

Em razão dos recursos computacionais limitados, fator que inviabilizou a manipulação do grande volume de dados gerados pelas simulações e registrados em memória, foram extraídos os dados das métricas das aplicações de um nó móvel. Além disso, em cada simulação os veículos trafegam com 1 tipo de velocidade, sendo que a cada experimento feito, é realizada a variação da velocidade, isto é, 15m/s, 20m/s e 30m/s.

Neste trabalho, foi considerado 95% de nível de confiança para as análises e coletas dos dados, sendo que, para garantir a confiabilidade dos valores coletados, as simulações para cada cenário e velocidade foram executadas 30 vezes. As seções a seguir detalham os resultados alcançados em cada cenário de simulação.

5.2 CENÁRIO COM 6 VEÍCULOS

Esta Seção destaca o primeiro cenário de simulação realizada, com o objetivo de avaliar o desempenho do mecanismo proposto nesta dissertação. Neste cenário foram inseridos 6 veículos, cada um executando as três aplicações destacadas anteriormente, e foram coletados 18 resultados ao todo, isto é, para cada métrica das aplicações foram destacados 3 resultados, originados dos valores distintos da velocidade.

5.2.1 Resultados obtidos

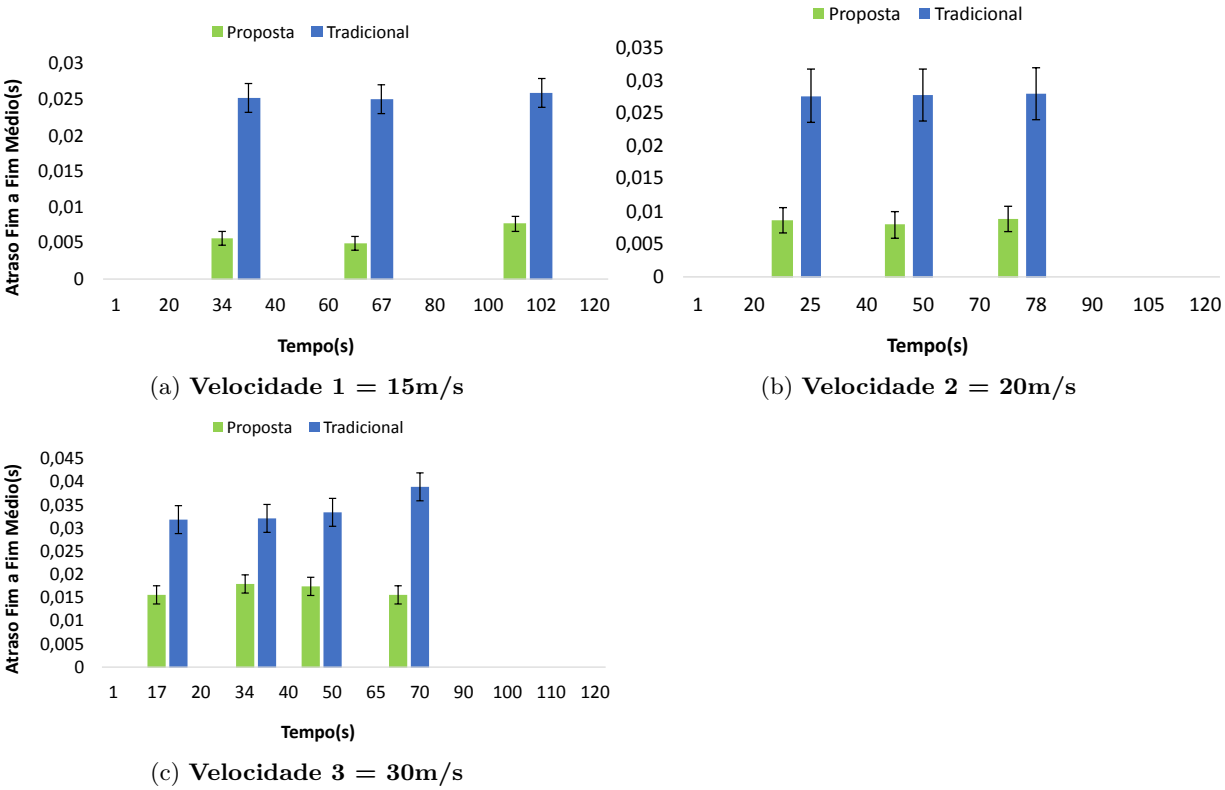
Para análise da eficiência do mecanismo proposto, cada veículo trafega com velocidades distintas (conforme a Tabela 5) e de forma linear no cenário. As métricas de desempenho

foram coletadas de um veículo durante toda a simulação. O objetivo é analisar o comportamento do atraso fim a fim, do *jitter*, da perda de pacotes e do PSNR no momento em que ocorre o *handoff*.

A Figura 16 apresenta o comparativo do comportamento do atraso fim a fim dos pacotes da aplicação WWW, entre o mecanismo de *handoff* tradicional e o mecanismo proposto nesta dissertação, quando o veículo se movimenta com as velocidades 15m/s, 20m/s e 30m/s.

Na Figura 16, é observado que a atenuação do impacto do *handoff* no atraso de pacotes é maior com o mecanismo proposto do que com as propostas tradicionais, ou seja, o pico de tempo no atraso é menor com a estratégia apresentada neste trabalho durante o *handoff*, com o veículo em 3 velocidades diferentes. Nas velocidades 1 e 2 a média do atraso fim a fim ficou abaixo dos 0,008s com o método proposto, e acima dos 0,020s com as técnicas tradicionais, nos pontos onde ocorrem o *handoff*. Na velocidade 3 o mecanismo proposto manteve o atraso de pacotes abaixo dos 0,017s, e, com os mecanismos tradicionais de decisão, o atraso fim a fim ficou acima dos 0,033s.

Figura 16 – Atraso fim a fim na aplicação WWW no cenário com 6 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

Quando o veículo estava em uma velocidade de 15m/s, o mecanismo proposto reduziu a latência média de pacotes em 75%, quando comparado às técnicas tradicionais nos pontos onde ocorrem o *handoff*. Quando o veículo estava trafegando com velocidade de 20m/s, a eficiência do mecanismo apresentado teve uma taxa média de 70% em comparação com os mecanismos tradicionais, e quando a velocidade variou para 30m/s, a taxa média de

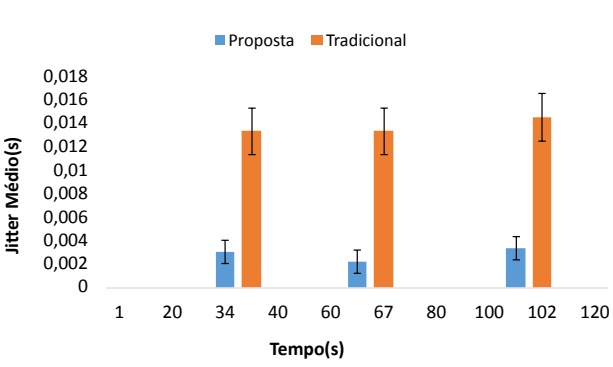
eficiência foi de 50% na redução do atraso fim a fim, durante o processo de transferência de conexão.

Observa-se ainda, quando o veículo está em uma velocidade de 30m/s, a partir dos 70s de simulação, os valores do atraso médio atingem o pico de 0,041s com o sistema tradicional. Isso ocorreu porque o veículo ficou sem cobertura IEEE 802.11p, e teve sua conexão migrada para o LTE, causando, momentaneamente, a interrupção do serviço. Com o sistema proposto, o veículo também perde a área de cobertura IEEE 802.11p, mas o controlador, através da visão global, dispara o *multihoming* com o LTE de forma antecipada, para que a conexão do veículo não seja quebrada. Com isso, o atraso foi de apenas 0,015s no mesmo instante.

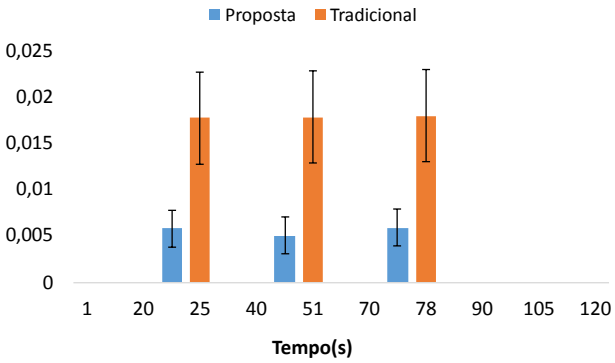
Desse modo, é possível constatar que o mecanismo proposto tem melhor desempenho em assegurar o QoS para execução satisfatória da aplicação. Os melhores resultados obtidos na comparação se deve à tomada de decisão eficiente e instantânea da estratégia proposta com AHP, juntamente com o esquema de *multihoming* e gerenciamento SDN, apresentados neste trabalho.

A Figura 17 exibe a comparação do mecanismo proposto com a proposta tradicional de *handoff* em relação aos gráficos de *jitter* da aplicação WWW, com o veículo transitando a 15m/s, 20m/s e 30m/s.

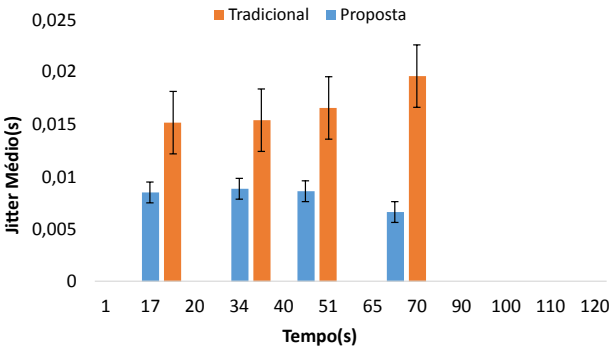
Figura 17 – *Jitter* na aplicação WWW no cenário com 6 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

Na Figura 17 constata-se que o mecanismo de *handoff* proposto é mais eficiente que as propostas tradicionais, no que diz respeito ao comportamento do *jitter* da aplicação

WWW. Durante as velocidades 1 e 2, nos pontos onde ocorreram o *handoff*, o *jitter* se manteve abaixo de 0,004s e 0,007s, respectivamente, com a técnica proposta, e acima de 0,014s com as abordagens tradicionais. Na velocidade 3, nos pontos onde o *handoff* foi disparado, o *jitter* ficou abaixo de 0,009s com o sistema de decisão proposto, e acima de 0,015s com as técnicas tradicionais.

Quando a velocidade era de 15m/s, o mecanismo proposto reduziu o *jitter* médio de pacotes em 79%, quando comparado às técnicas tradicionais, nos pontos onde ocorreram a transferência de conexão. Quando a velocidade do veículo foi aumentada para 20m/s, a taxa de eficiência na redução do *jitter*, pelo sistema proposto, foi de 68% em relação às técnicas tradicionais. Por fim, com a variação da velocidade para 30m/s, o sistema proposto reduziu os valores de *jitter* em 50% quando comparado ao sistema de decisão tradicional de *handoff*.

Similarmente ao gráfico da Figura 16, a partir dos 70s de simulação, com o veículo na velocidade 3, o valor do *jitter* atingiu um pico maior quando o veículo teve sua conexão perdida com o IEEE 802.11p, e estabelecida com o LTE, nas abordagens tradicionais. O *jitter* médio atingiu o pico de 0,019s com o sistema tradicional. De maneira contrária, o mecanismo proposto aciona o *multihoming* de forma antecipada, ou seja, o controlador central notifica a camada intermediária à fazer o *multihoming* com o LTE, antes que a cobertura IEEE 802.11p seja perdida. Com isso, no mesmo instante de tempo, o valor do *jitter* médio foi de 0,006s.

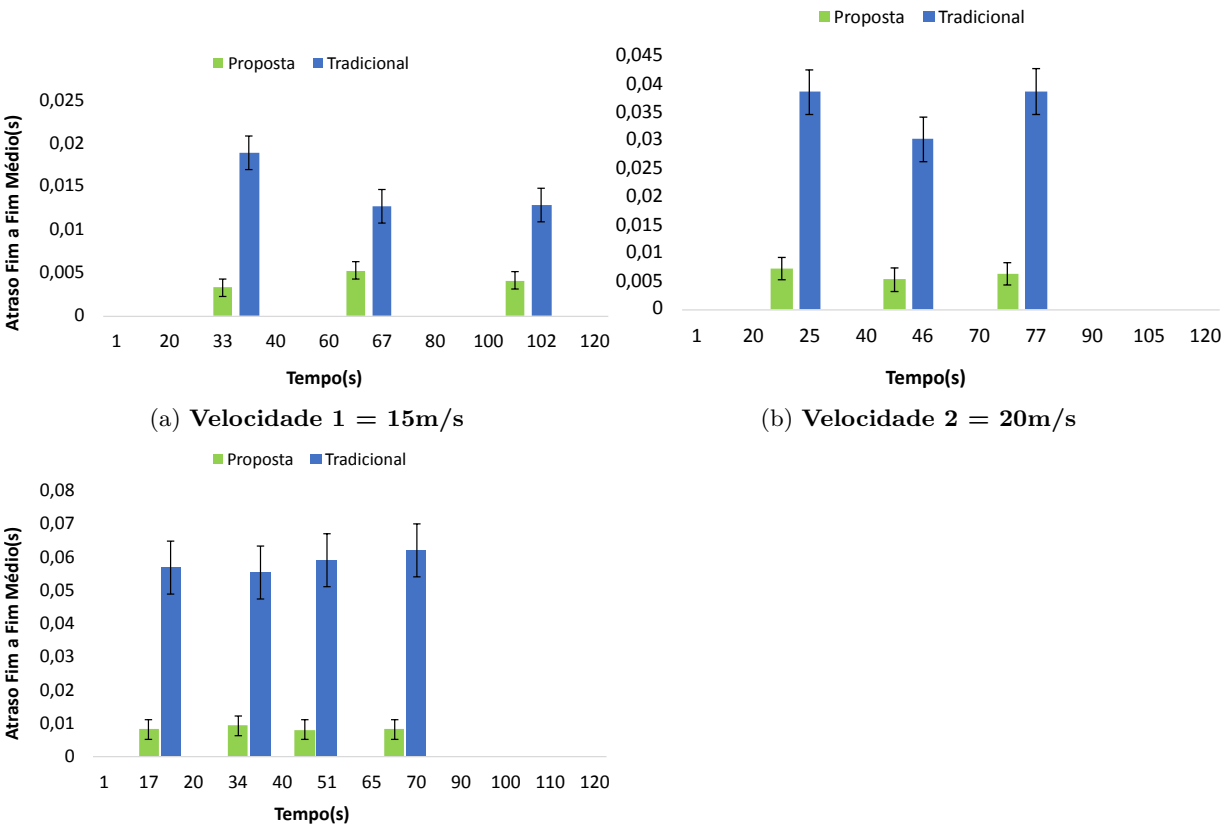
Logo, nota-se que o sistema de decisão proposto neste trabalho tem melhor eficiência em relação ao sistema de decisão tradicional de *handoff*, já que os valores de *jitter* foram menores no momento do disparo do procedimento. A eficiência e o bom desempenho do mecanismo ocorrem em razão da sinergia entre o agente decisor desenvolvido com o AHP, juntamente com o gerenciamento da rede com SDN e o esquema *multihoming*.

A Figura 18 apresenta o comparativo dos gráficos do atraso fim a fim dos pacotes da aplicação VoIP, entre o mecanismo de *handoff* tradicional e o sistema de decisão proposto nesta dissertação.

Conforme abordado em (MUSHTAQ et al., 2015); (BROSH et al., 2010) e (MUSHTAQ; SHAHID; FOWLER, 2012), o atraso máximo de pacotes que uma aplicação VoIP tolera é de 100ms, ou seja, 0,1s. Nas velocidades 1, 2 e 3, nos pontos onde ocorre o *handoff*, o sistema de decisão de transferência de conexão proposto manteve o atraso médio de pacotes da aplicação nos valores de 0,005s, 0,007s e 0,009s, respectivamente. Enquanto isso, a latência dos pacotes da mesma aplicação alcançou valores médios de 0,019s, 0,039s e 0,058s nos mesmos instantes de simulação, com o sistema tradicional.

Com o veículo se movendo à uma velocidade de 15m/s, o sistema de *handoff* proposto nesta dissertação reduziu em 70% o atraso médio de pacotes da aplicação VoIP, em comparação com o sistema tradicional de decisão. Com a variação da velocidade para 20 m/s, a eficiência do mecanismo proposto foi de 82%, concernente à redução do atraso médio

Figura 18 – Atraso fim a fim na aplicação VoIP no cenário com 6 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

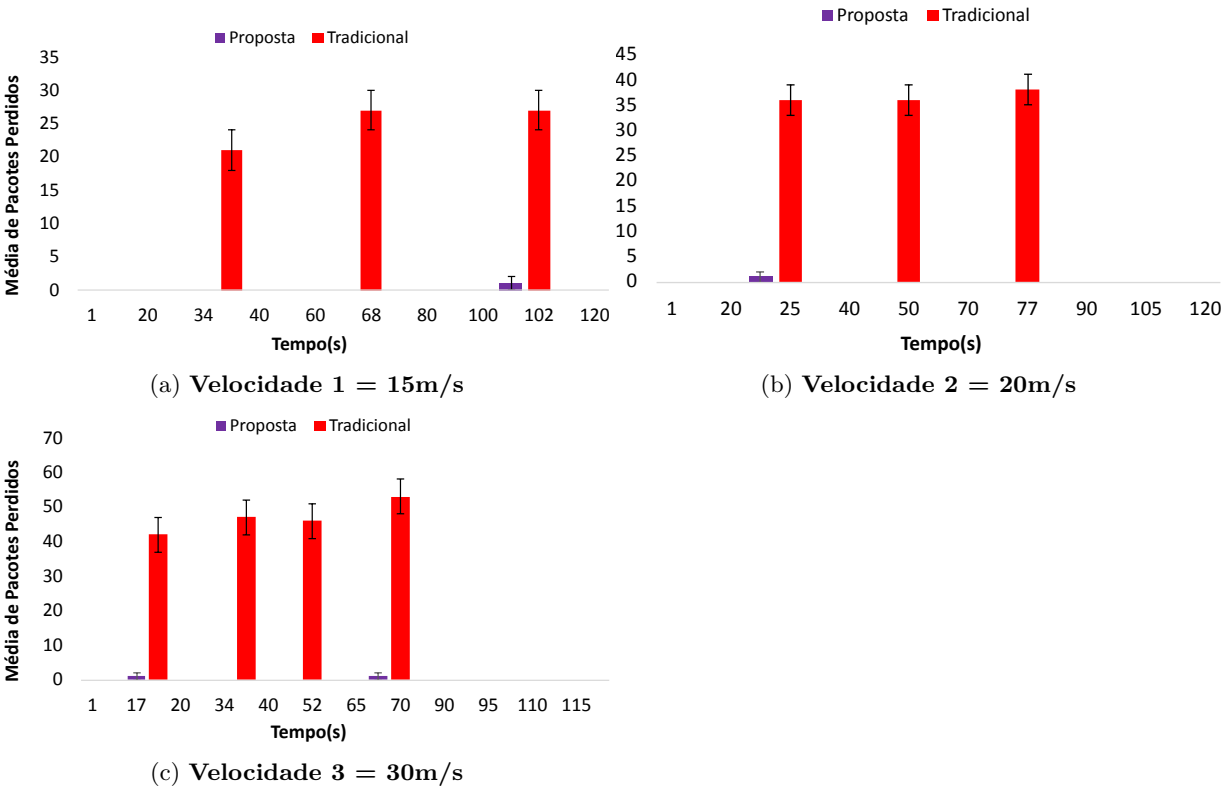
de pacotes, se comparado com o mecanismo tradicional de decisão. Por último, quando o veículo passou a trafegar com uma velocidade de 30m/s, o atraso médio de pacotes da aplicação VoIP foi reduzido em mais de 85%, tendo maior eficiência em relação ao sistema tradicional de *handoff*.

Ressalta-se também o fato do veículo, na velocidade 3, a partir dos 70s de simulação, ter sua cobertura IEEE 802.11p perdida e, em seguida, ter sua conexão estabelecida no LTE, causando interrupção temporária no serviço. Em razão disso, o pico do atraso médio no sistema tradicional, no chaveamento de rede, foi de 0,062s. Em contrapartida, no sistema proposto, o controlador da rede, através de sua visão global, dispara a ação de *multihoming* com o LTE para a camada intermediária, antes que o veículo perca a cobertura de sua RSU. Com essa estratégia, o serviço não foi interrompido e o atraso médio de pacotes foi de apenas 0,0082s, no mesmo instante.

Portanto, é possível inferir que o mecanismo proposto atenua de forma eficaz os impactos do *handoff* na aplicação VoIP, mantendo o QoS desejável para a execução satisfatória da aplicação no lado do usuário.

A Figura 19 exibe o gráfico de comparação entre o sistema de decisão proposto e as técnicas tradicionais de *handoff*, em termos de perdas de pacotes na aplicação VoIP, com o veículo em diferentes velocidades.

Figura 19 – Perda de pacotes na aplicação VoIP no cenário com 6 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

Segundo os estudos de (LYKOURGIOTIS; KOTSOPOULOS; DAGIUKLAS, 2012);(VOZNAK; KOVAC; HALAS, 2012) e (GUO; QUDDUS; TAFAZOLLI, 2012), a aplicação VoIP tem sensibilidade muito alta em relação à perda de pacotes, pois, diferentemente da aplicação WWW, por exemplo, que pode ter um pacote retransmitido, não há viabilidade em retransmissão de pacotes em uma chamada VoIP. Por este motivo, é necessário que durante o *handoff* a perda de pacotes seja o mínimo possível.

Conforme demonstra o gráfico da Figura 19, enquanto as abordagens tradicionais de *handoff* propiciaram perda média acima de 25 pacotes com o veículo em velocidades de 15m/s, 20m/s e 30m/s, durante o processo de transferência, o mecanismo proposto neste trabalho perdeu apenas 1 pacote com os 3 valores de velocidade durante as ocorrências do *handoff*.

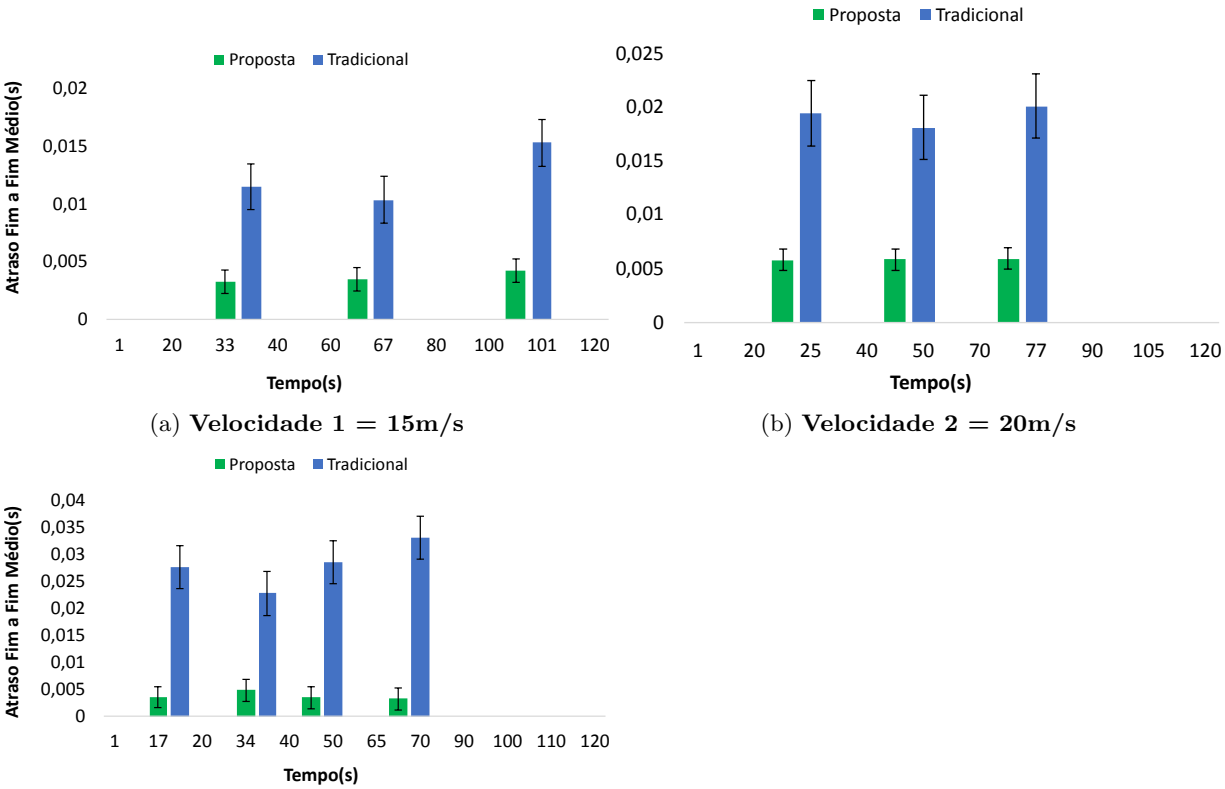
É interessante observar que a partir dos 70s de simulação, com o veículo se movendo à 30m/s, o sistema tradicional de decisão perdeu 53 pacotes. Isso ocorreu pelo mesmo motivo no atraso fim a fim, isto é, o veículo perde a cobertura da RSU IEEE 802.11p, e a sua conexão é chaveada para o LTE. Com o arcabouço proposto, o *multihoming* com o LTE é disparado antes que a cobertura da RSU para o veículo seja perdida. Isso faz com que apenas um pacote seja perdido no mesmo ponto da simulação.

Logo, a aplicação VoIP sofre menos impactos concernente à perda de pacotes com o sistema de decisão proposto, do que com as técnicas tradicionais de *handoff*. A decisão do controlador é precisa e instantânea, garantindo que a perda de pacotes seja o mínimo

possível.

A Figura 20 expõe o gráfico de comparação entre o mecanismo de decisão de *handoff* proposto nesta dissertação e o sistema de decisão tradicional. O gráfico mostra o comportamento do atraso fim a fim de pacotes do *streaming* de vídeo com o veículo trafegando em 3 velocidades distintas.

Figura 20 – Atraso fim a fim no *streaming* de vídeo no cenário com 6 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

Na Figura 20 é observado que a redução do impacto do *handoff* no atraso de pacotes é mais eficiente com o mecanismo proposto do que com os sistemas de decisão tradicionais, ou seja, o pico de tempo no atraso é menor com a estratégia proposta. Nas velocidades 1, 2 e 3 o atraso fim a fim médio fica abaixo dos 0,007s com o sistema proposto. Já com a abordagem tradicional, os valores médios do atraso fim a fim permanecem acima dos 0,011s e 0,019s nas velocidades 1 e 2, respectivamente, e acima dos 0,025s com a velocidade 3.

Quando a velocidade era de 15m/s, o mecanismo proposto reduziu o atraso médio de pacotes em 70%, quando comparado às técnicas tradicionais, nos pontos onde ocorreu o *handoff*. Quando a velocidade do veículo foi ampliada para 20m/s, a taxa de eficiência na redução do atraso de pacotes do sistema proposto foi de 70% em relação às técnicas tradicionais. Por fim, com a variação da velocidade para 30m/s, o sistema proposto reduziu os valores do atraso fim a fim em 86%.

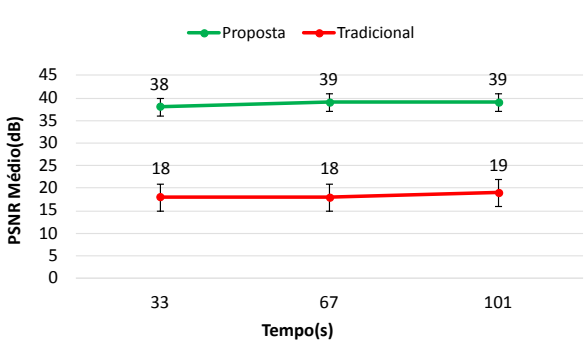
É importante ressaltar, também, o fato do veículo ficar sem cobertura IEEE 802.11p,

e ter sua conexão ancorada no LTE a partir dos 70s de simulação em uma velocidade de 30m/s, com o emprego das técnicas tradicionais de *handoff*. Este evento, de desconexão e conexão, causa interrupções no serviço, fazendo com que o pico do atraso médio de pacotes ficasse em 0,033s. Por outro lado, com o mecanismo proposto, a perda da área de cobertura IEEE 802.11p no veículo é um fenômeno que ocorre sem danos à aplicação, pois o agente centralizado da rede dispara a execução do *multihoming* com o LTE para a camada intermediária, antes que a cobertura da RSU seja perdida. Dessa forma, o atraso médio no *streaming* de vídeo ficou em 0,0032s, no mesmo instante de tempo.

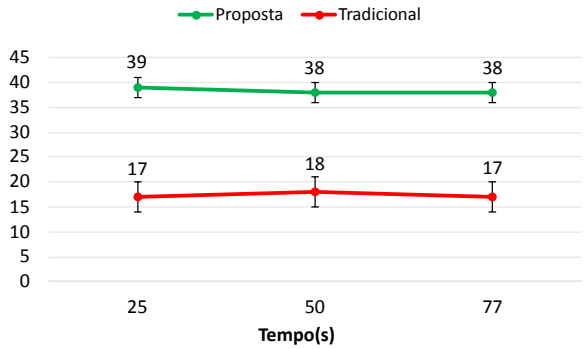
Logo, é plausível inferir que o mecanismo proposto é mais eficiente que as técnicas de decisão tradicionais, em termos de atraso de pacotes em aplicação de *streaming*. Infere-se, também, que o sistema proposto, através do agente decisor com AHP, do gerenciamento da rede com SDN e do emprego da técnica de *multihoming*, assegura o QoS necessário para manter o desempenho satisfatório da aplicação de *streaming* no lado do usuário.

A Figura 21 apresenta o gráfico de comparação do PSNR do *streaming* de vídeo entre o mecanismo proposto e as técnicas de decisão tradicionais.

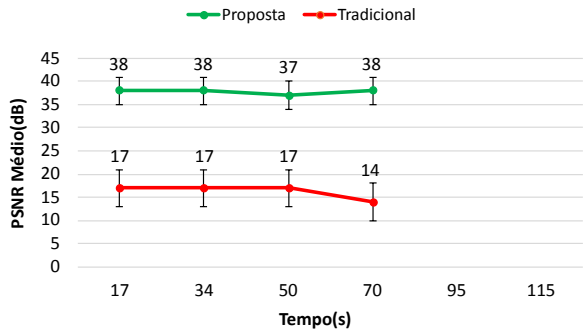
Figura 21 – PSNR do *streaming* de vídeo no cenário com 6 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

O PSNR, como destacado anteriormente, é utilizado para avaliar o QoE de uma aplicação. Um PSNR acima de 25dB enfatiza que o vídeo está em uma boa qualidade, isto é, condição aceitável pelo usuário. Na Figura 21 constata-se que, nos instantes de tempo em que o *handoff* é acionado, o PSNR fica acima de 37dB com o mecanismo proposto, ou

seja, a qualidade do vídeo permanece excelente com o veículo em 3 velocidades distintas. De forma contrária, com as técnicas de decisão tradicionais, o PSNR fica abaixo dos 20dB durante as ocorrências de *handoffs* com o veículo em 3 velocidades diferentes, denotando má qualidade do vídeo no lado do usuário.

Com o mecanismo proposto, o ganho médio do PSNR foi de 52%, se comparado com as abordagens tradicionais de *handoff*, quando o veículo estava em uma velocidade de 15m/s. Quando a velocidade foi variada para 20m/s, o ganho médio do PSNR foi de 54% em relação ao sistema tradicional. Por fim, com a velocidade do veículo em 30m/s, o ganho médio do PSNR foi de 56% com o mecanismo proposto.

Acrescenta-se ainda o fato do mecanismo proposto manter a conexão do veículo ininterrupta, quando este está em uma velocidade de 30m/s, se comparado com as técnicas tradicionais. Este fenômeno é evidenciado no gráfico, a partir dos 70s de simulação, quando o último registro do PSNR, com o sistema proposto, permanece em 38dB. Com as políticas tradicionais, o PSNR fica em 14dB no último registro, pois a conexão do veículo é quebrada, isto é, a cobertura IEEE 802.11p é perdida e, em seguida, a conexão é estabelecida no LTE.

O bom desempenho do mecanismo proposto ocorre em razão da decisão instantânea e eficiente de disparo do *handoff* por parte do agente desenvolvido com AHP, juntamente com o gerenciamento via SDN da rede e o emprego do *multihoming*. Dessa maneira, o sistema de decisão assegura o QoE necessário para o desempenho satisfatório da aplicação no lado do usuário.

A Tabela 6 resume a eficiência e o desempenho do mecanismo proposto nesta dissertação em relação às técnicas tradicionais de *handoff*, no cenário com 6 veículos.

Tabela 6 – Desempenho do mecanismo de *handoff* proposto, no cenário com 6 veículos

Aplicação	WWW						VoIP						*Streaming* de vídeo					
Métrica	Atraso			*Jitter*			Atraso			Perda de pacotes			Atraso			PSNR		
Velocidade (m/s)	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30
Eficiência (%)	75	70	50	79	68	50	70	82	85	98	99	98	70	70	86	52	54	56

5.3 CENÁRIO COM 16 VEÍCULOS

Esta Seção aborda o segundo cenário de simulação, com o intuito de avaliar o desempenho do sistema de decisão proposto perante o acréscimo de veículos em relação ao cenário anterior. Neste cenário foram inseridos 16 veículos, cada um executando as aplicações

citadas anteriormente, e , de forma semelhante ao cenário anterior, foram coletados 18 resultados ao todo.

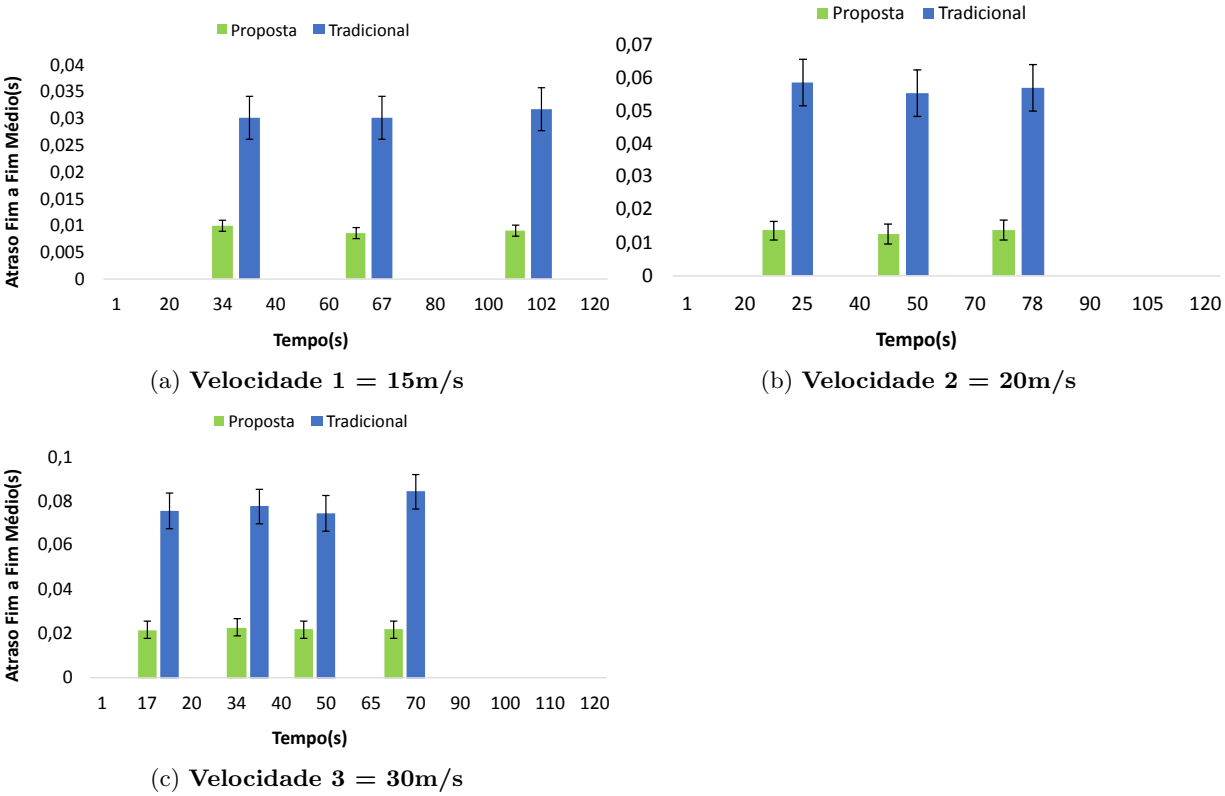
Foram coletados dados de duas métricas por aplicação e, para cada métrica, foram originados 3 resultados decorrentes dos 3 tipos de velocidades.

5.3.1 Resultados obtidos

Similarmente ao cenário anterior, neste cenário cada veículo trafega com velocidades variadas e de forma linear. Além disso, as métricas de desempenho também foram coletadas de um veículo durante toda simulação. Com base nos dados coletados, foram avaliados os comportamentos do atraso fim a fim, do *jitter*, da perda de pacotes e do PSNR, no momento em que ocorre o *handoff*.

A Figura 22 exibe o comparativo do comportamento do atraso fim a fim dos pacotes da aplicação WWW, entre o mecanismo de *handoff* tradicional e o mecanismo proposto nesta dissertação.

Figura 22 – Atraso fim a fim na aplicação WWW no cenário com 16 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

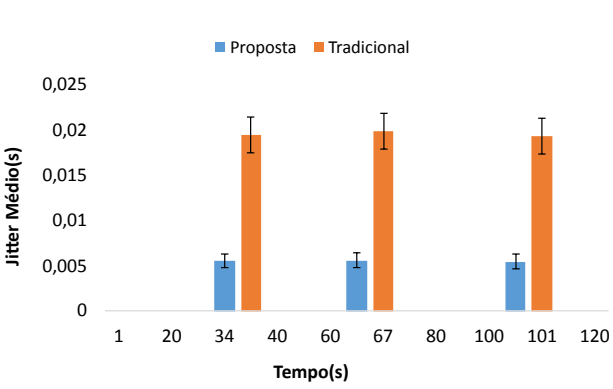
Na Figura 22 é observado que a atenuação do impacto do *handoff* no atraso de pacotes é maior com o mecanismo proposto do que com as propostas tradicionais, ou seja, o pico de tempo no atraso é menor com o método proposto. Nas velocidades 1 e 2 o atraso médio de pacotes ficou abaixo de 0,015s com o mecanismo proposto, e na velocidade 3 não passou dos 0,022s. No entanto, com a abordagem tradicional, o atraso médio ficou em 0,03s com a velocidade 1, 0,059s com a velocidade 2 e 0,078s na velocidade 3.

Quando o veículo estava em uma velocidade de 15m/s, o mecanismo proposto reduziu a latência média de pacotes em 70%, quando comparado às técnicas tradicionais. Quando o veículo passou a trafegar em uma velocidade de 20m/s, a eficiência do mecanismo proposto teve uma taxa média de eficiência de 75%, em comparação com os mecanismos tradicionais de *handoff*. E quando a velocidade foi alterada para 30m/s, a taxa média de eficiência foi de 71% na redução do atraso fim a fim durante o processo de transferência de conexão.

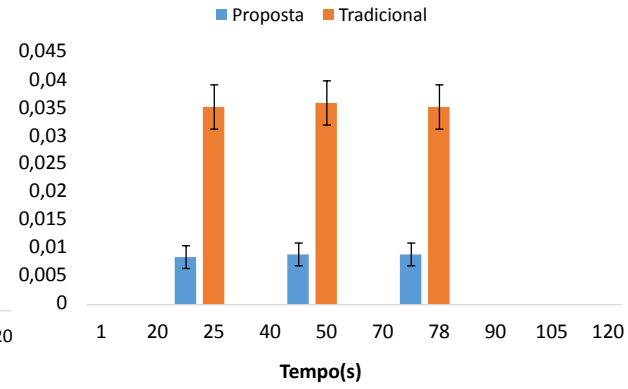
É interessante observar, também, que na velocidade 3, após os 70s de simulação, o valor do atraso médio atinge o pico de 0,084s na abordagem tradicional. Isto ocorreu porque o veículo perdeu a área de cobertura de sua RSU, e teve, posteriormente, sua conexão estabelecida no LTE, ou seja, houve a desconexão e a conexão, configurando uma interrupção temporária no serviço. Com o arcabouço apresentado nesta dissertação, o atraso médio ficou em 0,021s no mesmo ponto de simulação, pois o *multihoming* com o LTE é antecipado no gerenciamento SDN, evitando que o veículo sofra a quebra da comunicação com a infraestrutura de serviço.

A Figura 23 apresenta a comparação gráfica do mecanismo proposto com a proposta tradicional de *handoff*, concernente aos valores de *jitter* da aplicação WWW.

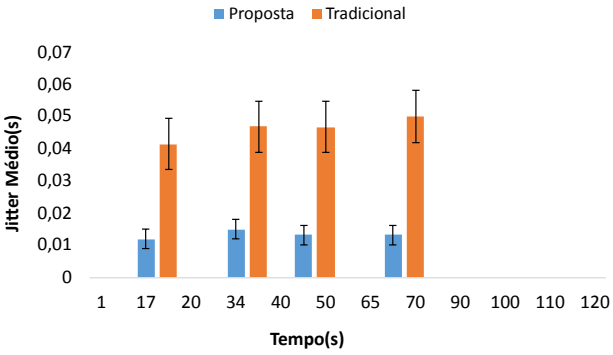
Figura 23 – *Jitter* na aplicação WWW no cenário com 16 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

O gráfico deixa notório que o mecanismo de *handoff* proposto é mais eficiente que as propostas tradicionais, concernente ao comportamento do *jitter* da aplicação WWW.

Com o sistema de decisão proposto, na velocidade 1 o *jitter* médio ficou abaixo dos 0,006s, abaixo dos 0,01s com o veículo na velocidade 2, e abaixo dos 0,015s na velocidade 3. De forma contrária, os valores médio do *jitter* com o mecanismo tradicional de decisão foram de 0,019s, 0,035s e 0,048s nas velocidades 1, 2 e 3, respectivamente.

Com o veículo à 15m/s, a eficiência do mecanismo proposto na redução dos valores de *jitter* foi de 71% em relação à abordagem tradicional de *handoff*. Quando a velocidade foi aumentada para 20m/s, o mecanismo proposto conseguiu reduzir o *jitter* médio em 75%, e em 70% com a velocidade do carro em 30m/s.

Na velocidade 3, a partir dos 70s de simulação, o veículo fica sem área de cobertura da tecnologia IEEE 802.11p, e, em seguida, sua conexão é ancorada no sistema LTE, na abordagem tradicional. Este fato é mostrado no gráfico, quando o valor do *jitter* médio fica em 0,050s, evidenciando uma quebra na conexão do nó móvel. De forma diferente, no sistema apresentado por esta dissertação, o controlador centralizado decide que o *multihoming* com o LTE deve ser feito antes que o veículo atinja o limite da área de cobertura da sua RSU, fazendo com que o valor do *jitter*, no mesmo instante, ficasse em 0,013s.

A eficiência e o bom desempenho do mecanismo ocorrem em razão do sistema de decisão desenvolvido, utilizando o AHP, juntamente com o gerenciamento da rede com SDN e o esquema *multihoming*. A conexão do veículo não sofre degradações e, assim, o *handoff seamless* é garantido.

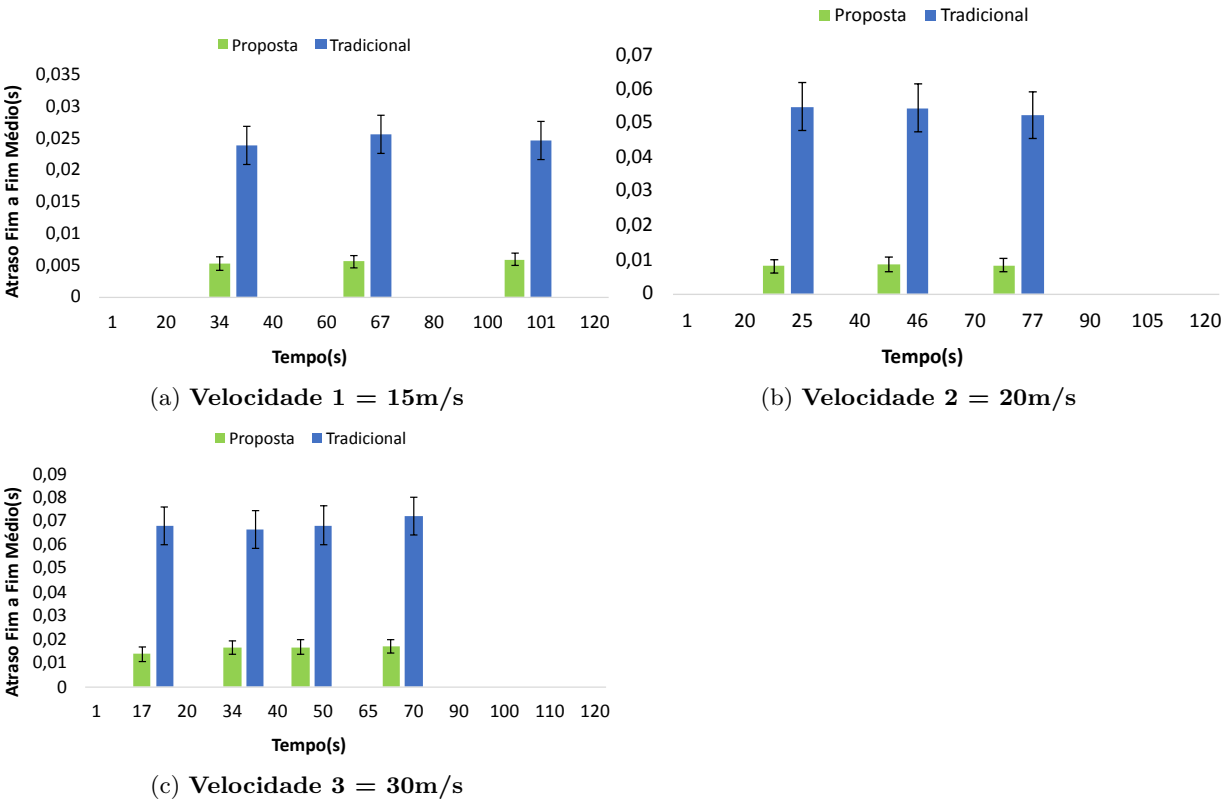
A Figura 24 demonstra a comparação entre os gráficos do atraso fim a fim dos pacotes da aplicação VoIP, do mecanismo de *handoff* tradicional e do sistema de decisão proposto nesta dissertação.

É observado, no gráfico, que o impacto do *handoff* no atraso de pacotes é menor com o mecanismo proposto do que com os sistemas de decisão tradicionais, ou seja, os valores máximos do atraso são menores com a técnica proposta, durante o *handoff*. Nas velocidades 1, 2 e 3 do veículo o atraso médio de pacotes, com o sistema de *handoff* proposto, foi de 0,005s, 0,009s e 0,015s, respectivamente. Com o sistema tradicional, os valores médio do atraso foram de 0,025s, 0,055s e 0,068s com o veículo nas velocidades 1, 2 e 3, respectivamente.

Quando a velocidade do veículo era de 15m/s, o mecanismo proposto reduziu o atraso médio de pacotes em 77%, se comparado com a abordagem tradicional. Com a velocidade variada para 20m/s, a redução do atraso médio de pacotes, com o sistema proposto, foi de 84% em relação ao mecanismo tradicional. Por fim, quando o veículo trafegava em uma velocidade de 30m/s, a eficiência do mecanismo proposto na redução da latência durante o *handoff* foi de 76%.

Outro ponto que deve ser destacado em relação à eficiência do mecanismo proposto, quando comparado aos sistemas de decisão tradicionais, é o fato destes serem incapazes de manterem a conexão do usuário ininterrupta. Isso é evidenciado no gráfico quando

Figura 24 – Atraso fim a fim na aplicação VoIP no cenário com 16 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

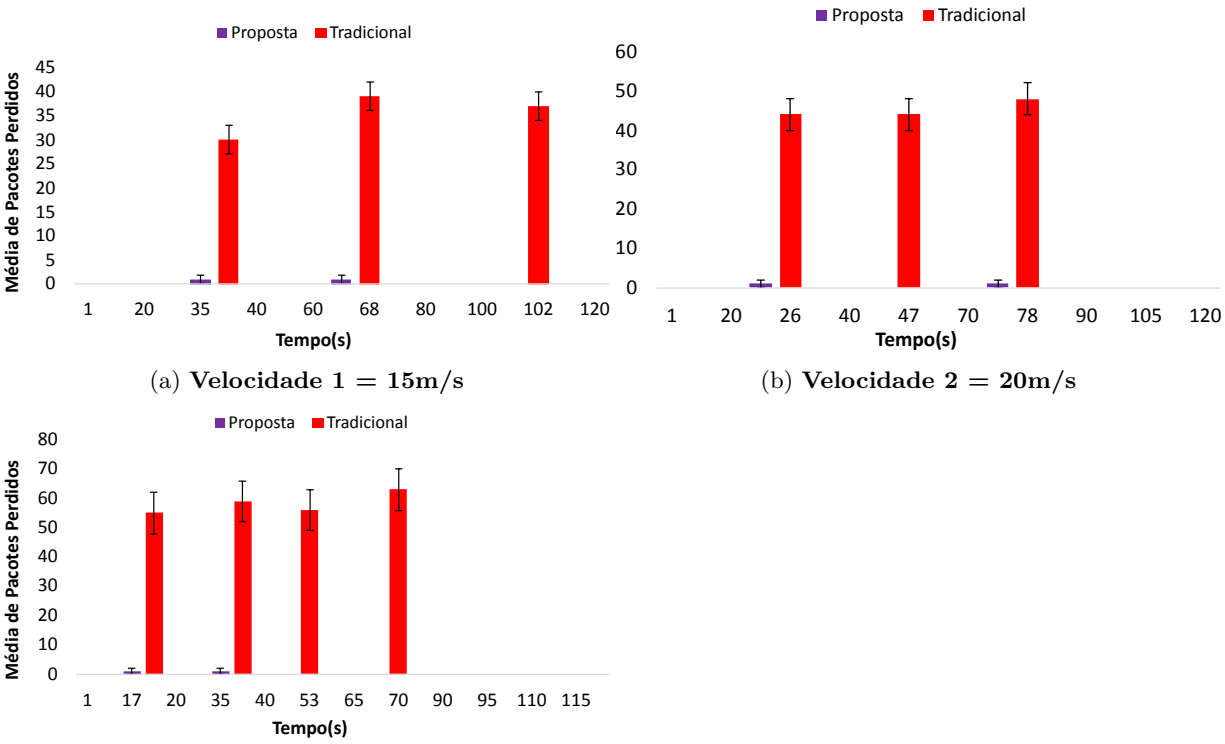
o valor do atraso médio fica em 0,072s, com a abordagem tradicional, e 0,017s com o sistema de decisão proposto nesta dissertação, a partir dos 70s de simulação. Enquanto que no sistema tradicional há a quebra de comunicação, ou seja, a desconexão com o IEEE 802.11p e conexão com o LTE, no mecanismo proposto ocorre a manutenibilidade da comunicação V2I, através do *multihoming* entre as tecnologias sem fio, associado com o gerenciamento SDN da rede.

Logo, é plausível inferir que o mecanismo proposto é mais eficiente do que as técnicas de decisão tradicionais, em termos de atraso de pacotes na aplicação VoIP. O tempo do atraso fim a fim é menor porque, além da decisão do controlador ser eficiente e a seleção de rede ser instantânea, a camada de infraestrutura realiza o *multihoming* entre padrão IEEE 802.11p e o LTE via SDN. É importante ressaltar que o sistema proposto, através da estratégia com AHP, do gerenciamento da rede com SDN e do emprego da técnica de *multihoming*, assegura o QoS necessário para manter o desempenho satisfatório da aplicação VoIP no lado do usuário.

A Figura 25 exibe o gráfico de comparação entre o sistema de decisão proposto e as técnicas tradicionais de *handoff*, em termos de perdas de pacotes na aplicação VoIP.

Conforme demonstra o gráfico da Figura 25, é notório que o desempenho do sistema de decisão proposto é melhor que o sistema de decisão tradicional. Enquanto as abordagens tradicionais de *handoff* ocasionaram perda média acima de 39 pacotes, com o veículo em velocidades de 15m/s, 20m/s e 30m/s, durante o processo de transferência, o mecanismo

Figura 25 – Perda de pacotes na aplicação VoIP no cenário com 16 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

proposto neste trabalho perdeu apenas 1 pacote com os 3 valores de velocidade nos pontos onde houve o *handoff*, indicando eficiência próximo dos 100% na redução de perdas.

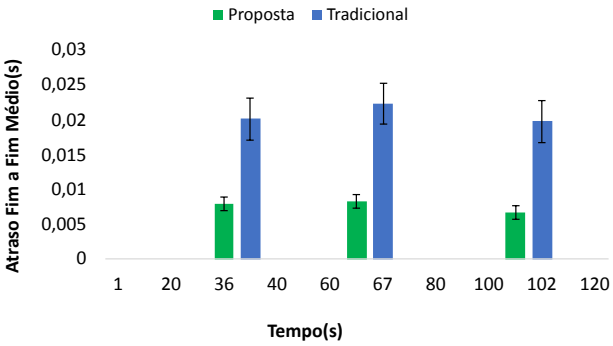
Observa-se, ainda, que a partir dos 70s de simulação, com o veículo trafegando à 30m/s, a abordagem tradicional perdeu 63 pacotes. Isso ocorreu porque o veículo perdeu a cobertura da RSU IEEE 802.11p, tendo sua conexão chaveada para o LTE, posteriormente. Com o arcabouço proposto, o *multihoming* com o LTE é disparado antes que a cobertura da RSU para o veículo seja perdida. Isso fez com que nenhum pacote fosse perdido no mesmo ponto da simulação.

A perda de pacotes é reduzida porque, além da estratégia com AHP e o gerenciamento da rede com SDN serem eficientes, o controlador central instrui a camada de infraestrutura a realizar o *multihoming* com o LTE. Por este motivo, o QoS necessário para o desempenho satisfatório da aplicação não é afetado.

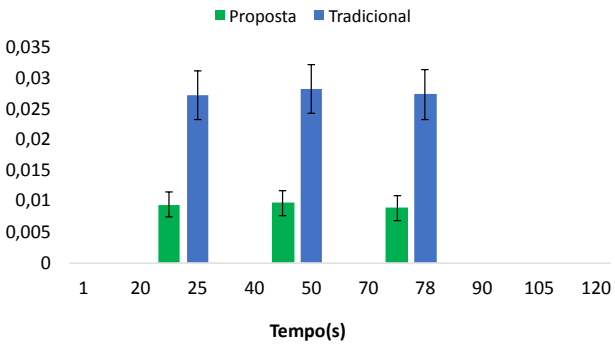
A Figura 26 expõe o gráfico de comparação entre o mecanismo de decisão proposto nesta dissertação e o sistema tradicional. O gráfico mostra o comportamento do atraso fim a fim de pacotes do *streaming* de vídeo.

No gráfico, é observado que a atenuação do impacto do *handoff* no atraso de pacotes é maior com o mecanismo proposto do que com os sistemas de decisão tradicionais, ou seja, o pico de tempo no atraso é menor com a estratégia proposta durante a transferência de conexão. Com o veículo nas velocidades 1, 2 e 3, o sistema de decisão proposto manteve o atraso médio de pacotes do *streaming* de vídeo abaixo dos 0,011s no cenário com 16

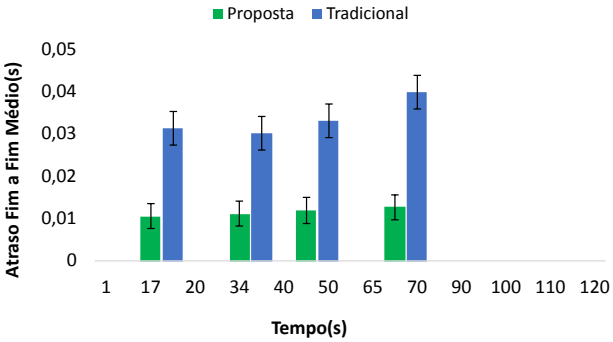
Figura 26 – Atraso fim a fim no *streaming* de vídeo no cenário com 16 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

veículos. Por outro lado, com a abordagem tradicional de *handoff*, a latência dos pacotes ficou em 0,020s na velocidade 1, 0,027s na velocidade 2 e, por fim, 0,034s na velocidade 3.

Com o veículo trafegando à uma velocidade de 15m/s, o sistema proposto reduziu o atraso médio de pacotes em 62%, quando comparado às técnicas tradicionais de *handoff*. Quando a velocidade do veículo foi variada para 20m/s, o ganho do mecanismo proposto na redução do atraso fim a fim foi de 66% em relação ao sistema tradicional. Por fim, com a velocidade do veículo alterada para 30m/s, o mecanismo proposto conseguiu reduzir o atraso médio de pacotes em 66%.

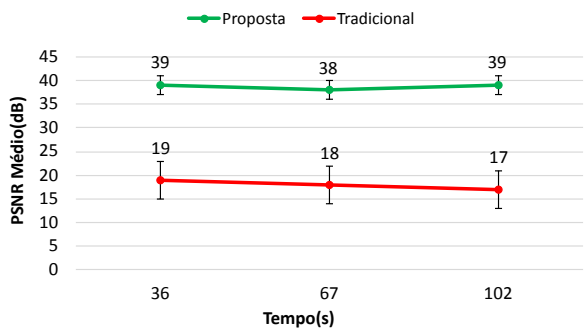
Vale ressaltar o fato do sistema proposto não deixar o *host* ficar sem área de cobertura. Com o veículo à 30m/s, após os 70s de simulação, as técnicas tradicionais não evitaram a quebra na comunicação V2I, ou seja, o veículo perdeu a conexão com sua RSU, e teve que estabelecer a comunicação com o LTE, fazendo com que o atraso médio de pacotes atingisse o pico de 0,040s. Com o mecanismo proposto, o *multihoming* com a rede LTE é acionado antes que a conexão da RSU com veículo seja perdida, mantendo ininterrupta a comunicação V2I. Com isso, o atraso médio foi mantido em 0,012s, no mesmo ponto da simulação.

Logo, é plausível inferir que o mecanismo proposto é mais eficiente que as técnicas de decisão tradicionais, em termos de atraso de pacotes em aplicação de *streaming*. É importante ressaltar que o sistema proposto, através do método com AHP, do gerenciamento da rede com SDN e do emprego da técnica de *multihoming*, assegura o QoS necessário

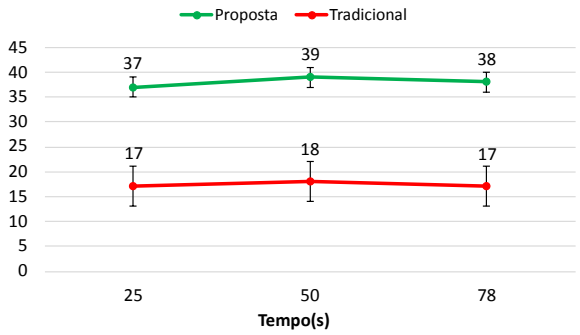
para manter o desempenho satisfatório da aplicação de *streaming* no lado do usuário.

A Figura 27 exibe o gráfico do PSNR do *streaming* de vídeo com a aplicação do mecanismo proposto e com o emprego do sistema de decisão tradicional.

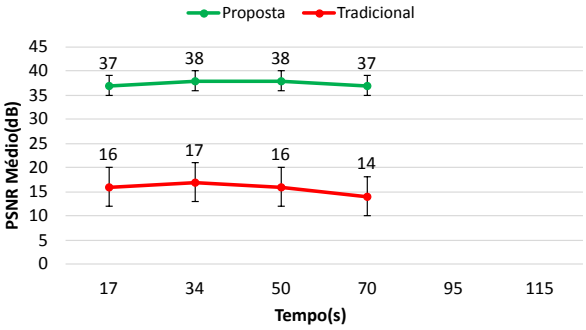
Figura 27 – PSNR do *streaming* de vídeo no cenário com 16 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

No gráfico é perceptível que o comportamento do PSNR com o sistema de decisão proposto, apresenta melhor desempenho em relação ao gráfico com o mecanismo tradicional de *handoff*. Constata-se que nos instantes de tempo em que o procedimento é acionado, o PSNR fica acima de 36dB com o sistema de decisão proposto, isto é, a qualidade do vídeo permanece excelente com o veículo nas 3 velocidades distintas. Em linha contrária, com as técnicas de decisão tradicionais, os valores de PSNR ficaram abaixo dos 19dB, chegando a 16dB, durante as transferências de conexão, com o veículo em 3 velocidades diferentes, caracterizando má qualidade do vídeo no lado do usuário.

Quando a velocidade do veículo era de 15m/s, o ganho de PSNR com mecanismo proposto foi de 52% em relação à abordagem tradicional. No momento em que a velocidade foi aumentada para 20m/s, o ganho de PSNR com o sistema proposto passou a ser de 54%. Por fim, quando a velocidade foi variada para 30m/s, o mecanismo proposto teve um ganho de 57% de PSNR, quando comparado com a abordagem tradicional de *handoff*.

Após os 70s de simulação, no gráfico com a velocidade 3, o último registro com o PSNR no sistema tradicional foi de 14dB. Como a comunicação V2I é quebrada na abordagem tradicional, o valor do PSNR ficou muito abaixo do considerado aceitável. Em contrapartida, no mesmo ponto de simulação, o arcabouço proposto manteve o PSNR em 37dB,

pois foi realizado o *multihoming* entre as tecnologias IEEE 802.11p e LTE, antes mesmo que o veículo perdesse a conexão com sua RSU, para que a comunicação V2I não fosse quebrada.

O fato do PSNR ser mantido em níveis de qualidade aceitáveis durante o *handoff* está relacionado à decisão do controlador em instruir a camada de infraestrutura para realizar o *multihoming* com as redes IEEE 802.11p e LTE via SDN. Portanto, através do gerenciamento dinâmico da rede com SDN, juntamente com o agente decisor desenvolvido, e com o acréscimo do *multihoming*, o mecanismo proposto por esta dissertação assegura os níveis de QoE desejáveis para a aplicação de *streaming* de vídeo. Isso mostra que o sistema garante o *handoff seamless* no cenário com 16 veículos.

A Tabela 7 resume a eficiência e o desempenho do mecanismo proposto nesta dissertação em relação às técnicas tradicionais de *handoff* no cenário com 16 veículos.

Tabela 7 – Desempenho do mecanismo de *handoff* proposto, no cenário com 16 veículos

Aplicação	WWW						VoIP						*Streaming* de vídeo					
Métrica	Atraso			*Jitter*			Atraso			Perda de pacotes			Atraso			PSNR		
Velocidade (m/s)	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30
Eficiência (%)	70	75	71	71	75	70	77	84	76	97	98	99	62	66	66	52	54	57

5.4 CENÁRIO COM 31 VEÍCULOS

Esta Seção discute o terceiro cenário de simulação, destacando o comportamento da rede com 31 veículos através das métricas definidas para avaliação de desempenho. Semelhantemente às seções anteriores, nesta Seção foram coletadas as métricas atraso fim a fim, *jitter*, perda de pacotes e PSNR.

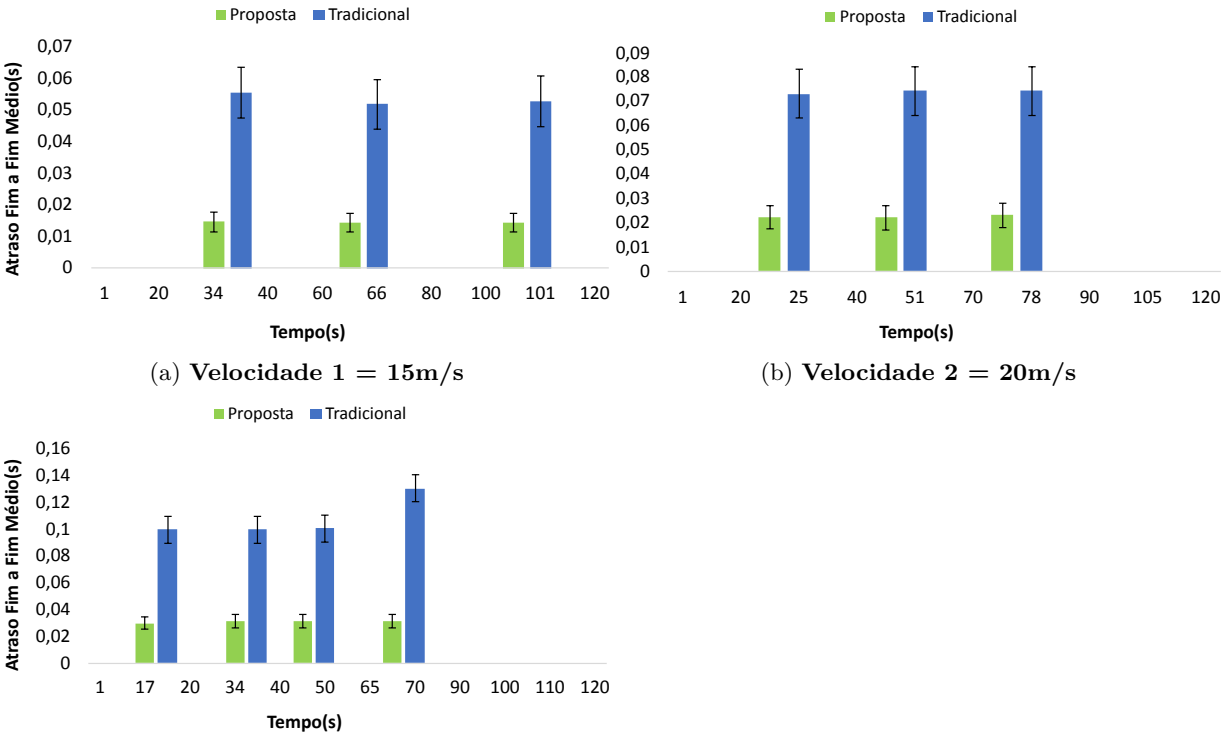
Neste cenário, a rede apresentará um comportamento diferente em relação aos cenários anteriores, pois foram inseridos 31 veículos, 15 veículos a mais que o segundo cenário, e 25 veículos a mais que o primeiro cenário.

5.4.1 Resultados obtidos

A Figura 28 exibe o gráfico de comparação entre o sistema de decisão proposto e as técnicas tradicionais de *handoff*, em termos de atraso fim a fim na aplicação WWW.

O gráfico mostra a eficiência do mecanismo proposto comparada com as técnicas tradicionais de *handoff*. Percebe-se que, com o sistema proposto, o atraso médio fim a fim da aplicação WWW ficou em 0,015s com veículo à 15m/s, 0,022s com a velocidade variada

Figura 28 – Atraso fim a fim na aplicação WWW no cenário com 31 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

para 20m/s, e 0,030s com o veículo trafegando em 30m/s. Por outro lado, nas velocidades 1 e 2, o atraso médio com as técnicas tradicionais ficou acima dos 0,050s e 0,070s, respectivamente. Além disso, quando a velocidade do veículo passou a ser 30m/s, o atraso dos pacotes chegou à 0,1s, isto é, 100ms com o mecanismo tradicional de *handoff*.

Com a velocidade do veículo em 15m/s, a eficiência do mecanismo proposto na redução do atraso fim a fim médio foi de 72% em relação às técnicas tradicionais. Com a velocidade variada para 20m/s, a eficiência do sistema proposto foi de 70%. E com a velocidade em 30m/s, a redução do atraso fim a fim, em comparação às abordagens tradicionais, foi de 71%.

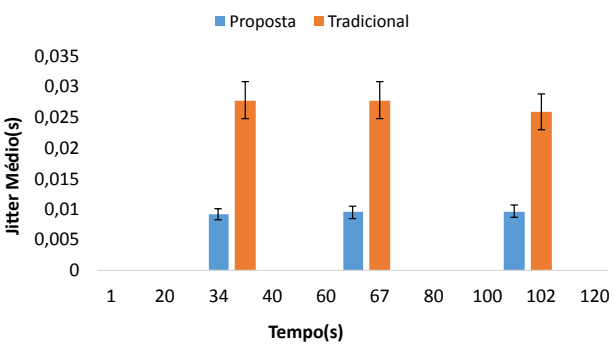
Vale ressaltar o melhor desempenho do sistema de decisão proposto com o veículo à 30m/s, após os 70s de simulação. Nestas condições, o veículo teve sua conexão quebrada, ou seja, perdeu a comunicação com a RSU e teve que se reconectar no LTE, causando um pico de 0,13s no atraso médio, com a abordagem tradicional. O sistema proposto, no mesmo cenário, através do controlador central, constata que o veículo irá ficar sem cobertura de rede e, então, dispara o *multihoming* entre as tecnologias IEEE 802.11p e LTE. Este processo evita que o veículo tenha a sua comunicação com a infraestrutura de conexão sem fio quebrada, mantendo o atraso médio da aplicação em 0,031s.

O sucesso do mecanismo proposto em mitigar os impactos do *handoff* na conexão do usuário ocorre porque o controlador constata que o veículo está prestes a enfrentar uma conexão ruim com sua RSU, ativando o agente decisor que considera pertinente a

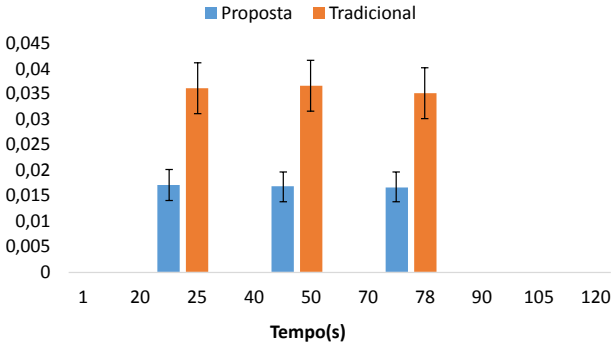
necessidade de que o *handoff* seja executado. Logo, o agente seleciona a melhor conexão para o veículo, e, então, o procedimento é realizado. Além disso, para garantir que o procedimento ocorra sem causar degradações no QoS da aplicação, o controlador, através do gerenciamento via SDN da rede, notifica a camada de infraestrutura de que o *multihoming* com as redes 802.11p e LTE também deverá ser executado.

A Figura 29 demonstra a comparação entre os gráficos de *jitter* na aplicação WWW, do mecanismo de *handoff* tradicional e do sistema de decisão proposto nesta dissertação.

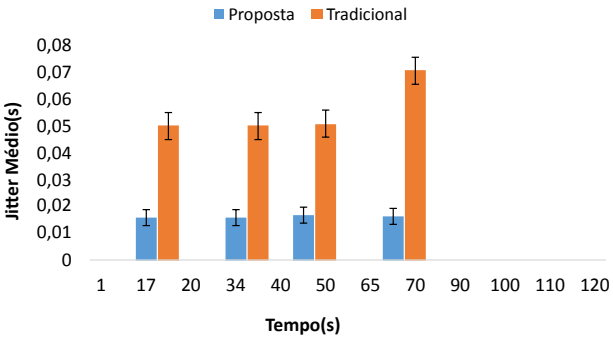
Figura 29 – *Jitter* na aplicação WWW no cenário com 31 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

Com o mecanismo proposto, os valores médios do *jitter* de pacotes da aplicação WWW ficaram abaixo dos 0,01s com o veículo na velocidade 1, e abaixo dos 0,02s com o veículo nas velocidades 2 e 3. Em contrapartida, com as técnicas tradicionais de *handoff*, os valores médios do *jitter* ficaram acima de 0,025s na velocidade 1 do veículo, 0,035s na velocidade 2 e acima dos 0,050s na velocidade 3.

O controlador, por meio da estratégia com AHP, instrui, via regras *OpenFlow*, a camada de infraestrutura a realizar o *handoff*. Simultaneamente, a execução do *multihoming* com as tecnologias 802.11p e LTE também é acionada pelo controlador central. Dessa forma, com a estratégia utilizando o AHP, com o gerenciamento da rede via SDN e com *multihoming*, o *handoff seamless* é garantido.

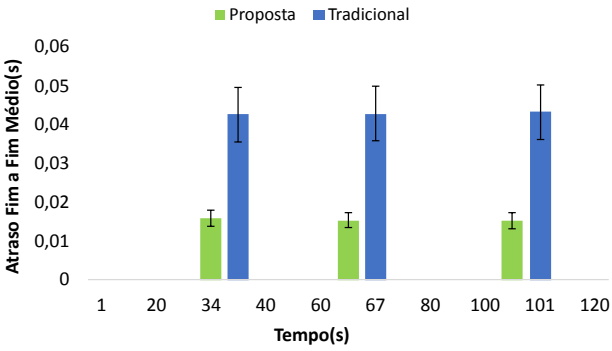
Em razão do esquema proposto, quando o veículo trafegava à 15m/s, a redução nos valores do *jitter* foi de 68% em relação às técnicas tradicionais. Com a velocidade variada para 20m/s, a eficiência na redução do *jitter* foi de 53% com sistema proposto. Por fim,

quando o veículo passou a trafegar em 30m/s, o sistema proposto conseguiu reduzir os valores de *jitter* em 70%.

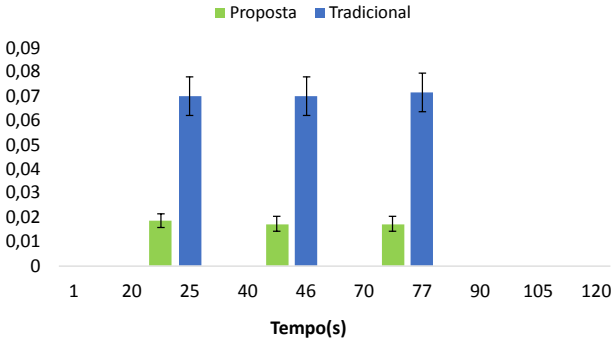
É notória a eficiência do arcabouço proposto após os 70s de simulação, com o veículo trafegando à 30m/s. Nesse cenário, com a abordagem tradicional, o nó móvel perde a conexão com a rede IEEE 802.11p, e estabelece conexão com o LTE, configurando uma quebra na comunicação V2I, fazendo com que o valor do *jitter* médio atinja o pico de 0,07s. Com a solução proposta, no mesmo cenário, o *multihoming* do fluxo de dados é realizado entre as duas tecnologias de rede sem fio, antes que o veículo perca a área de cobertura IEEE 802.11p, evitando a quebra na comunicação V2I e mantendo o valor do *jitter* abaixo dos 0,018s.

A Figura 30 expõe o gráfico de comparação entre o mecanismo de decisão de *handoff* proposto e o sistema de decisão tradicional. O gráfico exibe o comportamento do atraso fim a fim de pacotes da aplicação VoIP.

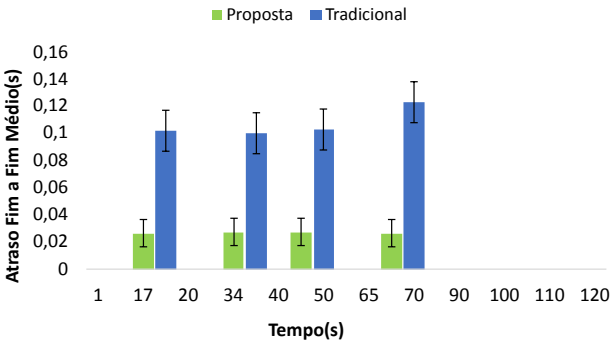
Figura 30 – Atraso fim a fim na aplicação VoIP no cenário com 31 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

No gráfico comparativo com os valores do atraso fim a fim da Figura 30 é possível notar que o mecanismo proposto tem melhor desempenho se comparado com o sistema de decisão tradicional de *handoff*. Nas velocidades 1 e 2 o atraso médio de pacotes ficou abaixo de 0,020s com o mecanismo proposto, e na velocidade 3 não passou dos 0,030s. No entanto, com a abordagem tradicional, o atraso médio ficou em 0,045s com a velocidade 1, 0,070s com a velocidade 2 e 0,1s na velocidade 3.

Em razão da decisão precisa, instantânea e eficiente do agente decisor que reside no controlador central, do gerenciamento da rede via SDN e da estratégia com *multihoming* entre as tecnologias 802.11p e LTE, os picos do atraso fim a fim durante o procedimento de seleção de rede tiveram maior atenuação. O agente presente no controlador central, com base nos parâmetros de decisão recebidos, seleciona a melhor rede para o veículo se conectar e dispara o *multihoming* durante o processo. Com isso, o *handoff* não causa degradações na conexão do usuário.

Com a ação do mecanismo proposto, a redução do atraso de pacotes da aplicação VoIP foi de 62% com o veículo à 15m/s. Com a velocidade variada para 20m/s, a redução no atraso foi de 74%. Por fim, quando a velocidade do veículo estava em 30m/s, a redução do atraso chegou à 74%.

Ressalta-se também o fato do veículo, na velocidade 3, a partir dos 70s de simulação, ter sua cobertura IEEE 802.11p perdida e, em seguida, sua conexão estabelecida no LTE, provocando uma interrupção momentânea no serviço. Em razão disso, o pico do atraso médio no sistema tradicional, no chaveamento de rede, foi de 0,12s. Em contrapartida, no sistema proposto, o controlador da rede dispara a ação de *multihoming* com o LTE para a camada intermediária, antes que o veículo perca a cobertura de sua RSU. Com essa estratégia, o serviço não foi interrompido e o atraso médio de pacotes foi de apenas 0,026s, no mesmo instante.

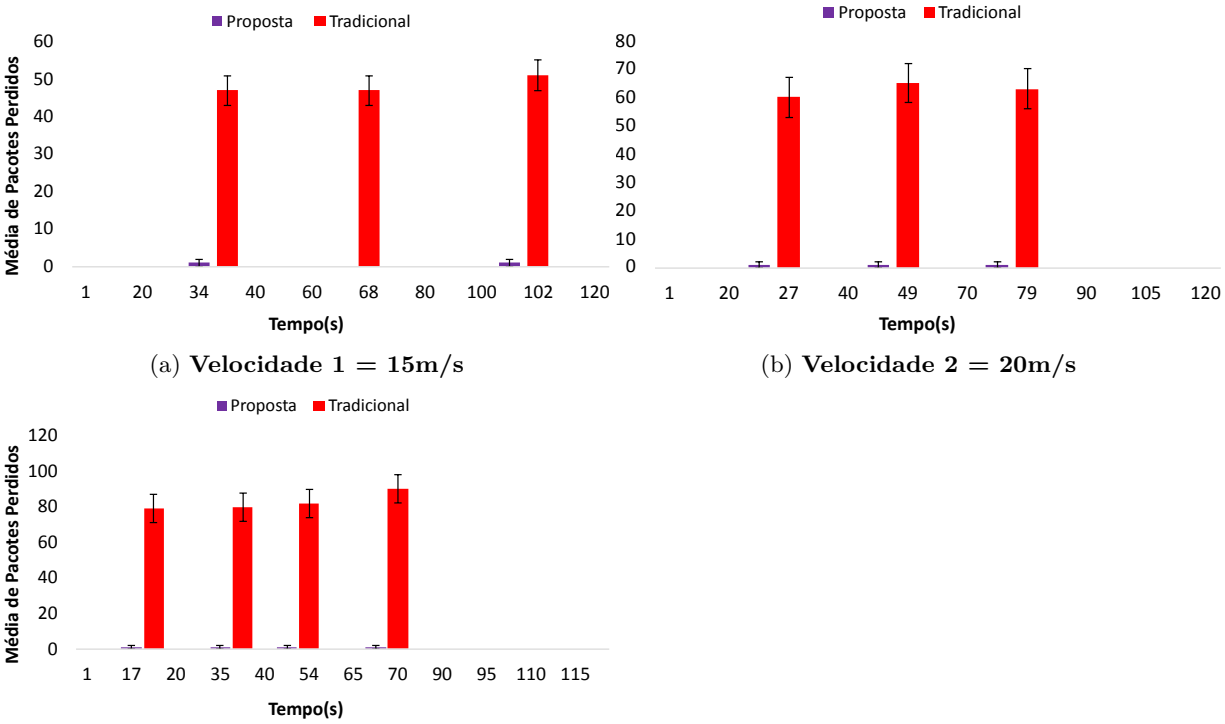
A Figura 31 apresenta o gráfico comparativo entre o mecanismo de *handoff* tradicional e o mecanismo proposto nesta dissertação, em termos de perda de pacotes na aplicação VoIP durante o procedimento de seleção de rede.

Com as abordagens tradicionais de *handoff*, a perda média ficou acima de 50 pacotes com o veículo na velocidade 1, acima de 60 pacotes na velocidade 2 e perda maior que 80 pacotes na velocidade 3, durante o processo de transferência. De forma contrária, o mecanismo proposto neste trabalho perdeu apenas 1 pacote com os 3 valores de velocidade durante as ocorrências do *handoff*, indicando eficiência próxima dos 100%.

Tendo ciência de que a conexão do veículo está prestes a sofrer deteriorações, o agente decisor presente no controlador determina que o *handoff* deve ser executado e seleciona a melhor RSU para a transferência da conexão. O controlador injeta regras SDN nas *flow-tables* dos comutadores, instruindo a execução do procedimento para a RSU selecionada. Simultaneamente, o controlador envia uma regra para o MOFR notificando este agente a realizar o *multihoming* entre as tecnologias 802.11p e LTE.

A partir dos 70s de simulação, com o veículo em velocidade de 30m/s, o sistema tradicional de *handoff* propiciou a perda de 90 pacotes no ponto onde foi feita a coleta dos dados. Isso ocorreu porque o veículo perdeu conexão com o seu ponto de acesso IEEE 802.11p, e, posteriormente, se ancorou na tecnologia LTE, ocasionando uma quebra na comunicação V2I. Em contrapartida, o arcabouço proposto neste trabalho evitou, através do *multihoming* antecipado entre o IEEE 802.11p e a rede LTE, que o veículo tivesse sua

Figura 31 – Perda de pacotes na aplicação VoIP no cenário com 31 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**

(b) **Velocidade 2 = 20m/s**

(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

comunicação quebrada com o ponto de conexão sem fio. Desse modo, apenas 1 pacote foi perdido, havendo garantias do desempenho e funcionamento aceitável da aplicação VoIP no lado do usuário.

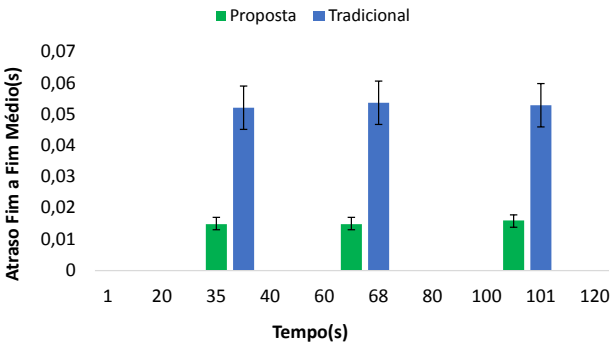
Em razão da sinergia entre a estratégia com AHP, com a arquitetura SDN da rede, e com a técnica de *multihoming*, o *handoff seamless* é garantido e o QoS necessário para execução satisfatória da aplicação VoIP é assegurado.

A Figura 32 exibe o gráfico com o comportamento do atraso fim a fim na aplicação de *streaming* de vídeo. No gráfico está o comparativo de desempenho entre o mecanismo proposto e o sistema de *handoff* tradicional em um cenário com 31 veículos.

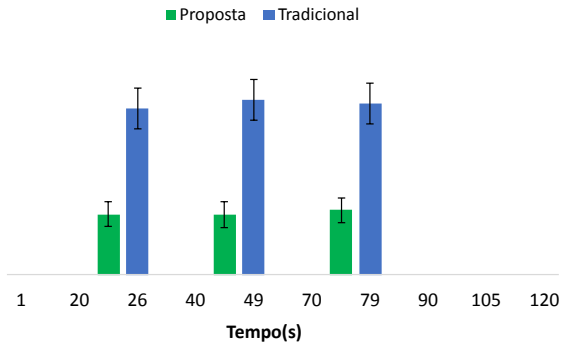
No gráfico é possível notar que na velocidade 1 do veículo, o atraso médio de pacotes ficou em 0,015s, na velocidade 2 o atraso médio foi de 0,025s e, com o veículo na velocidade 3, a latência não ultrapassou os 0,035s com o esquema de *handoff* proposto neste trabalho. Na contramão do mecanismo proposto, com o sistema tradicional, o atraso médio de pacotes ficou acima dos 0,050s com o veículo na velocidade 1, acima dos 0,065s na velocidade 2, e acima dos 0,090s com o veículo na velocidade 3.

Com o veículo trafegando em uma velocidade de 15m/s, o sistema proposto reduziu o atraso médio de pacotes em 71%, quando comparado às técnicas tradicionais de *handoff*. Quando a velocidade do veículo foi variada para 20m/s, o ganho do mecanismo proposto na redução do atraso fim a fim foi de 63% em relação ao sistema tradicional. Por fim, com a velocidade do veículo alterada para 30m/s, o mecanismo proposto conseguiu reduzir o

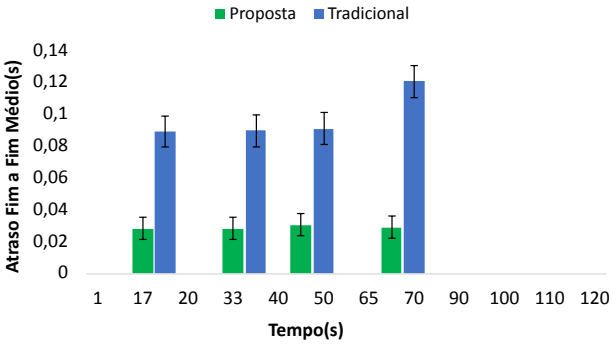
Figura 32 – Atraso fim a fim no *streaming* de vídeo no cenário com 31 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

atraso médio de pacotes em 71%.

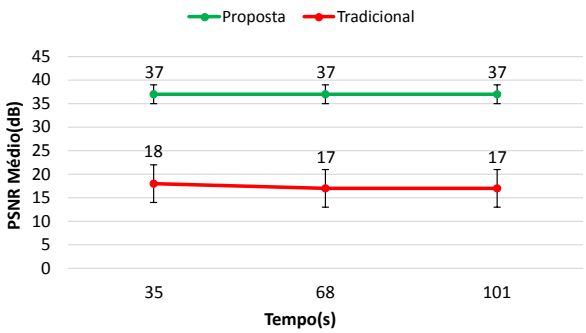
Vale ressaltar, também, o fato do veículo ficar sem cobertura IEEE 802.11p, e ter sua conexão ancorada no LTE a partir dos 70s de simulação, trafegando em uma velocidade de 30m/s, com o emprego das técnicas tradicionais de *handoff*. Este processo, de desconexão e conexão, provoca interrupções no serviço, fazendo com que o pico do atraso ficasse em 0,12s. Por outro lado, com o mecanismo proposto, a perda da área de cobertura IEEE 802.11p no veículo é um fato que ocorre sem danos à aplicação, pois o agente centralizado da rede dispara a execução do *multihoming* com o LTE para a camada intermediária, antes que a cobertura da RSU seja perdida. Com isso, o atraso médio no *streaming* de vídeo ficou em 0,029s, no mesmo instante de tempo.

Por fim, a Figura 33 apresenta o comparativo do gráfico do PSNR entre o sistema de decisão proposto e as técnicas tradicionais de *handoff*.

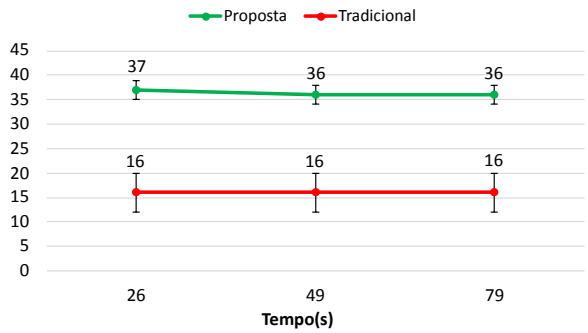
Com o mecanismo proposto, o PSNR ficou acima dos 34dB com o veículo nas velocidades 1, 2 e 3. Já com as abordagens tradicionais de *handoff*, nos pontos onde ocorreram a seleção de rede, o PSNR ficou abaixo dos 18dB com o veículo na velocidade 1, permaneceu em 16dB na velocidade 2, e caiu para 13dB quando o veículo estava à 30m/s.

No mecanismo proposto, o PSNR do *streaming* de vídeo permanece em valores de qualidade aceitáveis porque, além da detecção prévia do deterioramento da conexão do veículo, o agente decisor localiza a melhor RSU para a transferência da conexão de forma precisa e dispara o procedimento de *handoff* instantaneamente. Ademais, de forma si-

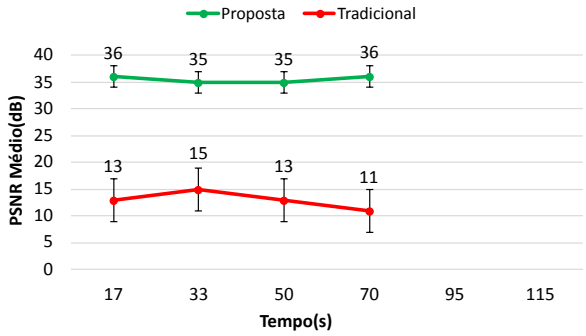
Figura 33 – PSNR no *streaming* de vídeo no cenário com 31 veículos



(a) **Velocidade 1 = 15m/s**



(b) **Velocidade 2 = 20m/s**



(c) **Velocidade 3 = 30m/s**

multânea ao procedimento, o controlador notifica a camada de infraestrutura à realizar o *multihoming* com as tecnologias 802.11p e LTE. Todo esse processo, somado ao gerenciamento eficiente da rede com SDN, contribuem para o sucesso do *handoff*, isto é, sem quebrar o QoS e o QoE da aplicação do usuário.

Com a ação do sistema proposto, com o veículo trafegando à 15m/s, o ganho no PSNR médio foi de 53% em relação às abordagens tradicionais. Quando o nó passou a trafegar à 20m/s, o ganho do mecanismo proposto, quando comparado aos sistemas tradicionais de *handoff*, foi de 55%. Por fim, com a velocidade variada para 30m/s, o ganho de PNSR com o esquema de *handoff* proposto foi de 64%.

Acrescenta-se, ainda, o fato do mecanismo proposto manter a comunicação V2I do veículo ininterrupta, quando este está em uma velocidade de 30m/s, se comparado com as técnicas tradicionais. Este fenômeno é evidenciado no gráfico quando o valor de PSNR se mantém em 36dB a partir dos 70s de simulação, com o emprego do sistema proposto. Na abordagem tradicional há a quebra de conexão, isto é, o *host* perde a comunicação com a RSU e estabelece a conexão com o LTE, causando a redução do PSNR para 11dB.

Portanto, com base nos resultados acima, infere-se que o mecanismo de *handoff*, constituído pela estratégia com AHP, pelo gerenciamento SDN e pela técnica de *multihoming*, garante melhor desempenho do *streaming* de vídeo quando comparado com as técnicas tradicionais.

A Tabela 8 resume a eficiência e o desempenho do mecanismo proposto nesta disser-

tação em relação às técnicas tradicionais de *handoff* no cenário com 31 veículos.

Tabela 8 – Desempenho do mecanismo de *handoff* proposto, no cenário com 31 veículos

Aplicação	WWW						VoIP						*Streaming* de vídeo					
Métrica	Atraso			*Jitter*			Atraso			Perda de pacotes			Atraso			PSNR		
Velocidade (m/s)	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30	15	20	30
Eficiência (%)	72	70	71	68	53	70	62	74	74	98	98	99	71	63	71	53	55	64

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este Capítulo apresentou a avaliação de desempenho da proposta. Com o objetivo de constatar a eficiência do mecanismo de *handoff* proposto, foram definidas 4 métricas que ilustraram de forma gráfica o desempenho do sistema. Foram especificadas as ferramentas utilizadas na construção e avaliação da proposta, e foram selecionadas 3 tipos de aplicações, cada uma com seu grau de importância em um cenário VANETs. Por fim, foram esquematizados 3 cenários de simulações, o primeiro cenário com 6 veículos, o segundo cenário com 16 veículos e o terceiro cenário com 31 veículos, com a velocidade do veículo variando nos três. Em razão da sinergia entre o agente estruturado com AHP, o SDN na rede e o *multihoming*, o mecanismo proposto apresentou melhor desempenho nos 3 cenários, comparado às técnicas tradicionais de *handoff*. Com base nos resultados, o sistema proposto obteve eficiência que variou de 50% à 99% no QoS, e ganho de 52% à 64% no QoE.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou um mecanismo de *handoff* vertical definido por *software* para ambientes de redes veiculares, tendo por finalidade garantir o QoS e QoE das aplicações de tempo real e não real, durante a transferência de conexão entre as infraestruturas de comunicação sem fio. Inicialmente, com base nas soluções apresentadas pela literatura, foi identificada a necessidade de um sistema robusto que pudesse garantir o *handoff* sem interrupções em um cenário de redes heterogêneas altamente dinâmico. Além disso, foram destacados os conceitos das principais tecnologias que foram utilizadas para a concepção da solução apresentada, bem como para o entendimento completo da pesquisa desenvolvida.

No Capítulo 4 foi feita a apresentação da arquitetura da proposta, descrevendo as camadas de toda arquitetura, detalhando a operação/funcionamento do mecanismo proposto e especificando as etapas de decisão do sistema. As políticas de disparo do *handoff* foram concentradas no controlador central, pelo fato deste ter a visão global da rede, e o processo da tomada de decisão, estruturado com o AHP, foi baseado no RSSI da infraestrutura de conexão, na velocidade e localização do veículo. Ademais, foi descrita, de forma minuciosa, a sinergia entre os principais componentes do sistema decisor, isto é, a estratégia com AHP, o paradigma SDN e a técnica de *multihoming*.

Para realizar a avaliação de desempenho da solução apresentada nesta dissertação, foi utilizada a ferramenta de simulação de eventos discretos OMNeT++. Nela, foram arquitetados cenários de simulações com diferentes densidades, considerando as tecnologias IEEE 802.11p e LTE, com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema. Para mensurar o desempenho da solução, foram definidas métricas de QoS, isto é, atraso fim a fim, *jitter*, e perda de pacotes, e para a métrica de QoE, o PSNR.

Através dos resultados concebidos com os testes em simulações, foi possível comprovar a eficiência da solução proposta. Em todos os cenários, o mecanismo conseguiu mitigar satisfatoriamente o impacto do *handoff* no atraso, no *jitter* e na perda de pacotes das aplicações. Além disso, o PSNR foi mantido em valores considerados excelente, e em valores considerados bom durante as transferências de conexão. Na avaliação das métricas de QoS, a eficiência do mecanismo variou de 50% à 99%, e na métrica de QoE os ganhos variaram de 52% à 64%. Com isso, asseverou-se a pertinência da proposta.

6.1 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho alcançou algumas contribuições significativas para o gerenciamento de mobilidade em redes VANETs, a saber:

- Um agente decisor estruturado com AHP para simplificar e tornar eficientes decisões

de *handoff* que envolvam mais de uma informação contextual inerente ao processo.

- Uma arquitetura SDN para o gerenciamento efetivo do *handoff* vertical em redes VANETs heterogêneas.
- Um sistema *multihoming* via SDN para garantir a comunicação V2I ininterrupta durante o processo de transferência de conexão, ou quando houver perda da área de cobertura de uma das tecnologias de conexão sem fio.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Os trabalhos futuros que podem ser alcançados a partir da pesquisa em destaque são:

- Aplicação de um sistema *Fuzzy* para, em conjunto com o AHP, tornar mais robusto o agente decisor. Neste caso, o *Fuzzy* ficaria responsável por estruturar as decisões de quando a camada intermediária deveria realizar o *multihoming*, enquanto o AHP se responsabilizaria pelo *handoff* e vice-versa.
- Empregar um *cluster* de controladores na nuvem da operadora para não sobrecarregar apenas um controlador no gerenciamento da rede. Neste contexto, o sistema de decisão seria distribuído entre os controladores do *cluster*.
- Desenvolver uma hierarquia de controladores para tornar o gerenciamento do *handoff* mais próximo da borda. Isto faria com que o procedimento ocorresse com maior velocidade em termos de detecção de degradação do serviço, localização de um ponto sem fio candidato e estabelecimento da conexão.
- Fazer o balanceamento eficiente do tráfego de dados durante o *multihoming*, ou seja, dividir o fluxo, com o envio dos dados críticos pelo melhor caminho/rede até o usuário.
- Utilizar a carga da infraestrutura de conexão como parâmetro para aprimorar a tomada de decisão do *handoff*. Isto faria com que o agente decisor não encaminhasse o veículo para uma célula sobrecarregada.

REFERÊNCIAS

ABDENNOUR, Z.; JIA, W. Heterogeneous vehicular communications: A comprehensive study. *Ad Hoc Networks*, v. 75-76, 03 2018.

ABU-ALI, N.; Taha, A. M.; Salah, M.; Hassanein, H. Uplink scheduling in lte and lte-advanced: Tutorial, survey and evaluation framework. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 16, n. 3, p. 1239–1265, Third 2014. ISSN 1553-877X.

AHMED, A.; BOULAHIA, L. M.; GAITI, D. Enabling vertical handover decisions in heterogeneous wireless networks: A state-of-the-art and a classification. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 16, n. 2, p. 776–811, 2013.

AL-HEETY, O. S.; Zakaria, Z.; Ismail, M.; Shakir, M. M.; Alani, S.; Alsariera, H. A comprehensive survey: Benefits, services, recent works, challenges, security, and use cases for sdn-vanet. *IEEE Access*, v. 8, p. 91028–91047, 2020.

AMIN, R.; REISSLEIN, M.; SHAH, N. Hybrid sdn networks: A survey of existing approaches. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 20, n. 4, p. 3259–3306, 2018.

BEN-MUBARAK, M. A.; ALI, B. M.; NOORDIN, N. K.; ISMAIL, A.; NG, C. K. Fuzzy logic based self-adaptive handover algorithm for mobile wimax. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 71, n. 2, p. 1421–1442, 2013.

BENKIRANE, S.; BENAZIZ, M. Performance evaluation of ieee 802.11p and ieee 802.16e for vehicular ad hoc networks using simulation tools. In: *2018 IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 573–577.

BROSH, E.; BASET, S. A.; MISRA, V.; RUBENSTEIN, D.; SCHULZRINNE, H. The delay-friendliness of tcp for real-time traffic. *IEEE/ACM Transactions On Networking*, IEEE, v. 18, n. 5, p. 1478–1491, 2010.

CAILEAN, A.; Cagneau, B.; Chassagne, L.; Popa, V.; Dimian, M. A survey on the usage of dsrc and vlc in communication-based vehicle safety applications. In: *2014 IEEE 21st Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 69–74.

CAO, J.; MA, M.; LI, H.; ZHANG, Y.; LUO, Z. A survey on security aspects for lte and lte-a networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 16, n. 1, p. 283–302, First 2014. ISSN 1553-877X.

CASTRO, F.; MARTINS, A.; CAPELA, N.; SARGENTO, S. Multihoming for uplink communications in vehicular networks. In: IEEE. *2017 Wireless Days*. [S.l.], 2017. p. 230–237.

CHANG, M. J.; ABICHAR, Z.; HSU, C. Wimax or lte: Who will lead the broadband mobile internet? *IT Professional*, v. 12, n. 3, p. 26–32, 2010.

CHOU, Y.; YEN, H.; SUN, C.; HON, J. Comparison of ahp and fuzzy ahp methods for human resources in science technology (hrst) performance index selection. In: IEEE. *2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. [S.l.], 2013. p. 792–796.

DUO, R.; WU, C.; YOSHINAGA, T.; JI, Y. Sdn-based handover approach in ieee 802.11 p and lte hybrid vehicular networks. In: IEEE. *2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI)*. [S.l.], 2018. p. 1870–1875.

ERGEN, M. Long term evolution of 3gpp. *Mobile Broadband*, p. 379–416, 2008.

EVANGELINE, C. S.; KUMARAVELU, V. B. Decision process for vertical handover in vehicular adhoc networks. In: IEEE. *2017 International conference on Microelectronic Devices, Circuits and Systems (ICMDCS)*. [S.l.], 2017. p. 1–5.

FINLEY, B.; BASAURE, A. Benefits of mobile end user network switching and multihoming. *Computer Communications*, Elsevier, v. 117, p. 24–35, 2018.

GHAVIMI, F.; CHEN, H. M2m communications in 3gpp lte/lte-a networks: Architectures, service requirements, challenges, and applications. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 17, n. 2, p. 525–549, 2015.

GHOSH, A.; PARANTHAMAN, V. V.; MAPP, G.; GEMIKONAKLI, O.; LOO, J. Enabling seamless v2i communications: toward developing cooperative automotive applications in vanet systems. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 53, n. 12, p. 80–86, 2015.

GLASS, S.; MAHGOUB, I.; RATHOD, M. Leveraging manet-based cooperative cache discovery techniques in vanets: A survey and analysis. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 4, p. 2640–2661, 2017.

GODOR, G.; Jakó, Z.; Knapp, A.; Imre, S. A survey of handover management in lte-based multi-tier femtocell networks: Requirements, challenges and solutions. *Computer Networks*, v. 76, p. 17 – 41, 2015. ISSN 1389-1286. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128614003715>.

GOUDARZI, S.; HASSAN, W. H.; ANISI, M. H.; KHAN, M. K.; SOLEYMANI, S. A. Intelligent technique for seamless vertical handover in vehicular networks. *Mobile Networks and Applications*, Springer, v. 23, n. 6, p. 1462–1477, 2018.

GUO, T.; QUDDUS, A. ul; TAFAZOLLI, R. Seamless handover for lte macro-femto networks based on reactive data bicasting. *IEEE Communications Letters*, IEEE, v. 16, n. 11, p. 1788–1791, 2012.

GUPTA, N.; SINGH, B. A novel seamless handover scheme for high-speed railway transport using dual-antenna system. In: IEEE. *2019 4th International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT)*. [S.l.], 2019. p. 1160–1165.

HANN, J.; KAMBER, M. *Data mining: concepts and techniques*. [S.l.]: Morgan Kaufman Publish, 2000.

HASSOUNE, M. A.; MAAZA, Z. M.; SENOUCI, S.-M. Vertical handover decision algorithm for multimedia streaming in vanet. *Wireless Personal Communications*, Springer, v. 95, n. 4, p. 4281–4299, 2017.

HE, L.; YAN, Z.; ATIQUZZAMAN, M. Lte/lte-a network security data collection and analysis for security measurement: A survey. *IEEE Access*, v. 6, p. 4220–4242, 2018.

HE, Z.; FU, B.; CAO, A.; YU, J. A solution for mobility management in software defined vanet. In: IEEE. *2018 IEEE 15th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*. [S.l.], 2018. p. 553–558.

HUANG, C.-M.; CHIANG, M.-S.; DAO, D.-T.; PAI, H.-M.; XU, S.; ZHOU, H. Vehicle-to-infrastructure (v2i) offloading from cellular network to 802.11 p wi-fi network based on the software-defined network (sdn) architecture. *Vehicular Communications*, Elsevier, v. 9, p. 288–300, 2017.

HUYNH-THU, Q.; GHANBARI, M. Scope of validity of psnr in image/video quality assessment. *Electronics letters*, IET, v. 44, n. 13, p. 800–801, 2008.

IETF, N. W. G. *RFC 2960 Stream Control Transmission Protocol*. 2000. Disponível em: <https://tools.ietf.org/html/rfc2960>.

IYENGAR, J. R.; AMER, P. D.; STEWART, R. Concurrent multipath transfer using sctp multihoming over independent end-to-end paths. *IEEE/ACM Transactions on networking*, IEEE, v. 14, n. 5, p. 951–964, 2006.

JAMEEL, F.; WYNE, S.; JAVED, M. A.; ZEADALLY, S. Interference-aided vehicular networks: Future research opportunities and challenges. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 56, n. 10, p. 36–42, 2018.

KARUNARATHNE, G.; KULAWANSA, K.; FIRDHOUS, M. Wireless communication technologies in internet of things: a critical evaluation. In: IEEE. *2018 International Conference on Intelligent and Innovative Computing Applications (ICONIC)*. [S.l.], 2018. p. 1–5.

KELLERBAUER, H.; HIRSCH, H. Simulation of powerline communication with omnet++ and inet-framework. In: IEEE. *2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. [S.l.], 2011. p. 213–217.

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

KLAUE, J.; RATHKE, B.; WOLISZ, A. Evalvid–a framework for video transmission and quality evaluation. In: SPRINGER. *International conference on modelling techniques and tools for computer performance evaluation*. [S.l.], 2003. p. 255–272.

KONG, Q.; Lu, R.; Chen, S.; Zhu, H. Achieve secure handover session key management via mobile relay in lte-advanced networks. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 4, n. 1, p. 29–39, 2017.

KRISTIANA, L.; SCHMITT, C.; STILLER, B. Survey of angle-based forwarding methods in vanet communications. In: *2016 Wireless Days (WD)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–3.

KUMAR, N.; Misra, S.; Rodrigues, J. J. P. C.; Obaidat, M. S. Coalition games for spatio-temporal big data in internet of vehicles environment: A comparative analysis. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 2, n. 4, p. 310–320, 2015.

LABIOD, H.; LIN, H.; NONNI, R. Analytical study of intradomain handover in multiple-mobile-routers-based multihomed nemo networks. *Computer Networks*, Elsevier, v. 54, n. 18, p. 3280–3294, 2010.

LEE, C.-W.; CHEN, M. C.; SUN, Y. S. A novel network mobility management scheme supporting seamless handover for high-speed trains. *Computer Communications*, Elsevier, v. 37, p. 53–63, 2014.

LEE, G. M.; JEON, B.-C.; HEO, S.; KIM, H.; JIN, J.; LEE, S. Load balancing scheme and implementation in multihoming mobile router. In: IEEE. *NOMS 2008-2008 IEEE Network Operations and Management Symposium*. [S.l.], 2008. p. 811–814.

LI, W.; XU, G.; XING, Q.; LYU, M. Application of improved ahp-bp neural network in csr performance evaluation model. *Wireless Personal Communications*, Springer, p. 1–16, 2019.

LIN, C.-S.; LIN, J.-C. Handover in vehicular communication networks. In: IEEE. *2011 11th International Conference on ITS Telecommunications*. [S.l.], 2011. p. 590–595.

LOPES, R.; LUÍS, M.; SARGENTO, S. Real-time video transmission in multihomed vehicular networks. In: IEEE. *2019 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. [S.l.], 2019. p. 1–4.

LYKOURGIOTIS, A.; KOTSOPOULOS, S.; DAGIUKLAS, T. A comprehensive simulation study of low latency handoffs in mobile ipv4 for voip in ieee 802.11 b wlan. In: *Proceedings of the 7th ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 29–36.

MAHARDHIKA, G.; ISMAIL, M.; MAT, K. Multi-criteria vertical handover decision in heterogeneous network. In: IEEE. *2012 IEEE Symposium on Wireless Technology and Applications (ISWTA)*. [S.l.], 2012. p. 1–4.

MAJEED, S. M. S. A.; FLEURY, M. Dual handover vs. qos for real time broadband video streaming over wimax networks. In: IEEE. *2014 UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. [S.l.], 2014. p. 500–504.

MCKEOWN, N.; ANDERSON, T.; BALAKRISHNAN, H.; PARULKAR, G.; PETERSON, L.; REXFORD, J.; SHENKER, S.; TURNER, J. Openflow: Enabling innovation in campus networks. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, v. 38, n. 2, p. 69–74, mar. 2008. ISSN 0146-4833. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/1355734.1355746>.

MORE, S.; NAIK, U. L. Optimization driven multipath routing for the video transmission in the vanet. In: IEEE. *2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)*. [S.l.], 2018. p. 6–10.

MOUAWAD, N.; NAJA, R.; TOHME, S. Sdn-based network selection platform for v2x use cases. In: IEEE. *2019 International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. [S.l.], 2019. p. 1–6.

MUSHTAQ, M. S.; FOWLER, S.; MELLOUK, A.; AUGUSTIN, B. Qoe/qos-aware lte downlink scheduler for voip with power saving. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 51, p. 29–46, 2015.

MUSHTAQ, M. S.; SHAHID, A.; FOWLER, S. Qos-aware lte downlink scheduler for voip with power saving. In: IEEE. *2012 IEEE 15th International Conference on Computational Science and Engineering*. [S.l.], 2012. p. 243–250.

MUTALIK, P.; Nagaraj S; Vedavyas J; Biradar, R. V.; Patil, V. G. C. A comparative study on aodv, dsr and dsdv routing protocols for intelligent transportation system (its) in metro cities for road traffic safety using vanet route traffic analysis (vrta). In: *2016 IEEE International Conference on Advances in Electronics, Communication and Computer Technology (ICAECCT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 383–386.

PAUL, P. V.; SARASWATHI, R. The internet of things — a comprehensive survey. In: *2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 421–426.

PERERA, C.; LIU, C. H.; JAYAWARDENA, S.; CHEN, M. Context-aware computing in the internet of things: A survey on internet of things from industrial market perspective. *CoRR*, abs/1502.00164, 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1502.00164>.

RENE, S.; EXPOSITO, E.; GINESTE, M.; ALINS, J.; ESPARZA, O. Multipath tcp architecture for infotainment multimedia applications in vehicular networks. In: IEEE. *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.], 2015. p. 1–5.

RENGARAJU, P.; LUNG, C. Network architecture and qos study on software defined lte vehicular ad hoc networks. p. 1–7, 2016.

RIZVI, H.; AKRAM, J. Handover management in 5g software defined network based v2x communication. In: IEEE. *2018 12th International Conference on Open Source Systems and Technologies (ICOSST)*. [S.l.], 2018. p. 22–26.

SAAFI, S.; HAMOUDA, S.; KALLEL, S. K. Improving handover decisions for better multimedia services transmission in v2i. In: IEEE. *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. [S.l.], 2018. p. 1–5.

SAATY, T. L. What is the analytic hierarchy process? In: *Mathematical models for decision support*. Springer, 1988. p. 109–121. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007\%2F978-3-642-83555-1_5>.

SALIHIN, S. S.; NISSIRAT, L. A.; NOOR, R. M.; AHMEDY, I. Handover schemes for vehicular ad-hoc networks over long term evolution advanced: A survey. In: IEEE. *2018 International Conference on Computational Approach in Smart Systems Design and Applications (ICASSDA)*. [S.l.], 2018. p. 1–7.

SANTOS, A. V. Um framework sdn para distribuição de streaming de vídeo para veículos conectados. *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco*, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/34477>.

SARASWAT, D.; CHAURASIA, B. K. Ahp based trust model in vanets. In: IEEE. *2013 5th International Conference and Computational Intelligence and Communication Networks*. [S.l.], 2013. p. 391–393.

SHOKET, H.; AULAKH, J. S. Secure voip lte network for secure transmission using plrt (packet level restraining technique) under ddos attack. In: *2018 5th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 878–882.

SILVA, B. R. Seleção de rede e de recursos computacionais para o offloading em ambiente de nuvem móvel. *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Pernambuco*, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/30516>.

SINGH, P. K.; SHARMA, S.; NANDI, S. K.; NANDI, S. Multipath tcp for v2i communication in sdn controlled small cell deployment of smart city. *Vehicular communications*, Elsevier, v. 15, p. 1–15, 2019.

SKONDRAS, E.; MICHALAS, A.; SGORA, A.; VERGADOS, D. D. A vertical handover management scheme for vanet cloud computing systems. In: IEEE. *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. [S.l.], 2017. p. 371–376.

SMIDA, E. B.; FANTAR, S. G.; YOUSSEF, H. Predictive handoff mechanism for video streaming in a cloud-based urban vanet. In: IEEE. *2017 IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*. [S.l.], 2017. p. 1170–1177.

SMIDA, E. B.; FANTAR, S. G.; YOUSSEF, H. Link quality and qoe aware predictive vertical handoff mechanism for video streaming in urban vanet. In: SPRINGER. *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. [S.l.], 2018. p. 170–181.

SOMMER, C.; GERMAN, R.; DRESSLER, F. Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved ivc analysis. *IEEE Transactions on mobile computing*, IEEE, v. 10, n. 1, p. 3–15, 2010.

SYFULLAH, M.; LIM, J. M. Data broadcasting on cloud-vanet for ieee 802.11p and lte hybrid vanet architectures. In: *2017 3rd International Conference on Computational Intelligence Communication Technology (CICT)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

THOTA, J.; Bulut, B.; Doufexi, A.; Armour, S. Performance evaluation of multicast video distribution with user cooperation in lte-a vehicular environments. p. 1–5, 2017.

TINKHEDE, P.; INGOLE, P. Survey of handover decision for next generation. In: *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.

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

ULLAH, A.; Yao, X.; Shaheen, S.; Ning, H. Advances in position based routing towards its enabled fog-oriented vanet–a survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 21, n. 2, p. 828–840, 2020.

VADHWANI, D. N.; BUCH, S. A novel approach for the its application to prevent accidents using wireless sensor network, iot and vanet. In: *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.

VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the omnet++ simulation environment. In: *Proceedings of the 1st international conference on Simulation tools and techniques for communications, networks and systems & workshops*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–10.

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

VIRDIS, A.; STEA, G.; NARDINI, G. Simulating lte/lte-advanced networks with simulte. In: *Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*. [S.l.]: Springer, 2015. p. 83–105.

VOZNAK, M.; KOVAC, A.; HALAS, M. Effective packet loss estimation on voip jitter buffer. In: SPRINGER. *International Conference on Research in Networking*. [S.l.], 2012. p. 157–162.

WALLACE, T. D.; SHAMI, A. A review of multihoming issues using the stream control transmission protocol. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 14, n. 2, p. 565–578, 2011.

WANG, S.; FAN, C.; HSU, C.-H.; SUN, Q.; YANG, F. A vertical handoff method via self-selection decision tree for internet of vehicles. *IEEE Systems Journal*, IEEE, v. 10, n. 3, p. 1183–1192, 2014.

WU, T.-Y.; OBAIDAT, M. S.; CHAN, H.-L. Qualityscan scheme for load balancing efficiency in vehicular ad hoc networks (vanets). *Journal of Systems and Software*, Elsevier, v. 104, p. 60–68, 2015.

XIN, Z.; CHEN, L.; YANG, Y.; MIAO, K.; LI, Z. Application of ahp-dea model in comprehensive evaluation of distribution network planning reliability. In: IEEE. *2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*. [S.l.], 2019. p. 290–294.

YU, Y.; Li, X.; Leng, X.; Song, L.; Bu, K.; Chen, Y.; Yang, J.; Zhang, L.; Cheng, K.; Xiao, X. Fault management in software-defined networking: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 21, n. 1, p. 349–392, 2019.

ZAIDI, S.; BITAM, S.; MELLOUK, A. Enhanced user datagram protocol for video streaming in vanet. In: IEEE. *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.

ZHIOUA, G. e. m.; LABIOD, H.; TABBANE, N.; TABBANE, S. An efficient qos based gateway selection algorithm for vanet to lte advanced hybrid cellular network. In: *Proceedings of the 15th ACM international conference on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 353–356.