



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Proposta de Mecanismo Para Prevenção da Congestão Causada por Envio Excessivo de Mensagens em Redes Veiculares

Paulo Victor Gonçalves Farias

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Bacharelado em Ciência da Computação

Orientador
Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim

Brasília
2019

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Gleide e Walmir e aos meus irmãos Guilherme, André Felipe, Caio e Ana Luísa.

Agradecimentos

Agradeço ao professor e orientador, Jacir Luiz Bordim, que proporcionou realizar a pesquisa nesta área de conhecimento. Agradeço aos comentários e sugestões da banca de avaliação que auxiliaram na melhoria do trabalho. Agradeço também à Universidade de Brasília, especialmente o Departamento de Ciência da Computação, que trabalham favorecendo o crescimento e aprendizado dos alunos.

Resumo

A prevenção de acidentes em vias e rodovias é um dos aspectos mais importantes das redes veiculares. Em uma Rede Ad Hoc Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad-Hoc Network*) (VANET), veículos são equipados com um dispositivo que permite a comunicação sem fio entre eles. Neste tipo de rede, veículos geralmente constroem a topologia da rede através da troca periódica de mensagens conhecidas como *beacons*. Estas mensagens devem conter a posição do veículo, sua velocidade e direção. Algumas aplicações para prevenção de acidentes em VANETs definem requisitos rígidos para garantir sua operação correta, dentre eles, frequências de transmissão de *beacons* que podem variar de 10 a 50 Hz. Entretanto, altas taxas de transmissão de *beacons* podem causar um problema conhecido como *broadcast storm*, que prejudica a operação destas aplicações em cenários com alta densidade de veículos. Durante um *broadcast storm*, o número de mensagens sendo transmitidas simultaneamente aumenta a quantidade de pacotes perdidos por colisões e diminui a cobertura. Neste trabalho, propõe-se um novo protocolo para transmissão de *beacons* em VANETs chamado *Density-based Congestion Avoidance Protocol* (DCAP), com objetivo de minimizar o impacto do *broadcast storm*. Resultados experimentais demonstram que o protocolo DCAP consegue reduzir a taxa de pacotes perdidos por colisões para aproximadamente 5%, garantindo uma taxa de recepção de pacotes superior a 85% até em cenários propensos ao *broadcast storm*.

Palavras-chave: Redes Veiculares, *Vehicular Ad Hoc Network* (VANET), *Intelligent Transportation Systems* (ITS), *Beacons*, *Broadcast Storm*, Predição de Posição, Filtro de Kalman, Simulação de Trânsito

Abstract

Accident prevention in roads and highways is one of the most important aspects of vehicular networks. In a Vehicular Ad Hoc Network (VANET), vehicles are equipped with a device that enables wireless communication between them. In this type of network, vehicles can build the network topology by periodic exchange of messages known as beacons. These messages should include the vehicle's position, speed and heading. Some accident prevention applications in VANETs define strict requirements to guarantee their operation, among them, beaconing rates that can vary between 10 to 50 Hz. However, high beacon transmission rates can lead to a problem known as broadcast storm, which impair the operation of these applications in high vehicle density scenarios. During a broadcast storm, the number of messages being transmitted simultaneously increases packet loss rate due to collisions and decreases coverage. In this work, a new protocol for beaconing in VANETs called *Density-based Congestion Avoidance Protocol* (DCAP) is proposed to minimize the impact caused by broadcast storm. Experimental results demonstrate that the DCAP protocol can reduce the packet loss rate caused by collisions to approximately 5%, guaranteeing a packet delivery ratio of up to 85% in scenarios prone to broadcast storm.

Keywords: Vehicular Networks, Vehicular Ad Hoc Network (VANET), Intelligent Transportation Systems (ITS), Beacons, Broadcast Storm, Position Prediction, Kalman Filter, Traffic Simulation

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Problema	4
1.2	Objetivos	4
1.2.1	Objetivos Gerais	4
1.2.2	Objetivos Específicos	4
1.3	Metodologia de Pesquisa	5
1.4	Estrutura do Trabalho	5
2	Fundamentação Teórica	7
2.1	Pilha TCP/IP	7
2.1.1	Camada de Aplicação	9
2.1.2	Camada de Transporte	9
2.1.3	Camada de Rede	10
2.1.4	Camada de Enlace	10
2.1.5	Camada Física	11
2.2	Tecnologias para Redes Sem Fio	11
2.3	Tecnologias para Redes Veiculares	13
2.3.1	Redes de Telefonia Móvel Celular	14
2.3.2	DSRC	15
2.3.3	WiMAX	16
2.4	Pilha DSRC/WAVE	16
2.4.1	Camada de Aplicação	17
2.4.2	Camada de Transporte e Rede	18
2.4.3	Camada de Enlace	20
2.4.4	Camada Física	23
2.5	Filtro de Kalman	24
2.6	Discussão	27

3	Controle e Prevenção do <i>Broadcast Storm</i> em VANETs	28
3.1	Protocolos Reativos	29
3.1.1	Variação da Taxa de Transmissão	30
3.1.2	Ajuste da Potência de Transmissão	31
3.1.3	Variação da Taxa de Transmissão e Ajuste da Potência de Transmissão	34
3.2	Protocolos Proativos	36
3.3	Análise Comparativa	41
3.4	Discussão	43
4	Protocolo DCAP e Protocolos Relacionados	44
4.1	Protocolo DCAP	44
4.1.1	Predição de Mobilidade com Leis da Cinemática	46
4.1.2	Limiar do Erro da Predição	46
4.1.3	Algoritmo do Protocolo DCAP	48
4.2	Protocolos Relacionados	48
4.2.1	Protocolo MPBR	49
4.2.2	Taxa de Tempo de Estacionamento	49
4.2.3	Protocolo DSRC	52
4.3	Discussão	52
5	Resultados das Simulações	53
5.1	Ambiente de Simulação	53
5.1.1	SUMO	53
5.1.2	OMNeT++	54
5.1.3	Veins	54
5.2	Cenários de Simulação	55
5.2.1	Cenário A: Congestionamento	56
5.2.2	Cenário B: L2 Norte	57
5.3	Análise de Desempenho do Filtro de Kalman	58
5.4	Avaliação de Desempenho dos Protocolos	61
5.4.1	Métricas de Avaliação	61
5.4.2	Intervalo de Confiança	63
5.4.3	Análise do Cenário A: Congestionamento	64
5.4.4	Análise do Cenário B: L2 Norte	67
5.4.5	Considerações Finais	68
6	Conclusão	72
	Referências	74

Lista de Figuras

1.1	Dispositivos de comunicação OBU-201U e RSU-201U.	2
1.2	Comunicação V2V e V2I.	2
2.1	Modelo de Referência TCP/IP e Modelo de Referência OSI.	8
2.2	Comunicação entre dois nós utilizando a pilha TCP/IP.	9
2.3	Modos de operação: Infraestrutura e Ad Hoc.	12
2.4	Tipos de Rede Ad Hoc Móvel (do Inglês, <i>Mobile Ad Hoc Network</i>) (MANET).	14
2.5	Rede de telefonia móvel celular.	15
2.6	Pilha DSRC/ WAVE.	17
2.7	Exemplos de cenários onde acidentes podem ocorrer e as aplicações V2V para auxiliar os motoristas.	18
2.8	Estrutura de um WSM com TPID = 0.	20
2.9	Funcionamento do mecanismo CCF.	22
2.10	Funcionamento do mecanismo de acesso ao canal alternado.	23
2.11	Canais existentes segundo o padrão 802.11p.	24
2.12	Modelo de previsão com base no filtro de Kalman.	25
3.1	Diagrama dos tipos de protocolos para minimizar o <i>broadcast storm</i> em VANETs.	29
3.2	Exemplo de três veículos: A, B e C utilizando o mecanismo de seleção de potência.	33
3.3	Modelo de previsão da mobilidade de veículos.	38
3.4	Modelo de previsão de densidade.	40
4.1	Visão geral do funcionamento do protocolo DCAP.	44
5.1	Exemplo de simulação de tráfego na interface do SUMO.	54
5.2	Exemplo de simulação de tráfego na interface do OMNeT++.	55
5.3	Definição do cenário de simulação com três faixas e velocidades diferentes.	57
5.4	Cenário L2 Norte.	58

5.5	Distribuição de probabilidade do erro adicionado à medida do GPS ideal com $X \sim N(2.5, 1)$	59
5.6	Erro das medidas do GPS e do filtro de Kalman em relação à posição real.	60
5.7	Gráficos de barras da frequência de <i>beacons</i> enviados e do limiar de erro da predição para o cenário A.	65
5.8	Gráficos da taxa de pacotes perdidos por colisões e taxa de recepção de pacotes para o cenário A.	66
5.9	Percentual de cobertura para o cenário A.	67
5.10	Gráficos de barras da frequência de <i>beacons</i> enviados e do limiar de erro da predição para o cenário B.	69
5.11	Gráficos da taxa de pacotes perdidos por colisões e taxa de recepção de pacotes para o cenário B.	70
5.12	Percentual de cobertura para o cenário B.	71

Lista de Tabelas

3.1	Comparação dos protocolos de envio de <i>beacons</i> em VANETs.	41
3.2	Métricas de avaliação usadas dos protocolos de envio de <i>beacons</i> em VANETs.	42
4.1	Exemplo da tabela de vizinhos de um veículo.	45
4.2	Categorias limiar Φ utilizado de acordo com o percentual de densidade local.	47
4.3	Limiares para definição do cluster de cada dado.	51
5.1	Tipos de veículos e suas características físicas.	56
5.2	Tipos de veículos e suas características de mobilidade.	56
5.3	Parâmetros de simulação.	57

Lista de Abreviaturas e Siglas

AC Categoria de Acesso (do Inglês, *Access Category*).

ACI Índice de Categoria de Acesso (do Inglês, *Access Category Index*).

AIMD *Additive Increase Multiplicative Decrease*.

AP Ponto de Acesso (do Inglês, *Access Point*).

ARPANET *Advanced Research Projects Agency Network*.

ATB *Adaptive Traffic Beacon*.

BGP *Border Gateway Protocol*.

BL *Beaconing Load*.

BMMTxP *Beaconing Max-Min Tx Power Problem*.

BPSK *Binary Phase Shift Keying*.

BSM *Basic Safety Message*.

BSS *Basic Service Set*.

CBR *Channel Busy Ratio*.

CCF *Channel Coordination Function*.

CCH Canal de Controle (do inglês, *Control Channel*).

CCHI *Control Channel Interval*.

CS *Carrier Sense*.

D-FPAV *Distributed Fair Power Adjustment for Vehicular Environments*.

D2D *Device-to-Device Communication*.

DCAP *Density-based Congestion Avoidance Protocol.*

DNS *Domain Name System.*

DSRC *Comunicações Dedicadas de Curto Alcance (do Inglês, *Dedicated Short-Range Communications*).*

DynB *Dynamic Beaconing.*

EDCA *Enhanced Distributed Channel Access.*

ESS *Extended Basic Service Set.*

EUA *Estados Unidos da América.*

FANET *Flying Ad Hoc Networks.*

FCM *Fuzzy C-Means Clustering Model.*

FPAV *Fair Power Adjustment for Vehicular Environments.*

FTP *File Transfer Protocol.*

GPS *Global Positioning System.*

HALL *High Availability Low Latency.*

HTTP *Hypertext Transfer Protocol.*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

IP *Protocolo da Internet (do Inglês, *Internet Protocol*).*

IPv6 *Protocolo da Internet versão 6 (do Inglês, *Internet Protocol version 6*).*

ITS *Sistemas de Transporte Inteligente (do Inglês, *Intelligent Transportation Systems*).*

LAN *Redes Locais (do Inglês, *Local Area Networks*).*

LLC *Controle de Enlace Lógico (do Inglês, *Logic Link Control*).*

MAC *Media Access Control.*

MAN *Redes Metropolitanas, do Inglês (*Metropolitan Area Networks*).*

MANET *Rede Ad Hoc Móvel (do Inglês, *Mobile Ad Hoc Network*).*

MBL *Maximum Beaconing Load.*

MIB *Management Information Base.*

MINT *Minimum Packet Transmission Frequency.*

MLME *MAC Sublayer Management Entity.*

MPBR *Mobility Prediction Based Beacon Rate Adaptation.*

MSDU *MAC Service Data Unit.*

NCP *Network Control Protocol.*

NHTSA *National Highway Traffic Safety Administration and the Crash Avoidance Metrics Partnership.*

OBU *On-Board Unit.*

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing.*

OSI *Open Systems Interconnection.*

OSM *Open Street Map.*

OSPF *Open Shortest Path First.*

PA *Power Assignment.*

PAA *Prediction and Adaptation Algorithm.*

PDR *Packet Delivery Ratio.*

PPP *Point-to-Point Protocol.*

PSID *Provider Service Identifier.*

QAM *Modulação de Amplitude em Quadratura (do Inglês, *Quadrature Amplitude Modulation*).*

QoS *Qualidade de Serviço (do Inglês, *Quality of Service*).*

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying.*

R2V *Roadside-to-Vehicle Communication.*

RIP *Routing Information Protocol.*

RM *Resource Manager.*

RSU *Roadside Unit.*

SAE *Society of Automotive Engineering.*

SCH Canal de Serviço (do Inglês, *Service Channel*).

SCHI *Service Channel Interval.*

SMTP *Simple Mail Transfer Protocol.*

SNR *Signal-to-Noise Ratio.*

SSID *Service Set Identifier.*

SUMO *Simulation of Urban Mobility.*

TCP *Transfer Control Protocol.*

TPID *Transport Protocol Identifier.*

UANET *Underwater Ad Hoc Networks.*

UDP *User Datagram Protocol.*

UP Prioridade do Usuário (do Inglês, *User Priority*).

UTC *Coordinated Universal Time.*

V2I Comunicação de Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Infrastructure Communication*).

V2V Comunicação de Veículo para Veículo (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle Communication*).

V2V2I Comunicação de Veículo para Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure Communication*).

VANET Rede Ad Hoc Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad-Hoc Network*).

Veins *Vehicles in Network Simulation.*

WAP Ponto de Acesso Sem Fio (do Inglês, *Wireless Access Point*).

WAVE *Wireless Access in Vehicular Environments.*

WiMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access.*

WLAN *Wireless Local Area Networks.*

WME *WAVE Management Entity.*

WSA *WAVE Service Advertisement.*

WSM *WAVE Short Message.*

WSMP *WAVE Short Message Protocol.*

XML *Extensible Markup Language.*

Capítulo 1

Introdução

O uso de redes sem fio deu impulso ao surgimento dos Sistemas de Transporte Inteligente (do Inglês, *Intelligent Transportation Systems*) (ITS). Este conjunto de sistemas têm ganhado atenção na última década por tentar trazer mais segurança e conforto aos motoristas e passageiros no trânsito [1]. Gerando interesse tanto em âmbito acadêmico como comercial, os ITS prometem resolver problemas relacionados ao tráfego, como engarrafamentos, acidentes e até a poluição causada por veículos.

Em 1999, o governo dos EUA já idealizava as Comunicações Dedicadas de Curto Alcance (do Inglês, *Dedicated Short-Range Communications*) (DSRC) com objetivo principal de permitir o desenvolvimento de aplicações para evitar acidentes e melhorar as condições de tráfego [2]. Em 2010, o IEEE propôs uma emenda ao padrão das redes sem fio (IEEE 802.11) para suprir as necessidades dos ITS [3] chamada IEEE 802.11p ou popularmente *Wireless Access in Vehicular Environments* (WAVE). O WAVE representa um sistema de comunicação veicular que definiu uma arquitetura e padronizou um conjunto de serviços no ambiente veicular. Além disso, também ditou interfaces que possibilitam uma comunicação sem fio segura e acesso ao meio físico para comunicações sensíveis ao tempo. Os dispositivos de comunicação no padrão DSRC recebem o nome de *On-Board Unit* (OBU) e *Roadside Unit* (RSU), Figura 1.1. O OBU representa a interface entre o veículo e o mundo externo, permitindo a comunicação com outros veículos e com infraestruturas. O RSU representa uma infraestrutura à beira da pista que se comunica com os veículos, permitindo acesso à Internet e o uso de aplicações de lazer e segurança [4].

Os avanços na indústria automobilística e a evolução das redes sem fio fomentou o que hoje é conhecido como redes veiculares. Dentre os modos de operação em redes veiculares, pode-se citar a Comunicação de Veículo para Veículo (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle Communication*) (V2V), que pode ocorrer como o envio de um alerta indicando a intenção de se trocar de faixa devido a uma obstrução. O outro modo de operação, Comunicação de Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Infrastructure Communication*)



Figura 1.1: Dispositivos de comunicação OBU-201U e RSU-201U.

(V2I), ocorre entre veículos e uma infraestrutura como o RSU Figura 1.2. Ainda existe um modo de operação híbrido conhecido como Comunicação de Veículo para Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure Communication*) (V2V2I) que combina as características de ambos modos de operação.

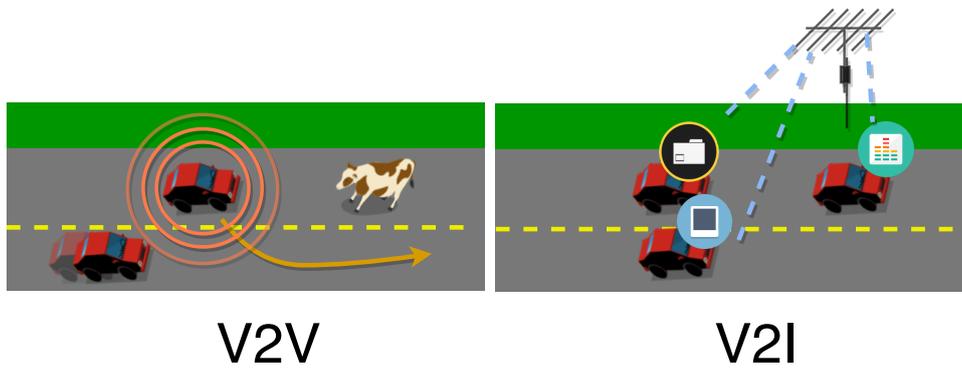


Figura 1.2: Comunicação V2V e V2I.

A estratégia de comunicação V2V constitui um tipo especial de rede conhecida como Rede Ad Hoc Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad-Hoc Network*) (VANET). Em redes veiculares, a topologia da rede está em constante mudança por causa da mobilidade dos veículos. Em VANETs, a falta de uma infraestrutura obriga cada veículo a enviar mensagens para todos os seus vizinhos contendo informações de sua posição geográfica, velocidade e direção. Assim, cada veículo poderá ter noção da topologia da rede em todo momento. No padrão DSRC/WAVE esta mensagem é conhecida como *Basic Safety Message* (BSM), ou simplesmente *beacon*. Um *beacon* é transmitido através do mecanismo de difusão ou *broadcast*, ou seja, a mensagem é transmitida e recebida por todos os veículos dentro de um raio de transmissão.

As aplicações de prevenção de acidentes em VANETs apresentam requisitos rígidos em relação a frequência de *beacons* enviados por segundo, podendo exigir frequências que variam entre 10 a 50 Hz [5]. A alta mobilidade dos nós causa mudanças na rede em

pequenos intervalos de tempo e explica a necessidade de enviar *beacons* frequentemente. Entretanto, o alto número de mensagens sendo transmitidas simultaneamente pode ocasionar em um problema conhecido como *broadcast storm* [6]. Quando VANETs passam por um *broadcast storm*, torna-se impossível enviar mensagens corretamente devido ao alto número de colisões entre elas, reduzindo a taxa de recepção de pacotes e conseqüentemente comprometendo o funcionamento correto da rede.

Protocolos para controle e prevenção do *broadcast storm* foram propostos [7, 8, 9, 10]. Eles podem ser divididos em duas categorias principais, protocolos reativos e protocolos proativos. Protocolos reativos [7, 8] tentam minimizar os efeitos causado por um *broadcast storm* assim que ele é detectado, enquanto protocolos proativos utilizam mecanismos de predição para prevenir que ele ocorra [9, 10]. Neste trabalho, um protocolo baseado na predição da posição de veículos vizinhos é proposto para substituir o envio de *beacons*. A proposta também dita que veículos devem utilizar um filtro de Kalman para reduzir o ruído presente em medidas de GPS e assim obter valores que se aproximem da posição real do veículo.

O envio de *beacons* é uma das características fundamentais das VANETs, pois garante que os nós conheçam a topologia da rede e possam enviar mensagens de alerta. Entretanto, o funcionamento de aplicações de prevenção de acidentes pode ser comprometido devido ao *broadcast storm*. Propõe-se realizar um estudo sobre as redes veiculares, com foco em VANETs e analisar os impactos causados pelo *broadcast storm*. Deve-se buscar na literatura as estratégias usadas para resolver este problema e por fim propor um novo protocolo para a transmissão de *beacons* de forma consciente e comparar seu desempenho com outras propostas.

1.1 Problema

Em VANETs, a forma mais comum dos veículos conhecerem a topologia da rede é através do envio de mensagens periódicas conhecidas como *beacons*. Aplicações para prevenção de acidentes indicam que cada veículo deve enviar *beacons* a uma taxa de 10 a 50 Hz [5]. Quando existe um alto número de veículos dentro de um raio de transmissão enviando mensagens simultaneamente, um problema conhecido como *broadcast storm* pode ocorrer e comprometer o funcionamento correto da rede. Este problema fará com que a taxa de recepção de pacotes e a cobertura sejam comprometidos, pois se torna impossível enviar mensagens corretamente. Protocolos para o envio de *beacons* têm sido propostos para controle e prevenção do *broadcast storm* causado por *beacons* [7, 9]. Alguns destes protocolos utilizam uma abordagem reativa [7, 8], onde os nós alteram seus parâmetros de transmissão quando o *broadcast storm* é detectado. Trabalhos mais recentes [9, 10] adotam uma abordagem proativa realizando a prevenção do *broadcast storm* utilizando mecanismos de predição de mobilidade ou densidade. Neste trabalho, propõe-se um protocolo para a transmissão de *beacons* em VANETs adotando uma estratégia proativa com base em predição da posição dos veículos para evitar o envio excessivo de mensagens.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

A pesquisa proposta neste documento tem como principal objetivo propor um protocolo que possibilite prevenir o problema de *broadcast storm* de *beacons* em VANETs. Seguindo as orientações do padrão DSRC/WAVE [3], adota-se uma estratégia proativa, onde cada nó da rede tentará prever as informações pertinentes de seus vizinhos, evitando o envio excessivo de *beacons*.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar estratégias para a transmissão de *beacons* na literatura e categorizá-las de acordo com suas características em reativas e proativas.
- Desenvolver uma aplicação em um ambiente de simulação para redes veiculares com o protocolo proposto.
- Comparar o desempenho do protocolo proposto com outros protocolos, adotando métricas que analisam a frequência de *beacons* enviados por segundo, a quantidade de pacotes perdidos por colisões, a taxa de recepção de pacotes e cobertura.

1.3 Metodologia de Pesquisa

A metodologia de pesquisa deste trabalho seguirá três fases. Na primeira fase, um estudo do funcionamento das redes veiculares e do padrão IEEE 802.11p será realizado através de livros, artigos e textos técnicos. Na segunda fase, o problema do *broadcast storm* de *beacons* em VANETs será discutido, bem quanto os protocolos propostos para resolver este problema. Sendo a maior parte deles publicados em artigos científicos de conferências e revistas. Na terceira e última fase, um protocolo para a transmissão de *beacons* em VANETs será implementado em um ambiente de simulação de redes veiculares e os resultados serão colhidos e analisados.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado mediante a seguinte estrutura:

- Capítulo 2:
Apresenta-se a fundamentação teórica do trabalho que aborda: (i) a pilha TCP/IP; (ii) a visão geral do funcionamento de redes sem fio seguindo o padrão 802.11; (iii) comunicações com redes sem fio em redes veiculares; (iv) descrição do padrão 802.11p DSRC/WAVE.
- Capítulo 3:
Neste capítulo são analisadas as estratégias de transmissão de *beacons* em VANETs: (i) visão geral dos protocolos propostos e os principais desafios a serem resolvidos; (ii) protocolos reativos para a transmissão de *beacons*, baseados em variação da taxa de transmissão, ajuste da potência de transmissão ou ambos, (iii) protocolos proativos para a transmissão de *beacons*, geralmente baseados em predição da posição dos vizinhos ou da densidade.
- Capítulo 4:
Apresenta-se o novo protocolo proativo para a transmissão de *beacons* baseado na predição da mobilidade de veículos através de leis da cinemática e com auxílio do filtro de Kalman. Apresenta-se o MPBR, um protocolo usado para a comparação que utiliza a clusterização *fuzzy c-means* para lidar com dados históricos dos veículos.
- Capítulo 5:
Apresenta-se o ambiente e o cenário de simulação, bem quanto os resultados encontrados e uma análise comparativa dos protocolos presentes no Capítulo 4 com base em métricas definidas neste capítulo.

- Capítulo 6:

Por fim, os objetivos propostos e aqueles que foram alcançados são discutidos. Trabalhos futuros também são considerados.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

A fundamentação teórica tem como principal objetivo nortear o desenvolvimento de um trabalho expondo os conhecimentos básicos na área de estudo escolhida. Este capítulo busca esclarecer o funcionamento de redes sem fio, e como elas fomentaram o que hoje é conhecido como redes veiculares. Algumas estratégias de implantação de redes veiculares são discutidas, com destaque para a proposta pelo IEEE com a emenda 802.11p e as adições mais recentes do padrão IEEE 1609.x, que constituem a pilha de comunicação DSRC/WAVE. Nesta seção também é apresentado o filtro de Kalman, um estimador responsável por reduzir o ruído de medidas feitas com dispositivos como o GPS.

2.1 Pilha TCP/IP

O texto a seguir foi em grande parte baseado nos trabalhos de Tanenbaum [11] e Kurose e Ross [12]. Em 1969, antes mesmo do surgimento da Internet, a *Advanced Research Projects Agency Network* (ARPANET) foi criada com intuito de conectar universidades e órgãos governamentais nos EUA. A ARPANET era uma rede com foco em pesquisa e funcionava através da troca de pacotes entre os seus usuários por meio do uso de linhas de telefone alugadas.

A ARPANET funcionou por bastante tempo utilizando o protocolo de comunicação *Network Control Protocol* (NCP). Protocolos de rede ditam através de normas e padrões como as comunicações devem ser feitas. Com o surgimento das redes de rádio e satélite, a comunicação entre os diferentes tipos de rede foi comprometida devido a problemas de compatibilidade entre os protocolos usados. O Modelo de Referência TCP/IP foi proposto para resolver este problema, ou seja, padronizar a comunicação entre redes.

Com dois protocolos principais em destaque, o *Transfer Control Protocol* (TCP) e o Protocolo da Internet (do Inglês, *Internet Protocol*) (IP). O objetivo principal do Modelo de Referência TCP/IP é garantir que diferentes redes possam se conectar de forma

integrada, permitindo a continuidade de comunicação entre dois *hosts* ativos, mesmo se algumas linhas de transmissão intermediárias falharem. Este modelo foi descrito em uma arquitetura multi-camada modularizada, ou seja, cada camada possui uma tarefa específica a ser realizada. Esta divisão é baseada no Modelo de Referência OSI, que foi definido para qualquer sistema de comunicação aberta. O OSI apresenta sete camadas, aplicação, apresentação, sessão, transporte, rede, enlace e física. Na pilha TCP/IP, segundo Kurose [12], existem apenas cinco camadas como pode ser visto na Figura 2.1.

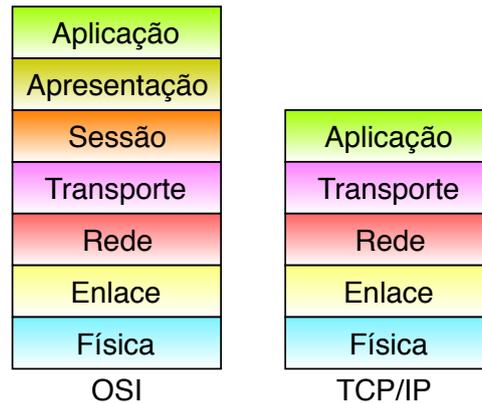


Figura 2.1: Modelo de Referência TCP/IP e Modelo de Referência OSI.

Segundo Tanenbaum [11], os princípios seguidos pelo Modelo de Referência OSI e que foram seguidos ao construir o Modelo de Referência TCP/IP são:

1. Uma camada deveria ser criada onde uma abstração diferente fosse necessária.
2. Cada camada deve ter uma função bem definida.
3. A função de cada camada deve ser definida com intuito de definir protocolos para a padronização internacional.
4. Os limites de cada camada devem ser escolhidos de forma a minimizar o fluxo de informações através das interfaces.
5. O número de camadas deve ser grande o suficiente para que funções distintas não precisem ser colocadas em conjunto sem necessidade e pequena o suficiente para que a arquitetura não se torne complicada.

Dois nós se comunicam como na Figura 2.2. A partir do nó de origem, cria-se uma mensagem através na camada de aplicação que é onde o usuário interage diretamente. Em cada camada inferior, adiciona-se um cabeçalho que corresponde às informações necessárias das características da transmissão a ser feita. O nome da mensagem passa de

segmento para datagrama e depois quadro. Na camada física os dados são transformados em sinais elétricos ou em ondas eletromagnéticas e são transmitidos. Ao receber um conjunto de dados, também conhecido como pacote, o destinatário checa os cabeçalhos de cada camada e encaminha os dados para a camada de aplicação seguindo estas especificações.

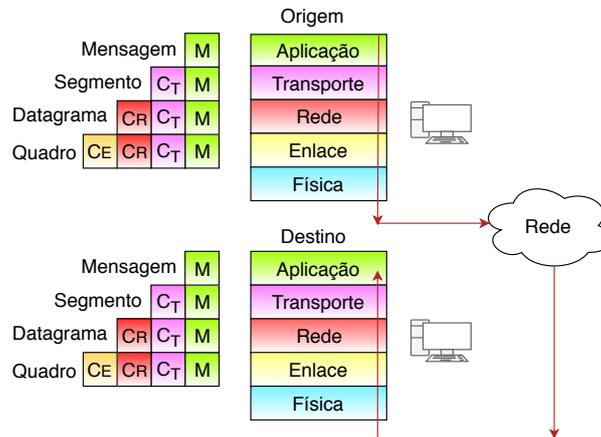


Figura 2.2: Comunicação entre dois nós utilizando a pilha TCP/IP.

2.1.1 Camada de Aplicação

Aplicações de Internet existem desde a sua concepção, dentre os exemplos mais comuns, pode-se citar o Facebook, YouTube, Skype e Netflix. Aplicações são a interface entre o usuário final e a Internet. Para o bom funcionamento das aplicações, alguns protocolos são usados como o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) utilizado em sítios, *Simple Mail Transfer Protocol* (SMTP) que permite o envio de correio eletrônico, *File Transfer Protocol* (FTP) para a transferência de arquivos e *Domain Name System* (DNS) para tradução de endereços IP em nomes. As camadas de sessão e apresentação do Modelo de Referência OSI foram aglutinadas pela camada de aplicação. Esta decisão veio do fato que as camadas de sessão e apresentação apresentam funções opcionais como criptografia de dados, compressão de dados e delimitação da sincronia da troca de dados. Ficando em cargo do desenvolvedor se deseja utilizar estes recursos ou não.

2.1.2 Camada de Transporte

A camada de transporte reside logo abaixo da camada de aplicação e acima da camada de rede. A principal tarefa de um protocolo da camada de transporte é prover uma abstração para a comunicação entre processos de aplicações sendo executados em diferentes *hosts*,

dando a ideia de que eles estão conectados diretamente. Dentre os protocolos principais desta camada, pode-se citar o *Transfer Control Protocol* (TCP) e o *User Datagram Protocol* (UDP). Com o TCP, uma conexão prévia deve ser estabelecida, este protocolo é indicado para aplicações que precisam de alta confiabilidade e que o tempo de transmissão não é crítico. Ele provê um mecanismo para controle de congestão e checagem de erros. O UDP permite a troca de mensagens entre aplicações sem uma conexão prévia, este protocolo é indicado para quando a transmissão deve ser feita rapidamente e a confiabilidade não é um fator determinante. O TCP é geralmente utilizado em conjunto com os protocolos de aplicação HTTP, SMTP e FTP. O UDP é indicado para aplicações de voz e vídeo onde a velocidade da transmissão se torna crucial.

2.1.3 Camada de Rede

A camada de rede está localizada entre a camada de transporte e a camada de enlace. Sua principal tarefa é realizar a transmissão de pacotes efetivando a comunicação entre *hosts* através do repasse e do roteamento. O repasse é feito entre apenas dois roteadores, ao transmitir um pacote o roteador deve checar o endereço IP e o encaminhar para o próximo roteador que consegue fazer com que aquele dado chegue ao seu destino. Para isso, ele checa uma tabela de repasse presente em cada roteador. O roteamento se refere a todo percurso que o pacote fará desde o seu envio até a chegada em seu destino. Para o cálculo deste trajeto, protocolos de roteamento como o *Routing Information Protocol* (RIP), *Open Shortest Path First* (OSPF) e *Border Gateway Protocol* (BGP) podem ser implementados em cada roteador.

2.1.4 Camada de Enlace

A camada de enlace se localiza logo abaixo da camada de rede e acima da camada física. Nesta camada, roteadores e hospedeiros recebem o nome de nós e um canal de comunicação entre dois nós é chamado de enlace. A principal tarefa de um protocolo da camada de enlace é mover datagramas de um nó para outro nó sob um enlace. Dentre os protocolos existentes, pode-se citar o *Ethernet*, IEEE 802.11 - *Wi-Fi* e o *Point-to-Point Protocol* (PPP). Dentre os serviços que podem ser oferecidos por um protocolo da camada de enlace figuram o enquadramento de dados, acesso ao enlace, entrega confiável e a detecção e correção de erros.

- **Enquadramento de Dados:** Ao receber um datagrama de uma camada superior, quase todos os protocolos da camada de enlace inserem um novo cabeçalho com dados antes da transmissão pelo enlace. O dado se torna um quadro que consiste de

um campo de dados, no qual o datagrama da camada de rede é inserido e campos de cabeçalho. Cada protocolo fica responsável por especificar a estrutura do quadro.

- **Acesso ao Enlace:** Especifica as regras para que um quadro possa ser transmitido pelo enlace. Quando existem apenas dois pontos separando um enlace o protocolo é simples, já que basta o canal estar disponível para a transmissão ser feita. Para casos onde vários nós compartilham o mesmo meio, o protocolo deve coordenar a transmissão de cada quadro para evitar colisões.
- **Entrega Confiável:** Assim como o TCP, alguns protocolos da camada de enlace podem prover entrega confiável. Se o protocolo garantir a entrega confiável então o datagrama da camada de rede será enviado pelo enlace sem erro. Um serviço deste tipo pode ser realizado através de mensagens de confirmação e retransmissões quando erros são detectados. A entrega confiável é geralmente implementada quando se trabalha com redes sem fio devido a quantidade de erros causados por interferências externas.
- **Detecção e Correção de Erros:** Ruído eletromagnético e atenuação de sinal podem causar erros de *bits*. Um erro de *bit* ocorre quando um dispositivo físico no lado do receptor assume que o valor de um *bit* do quadro é 0 quando foi transmitido como 1 ou vice-versa. Os protocolos da camada de enlace dispõem de um mecanismo para detectar erros de *bits*. Ao transmitir um quadro, *bits* de detecção de erro são adicionados ao quadro, quando o nó receptor recebe o quadro ele deve realizar a checagem de erro. A correção de erro adiciona um mecanismo para determinar exatamente onde ocorreu o erro e subsequentemente, corrigi-lo.

2.1.5 Camada Física

A camada física está localizada na base da pilha de comunicação. Sua principal tarefa é transmitir *bits* através de um canal de comunicação. Um protocolo da camada física deve garantir que um *bit* transmitido como 0 ou 1 seja recebido no lado oposto com o valor correto. Para representar *bits*, sinais elétricos ou ondas eletromagnéticas podem ser usados.

2.2 Tecnologias para Redes Sem Fio

Após o surgimento dos computadores portáteis, surgiu a necessidade de se conectar à Internet sem o uso de fios e cabos [11]. A estratégia mais simples era equipar computadores com transmissores e receptores de curto alcance que permitiam a troca de pacotes. Várias

empresas ofereciam estes serviços com seus próprios padrões. Devido a falta de um padrão comum, os aparelhos podiam não ser compatíveis dependendo de sua marca. Grupos de pesquisa começaram a trabalhar para definir um padrão e foi em meados da década de 90 que se decidiu padronizar as comunicações em redes sem fio através do IEEE com o padrão 802.11 ou *Wi-Fi* [13].

O IEEE 802 representa uma família de padrões que definem as funções a serem realizadas nas camadas física e de enlace do Modelo de Referência OSI. O foco principal do IEEE 802 é dar suporte para as redes cabeadas Redes Locais (do Inglês, *Local Area Networks*) (LAN) e Redes Metropolitanas, do Inglês (*Metropolitan Area Networks*) (MAN), definindo uma série de protocolos para a comunicação. Para habilitar o funcionamento das redes sem fio, tornou-se necessário propor novos protocolos de rede e realizar adaptações aos protocolos já existentes. Para dar suporte às redes sem fio, o IEEE 802.11 [13] foi proposto e ficou popularmente conhecido como *Wi-Fi*.

Em redes sem fio ou *Wireless Local Area Networks* (WLAN), múltiplos usuários podem se conectar à Internet sem precisar estar em um local fixo. Existem dois modos de operação em uma rede WLAN, Ad Hoc ou Infraestrutura. No modo Infraestrutura, dispositivos portadores de uma interface para comunicação com redes sem fio podem se conectar a uma infraestrutura externa para conseguir acesso à Internet. Esta infraestrutura recebe o nome de Ponto de Acesso Sem Fio (do Inglês, *Wireless Access Point*) (WAP), ou simplesmente AP. No modo Ad Hoc, a existência de um AP não é necessária, ou seja, os dispositivos podem transferir dados entre si sem depender de uma infraestrutura.

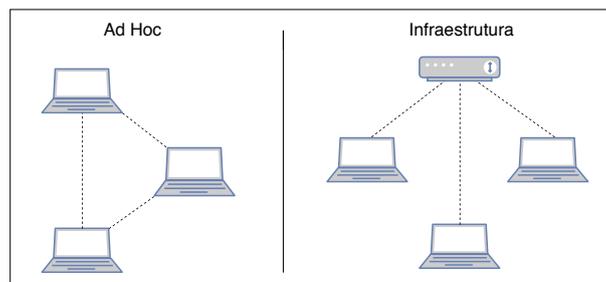


Figura 2.3: Modos de operação: Infraestrutura e Ad Hoc.

O principal elemento de uma rede sem fio operando no modo Infraestrutura é o Ponto de Acesso (do Inglês, *Access Point*) (AP). Este componente é responsável por se conectar a uma rede cabeada e garantir o acesso à Internet para seus usuários. Os dispositivos conectados ao AP constituem um *Basic Service Set* (BSS), e um conjunto de BSSs é chamado de *Extended Basic Service Set* (ESS) [14]. Para que um computador consiga se conectar à infraestrutura, o administrador da rede deve associar um *Service Set Identifier* (SSID) ao AP, que funciona como um identificador único. Além disso, cada adaptador de

rede deve conter um endereço físico único conhecido como endereço MAC. Estes endereços são conhecidos como identificadores de *hardware* e são formados por um conjunto de 6 *bytes* de comprimento, ou seja, existem 2^{48} possíveis endereços. Para garantir a unicidade, todos estes endereços são administrados pelo IEEE.

O padrão IEEE 802.11 define que um AP deve enviar mensagens periódicas em diversos canais com informações acerca de seu SSID e seu endereço MAC. Estas mensagens são conhecidas como *beacons* [12]. Ao receber *beacons*, um dispositivo consegue detectar a existência de redes *Wi-Fi* e pode até medir a intensidade de seu sinal. Nem sempre uma rede com um sinal bom apresentará uma qualidade melhor, pois pode estar congestionada. Com estas informações, o usuário pode escolher dentre as redes existentes ao seu redor qual deseja se conectar.

2.3 Tecnologias para Redes Veiculares

A possibilidade de usar tecnologias de redes sem fio para comunicação entre veículos tem sido amplamente investigada nas últimas décadas com o surgimento dos Sistemas de Transporte Inteligente (do Inglês, *Intelligent Transportation Systems*) (ITS) [15]. Os ITS criam uma rede conectando os veículos que permite a troca de informações para melhorar o conforto e a segurança de seus usuários. Esta rede recebe o nome de rede veicular, sua implantação já tem sido feita em alguns países [1]. Problemas relacionados ao tráfego como engarrafamentos, poluição e acidentes de trânsito podem ser resolvidos através de aplicações em redes veiculares.

Assim como as redes sem fio, as redes veiculares também possuem dois tipos de operação. No modo de operação Comunicação de Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Infrastructure Communication*) (V2I) ou *Roadside-to-Vehicle Communication* (R2V), os veículos se comunicam com uma infraestrutura à beira da pista para receber e transmitir dados através de uma interface de rede sem fio equipada ao veículo. Para o padrão WAVE/DSRC [16], a infraestrutura é conhecida como *Roadside Unit* (RSU) e a interface de comunicação equipada a cada veículo recebe o nome de *On-Board Unit* (OBU).

A Comunicação de Veículo para Veículo (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle Communication*) (V2V) possui características de uma rede sem fio Ad Hoc. Os nós devem se comunicar sem auxílio de uma infraestrutura como o RSU, por este motivo receberam o nome de Rede Ad Hoc Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad-Hoc Network*) (VANET). A transmissão de informações na rede depende da coordenação dos nós utilizando protocolos e algoritmos de roteamento [17]. VANETs são classificadas como um tipo de Rede Ad Hoc Móvel (do Inglês, *Mobile Ad Hoc Network*) (MANET) devido a alta mobilidade dos nós. Como

pode ser visto na Figura 2.4, além de VANETs, surgiram outros tipos de MANET para se adaptar a outros ambientes. *Flying Ad Hoc Networks* (FANET) para o ambiente aéreo e *Underwater Ad Hoc Networks* (UANET) para o ambiente naval. Para as VANETs em especial, trabalhos têm sido propostos com o foco em melhorar as condições de trânsito em congestionamentos [18, 19, 20] e também para evitar acidentes de trânsito [21, 22].

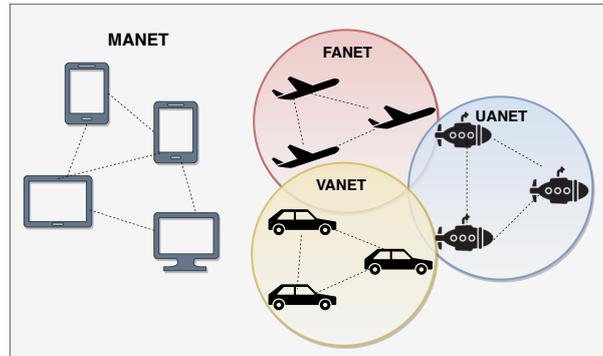


Figura 2.4: Tipos de Rede Ad Hoc Móvel (do Inglês, *Mobile Ad Hoc Network*) (MANET).

Além dos dois métodos de comunicação já apresentados, uma alternativa combinando as características de V2V e V2I conhecida como Comunicação de Veículo para Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle-to-Infrastructure Communication*) (V2V2I) foi proposta. Inicialmente idealizado por Miller [23], o autor afirma que a rede deve ser dividida em zonas e em cada zona um veículo deverá desempenhar o papel de super veículo. Apenas o super veículo seria capaz de se comunicar com as infraestruturas e outros super veículos, enquanto os outros veículos dentro de uma zona deveriam apenas se comunicar com o super veículo. Esta estratégia visa aproveitar os benefícios do V2I em tempo de resposta com a comunicação com a infraestrutura e a garantia de nenhum ponto cego trazido pela rede distribuída V2V.

Os três principais candidatos para a implantação de redes veiculares são as redes celulares, Comunicações Dedicadas de Curto Alcance (do Inglês, *Dedicated Short-Range Communications*) (DSRC) e o *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX). Cada estratégia apresenta seus benefícios e desvantagens, e estes serão discutidos a seguir. O DSRC representa o uso das redes sem fio *Wi-Fi* através da emenda proposta pelo IEEE 802.11p [3] em conjunto com os padrões IEEE 1609.x, constituindo uma pilha de comunicação conhecida como DSRC/WAVE.

2.3.1 Redes de Telefonia Móvel Celular

Em uma rede de telefonia móvel celular, Figura 2.5, partições de terra chamadas células permitem a comunicação de seus usuários com a presença de uma torre de comunicação.

Esta torre é capaz de transmitir e receber informações de diferentes dispositivos. Como já são amplamente usadas, o seu uso se tornou uma opção a considerar para a implantação de redes veiculares. As redes celulares apresentam uma zona de cobertura extensa, mas isto vem com alguns problemas como a baixa taxa de transmissão de dados quando comparada com outras estratégias e o alto custo para uso. As redes celulares operam num espectro de frequências licenciadas para empresas de telefonia e por este motivo, o custo para uso é definido por cada empresa. Além disso, a comunicação entre veículos será comprometida em locais onde não há a presença de uma torre, algo comum em cenários como estradas conectando estados. O *Device-to-Device Communication* (D2D) foi proposto para o uso em conjunto com as redes celulares. Ao utilizar D2D, os veículos podem transmitir dados entre si sem depender de uma infraestrutura. Mesmo se parecendo com as redes Ad Hoc do padrão IEEE 802.11, o D2D não possui algoritmos de roteamento, já que a conexão geralmente é feita em um salto entre apenas dois nós.

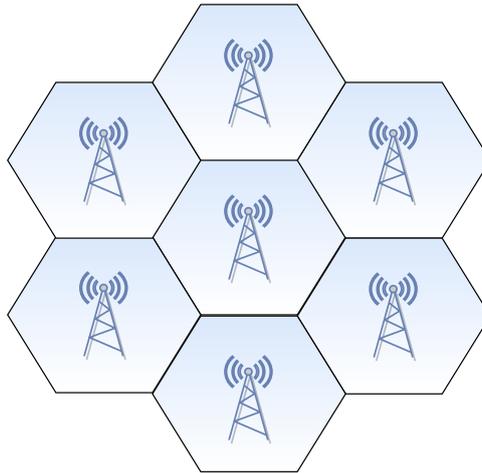


Figura 2.5: Rede de telefonia móvel celular.

2.3.2 DSRC

Em 1999, o governo dos Estados Unidos alocou uma largura de banda de 75 MHz em uma frequência de banda próxima a 5.9 GHz para Comunicações Dedicadas de Curto Alcance (do Inglês, *Dedicated Short-Range Communications*) (DSRC), com uso exclusivo em redes veiculares [2]. O objetivo principal era permitir o desenvolvimento de aplicações públicas para melhorar o fluxo de tráfego e salvar vidas no trânsito. A ASTM2313 foi o primeiro grupo a tentar padronizar a tecnologia de rádio DSRC [24]. A partir de 2004, esta tarefa passou para o grupo de pesquisa do IEEE 802.11 devido a semelhança entre o DSRC e uma emenda que visa dar suporte a operações com pouca latência conhecida como

IEEE 802.11a. Em 2010, uma emenda ao padrão 802.11 chamada de 802.11p foi aceita pelo comitê do IEEE e recebeu o título de *Wireless Access in Vehicular Environments* (WAVE) [3], tornando-se assim uma das opções para a implantação de redes veiculares.

Redes do padrão IEEE 802.11p apresentam os mesmos problemas de redes IEEE 802.11. Dentre eles, pode-se citar a atenuação do sinal, interferência e a questão da segurança. Além disso, as redes *Wi-Fi* não foram idealizadas para funcionamento em ambientes ao ar livre, o que pode trazer mais desafios para sua implantação em ambientes veiculares. Um dos benefícios de se optar pelo uso de redes 802.11p é que já existe uma grande quantidade de infraestrutura disponível devido a utilização de APs. Ademais, estas redes conseguem prover taxas de transmissão de dados maiores do que as redes celulares [1].

2.3.3 WiMAX

O *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) também pode ser considerado para a implantação de redes veiculares. Este padrão foi introduzido em 2001 através do IEEE 802.16 [25]. Com a motivação de prover acesso à rede de banda larga com uma distância de até quase 50 Km. Esta tecnologia tem sido testada em regiões de difícil acesso, já que apresenta uma área de cobertura maior por oferecer altas taxas de transmissão de dados, podendo chegar a até 75 Mbps. Entretanto, o WiMAX não consegue garantir estas taxas em ambientes móveis como as redes veiculares, em [26], os autores provam que as redes WLAN apresentam um melhor desempenho em ambientes veiculares quando comparadas com o WiMAX. Além deste problema, o WiMAX não é ubíquo, logo, o custo para se instalar novas infraestruturas pode se tornar um agravante ao escolher este método de implantação.

2.4 Pilha DSRC/WAVE

Esta seção define as principais características do padrão DSRC/WAVE para a implantação de redes veiculares. Sendo a opção escolhida para estudo devido ao suporte contínuo pelo IEEE e pelos esforços do departamento de trânsito dos EUA com testes em cenários reais [27]. Pilhas de protocolos de comunicação geralmente apresentam dois planos de ação, o plano de gerenciamento e o plano de dados, o mesmo é notado na pilha DSRC/WAVE, Figura 2.6. O plano de gerenciamento de uma camada determina os sistemas responsáveis por configurar, monitorar e gerenciar serviços. O plano de dados de uma camada lida com o tráfego de dados do usuário e utiliza os serviços do plano de gerenciamento para desempenhar suas tarefas. Assim como a pilha TCP/IP, Seção 2.1, a pilha DSRC/WAVE é dividida em cinco camadas principais, aplicação, transporte, rede, enlace e física.

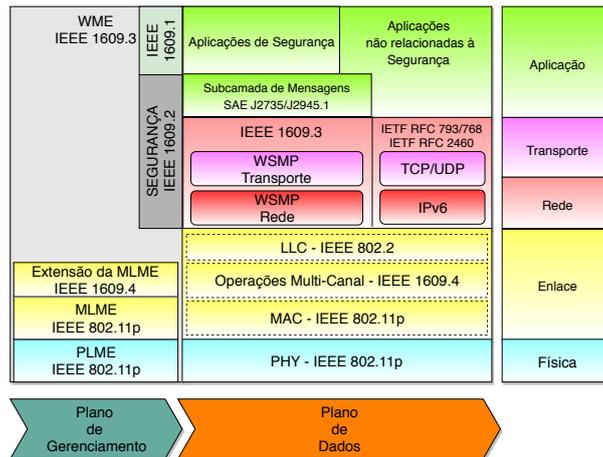


Figura 2.6: Pilha DSRC/ WAVE.

O padrão IEEE 802.11p define as especificações da camada física e de enlace do WAVE, os padrões da família IEEE 1609.x foram adicionados posteriormente para dar suporte e evolução ao padrão. O IEEE 1609.1 [28] especifica serviços e interfaces da aplicação de gerenciamento de recursos da arquitetura WAVE na camada de aplicação. O IEEE 1609.2 define mecanismos de segurança na comunicação [29]. O IEEE 1609.3 define a configuração e gerenciamento da conexão WAVE [30] através da *WAVE Management Entity* (WME). Neste padrão também é especificado como os protocolos de rede e transporte podem ser usados dependendo do tipo de dado a ser transmitido. O *WAVE Short Message Protocol* (WSMP) já existia desde a concepção do DSRC e é utilizado para a transmissão de mensagens de segurança, atuando como um protocolo de rede e transporte. Para o tráfego de dados de aplicações não relacionadas à segurança, deve-se usar o protocolo de rede IPv6 [31] com o protocolo de transporte TCP [32] ou o protocolo UDP [33]. O IEEE 1609.4 [34], inclui a operação multi-canal na camada de enlace, permitindo que veículos desfrutem de serviços de segurança e conforto ao mesmo tempo.

2.4.1 Camada de Aplicação

A camada de aplicação se encontra no topo da pilha DSRC/WAVE, Figura 2.6. Esta camada inclui processos de aplicação e protocolos adicionais para dar suporte às aplicações de prevenção de acidentes e lazer. O padrão SAE J2735 [35] define um dicionário contendo um conjunto de mensagens DSRC/WAVE que permitem o funcionamento de aplicações em redes veiculares. No padrão SAE J2735 [35] uma mensagem é composta por quadros de dados e elementos de dados. Um elemento de dado são objetos primitivos como a velocidade, direção, latitude e longitude do veículo. Quadros de dados são uma coleção de elementos de dados. Um dos tipos de mensagens definida neste padrão é a *Basic*

Safety Message (BSM), uma mensagem de segurança utilizada em comunicações V2V que também é conhecida como *beacon*. O envio periódico de BSMs é fundamental para a construção da topologia da rede e auxilia o funcionamento de aplicações para cenários de colisão traseira, mudança de faixa ou de interseção, Figura 2.7 [36].

Cenário e o tipo de alerta	Exemplo do cenário
<p>Alerta de colisão frontal Quando se aproxima de um veículo que está parando ou está parado.</p> <p>Cenários de Colisão Traseira</p> <p>Alerta de emergência de luz de freio eletrônico Quando se aproxima de um veículo que está parado e que não é visível devido a alguma obstrução.</p>	
<p>Alerta de ponto cego Detecta veículos que podem invadir a faixa atual de um veículo inesperadamente.</p> <p>Cenários de Mudança de Faixa</p> <p>Alerta de passagem proibida Detecta veículos em faixas opostas que não estão visíveis devido a alguma obstrução.</p>	
<p>Alerta de interseção perigosa Detecta a presença de um veículo em uma interseção onde não há um semáforo ou sinalização e a visibilidade é baixa.</p> <p>Cenário de Interseção</p>	

Figura 2.7: Exemplos de cenários onde acidentes podem ocorrer e as aplicações V2V para auxiliar os motoristas.

No que tange ao plano de gerenciamento, o padrão IEEE 1609.1 [28] define uma aplicação conhecida como *WAVE Resource Manager* (RM). O RM foi modelado para permitir a comunicação entre veículos e aplicações remotas. Estas aplicações remotas devem se comunicar com os OBUs presentes nos veículos através dos RSUs. O RM tem como função coordenar comunicações entre aplicações remotas e veículos. O RM ainda está em período de testes.

2.4.2 Camada de Transporte e Rede

Os serviços providos pelas camada de transporte e rede são descritos no padrão IEEE 1609.3 [30]. Neste documento são definidos serviços para o plano de dados como a comunicação com a subcamada de Controle de Enlace Lógico (do Inglês, *Logic Link Control*) (LLC), o uso dos protocolos de comunicação IPv6 com TCP/UDP e WSMP. Sobre o plano de gerenciamento, o WAVE provê uma entidade para a gestão de serviços de rede conhecida como *WAVE Management Entity* (WME). A WME é responsável por processar Requisições de Serviço de Aplicações, Monitorar WSAs, Configurar IPv6 através de

dados recebidos de outros dispositivos WAVE e realizar a Manutenção da *Management Information Base* (MIB), uma tabela que guarda informações das aplicações e do canal de transmissão. O foco deste trabalho são as comunicações feitas no modo V2V, logo as informações mais relevantes para o trabalho neste ambiente serão detalhadas.

Protocolo WSMP para V2V

Para aplicações não relacionadas a segurança, o WAVE suporta operações com os protocolos de transporte TCP/UDP em conjunto com o protocolo de rede IPv6. Para comunicações de curto alcance, sensíveis ao tempo e com alta prioridade, deve-se utilizar o protocolo WSMP. O foco deste trabalho são as comunicações V2V, que fazem uso do protocolo WSMP exclusivamente. Neste protocolo, veículos se comunicam através da troca de mensagens conhecidas como *WAVE Short Message* (WSM). A estrutura de um WSM pode ser vista através da Figura 2.8. Um datagrama deste tipo é composto pelo cabeçalho WSMP que é dividido em WSMP-N e WSMP-T representando as informações relevantes para a camada de rede e transporte respectivamente.

Em relação aos campos do WSMP-N, o Subtipo indica que tipo de protocolo de rede deve ser utilizado, o Indicador de Opção do Cabeçalho WSMP-N indica se o campo de extensão estará habilitado ou não, logo seu uso é opcional. Caso este campo seja habilitado, torna-se possível definir as características com que a mensagem deve ser transmitida. Dentre os campos opcionais figuram o Número do Canal a ser usado, a Potência de Transmissão, a Taxa de Dados a ser usada e a Carga do Canal.

Ainda sobre o cabeçalho WSMP-N, o campo Versão WSMP indica a versão do protocolo WSMP. De acordo com o padrão atual IEEE 1609.3 [30], a versão deve ser igual a 3. Todos os valores acima deste são reservados. Nenhum processamento deverá ser feito se um nó receber um WSM com uma versão não suportada. O campo TPID funciona como um identificador do tipo de protocolo de transporte sendo utilizado, com este valor é possível determinar como o cabeçalho WSMP-T será construído. Segundo a Figura 2.8, para um TPID = 0, o cabeçalho WSMP-T será formado por um campo chamado PSID e o Comprimento do WSM. O PSID é utilizado para identificar os serviços providos por outros dispositivos e representa como o endereçamento é feito na pilha DSRC/WAVE.

O suporte ao WSMP é obrigatório para todos os dispositivos WAVE. O envio de um WSM para as camadas superiores depende do valor de seu PSID. Ao receber uma requisição das camadas superiores para enviar um WSM, o WSMP é responsável por verificar o comprimento do cabeçalho WSMP e dos dados do WSM. Se os valores forem iguais aos esperados então a mensagem será gerada e transmitida segundo as informações do cabeçalho. Caso o campo opcional esteja habilitado, o WSM será gerado segundo os valores ali definidos.

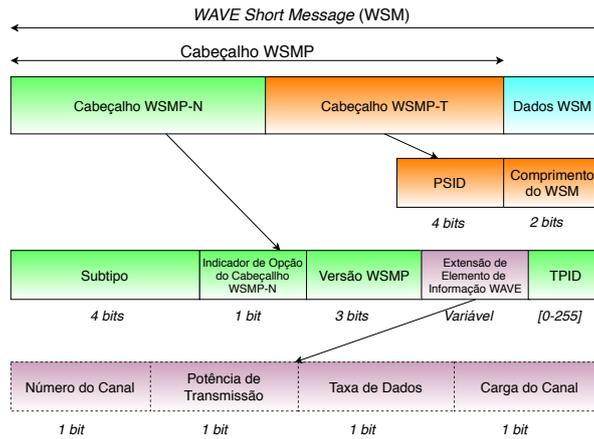


Figura 2.8: Estrutura de um WSM com TPID = 0.

2.4.3 Camada de Enlace

As ações realizadas na camada de enlace são detalhadas nos padrões IEEE 802.11p e IEEE 1609.4 [3, 34]. Assim como a camada de rede, a camada de enlace também tem tarefas no plano de dados e no plano de gerenciamento. O plano de dados deve conter o necessário para prover serviços de dados para entrada e saída como a Seleção de Canal, Roteamento de Canal e deve ser capaz de prover um mecanismo para definição da Prioridade de Usuário. Sobre o plano de gerenciamento da camada de enlace, o WAVE provê uma entidade conhecida como *MAC Sublayer Management Entity* (MLME), que tem como função coordenar o acesso aos canais e o mecanismo de troca entre eles, garantindo que os quadros sejam transmitidos corretamente no canal e tempo correspondentes.

Os dispositivos WAVE enviam suas mensagens de acordo com a operação a ser realizada através de dois tipos de canais, o Canal de Controle (do inglês, *Control Channel*) (CCH) e o Canal de Serviço (do Inglês, *Service Channel*) (SCH). O CCH deve ser utilizado para anúncios de serviço WSA e mensagens do protocolo WSMP, ou seja, WSMs que são mensagens geralmente usadas em aplicações para prevenção de acidentes. O SCH serve para a transmissão de dados da pilha IPv6, ou seja, datagramas IP, mas também podem ser usados para enviar WSM. Existem dois tipos de arquiteturas de dispositivos para DSRC, camada única e camada múltipla. Dispositivos de camada única apresentam um custo menor, mas dependem de um mecanismo de troca de canais para seu funcionamento. Dispositivos de camada múltipla são capazes de utilizar os dois tipos de canais simultaneamente, mas como esperado, apresentam um custo maior.

Subcamada LLC

Uma das subcamadas que compõe a camada de enlace é o Controle de Enlace Lógico (do Inglês, *Logic Link Control*) (LLC). O LLC é responsável por controlar a sincronização de quadros, realizar controle de fluxo e checagem de erro. No WAVE, a camada de rede deve se comunicar com a LLC ao transmitir ou receber dados. O cabeçalho da subcamada LLC consiste de apenas um campo de 2 octetos conhecido como *Type*. Quando se deseja realizar a transmissão de um pacote através do IPv6, a LLC define o valor do campo *Type* com o valor de *EtherType* igual a 0x86DD. Ao realizar a transmissão de um pacote com o WSMP, o valor de *EtherType* é igual a 0x88DC. Quando se recebe um MSDU da camada de enlace, a LLC checa o campo *Type* com o *EtherType* e extrai o pacote. Dependendo do valor, a LLC encaminha o pacote para o IPv6 ou para o WSMP. Logo, sua principal tarefa é identificar o tipo de protocolo que está sendo usado na transmissão ou recepção funcionando como uma interface entre as camadas de rede e enlace.

Roteamento e Seleção de Canal

Como pode ser visto na Figura 2.9, o 802.11p acrescenta um mecanismo para funcionamento tanto com WSMP e IPv6 conhecido como *Channel Coordination Function* (CCF) que implementa o Roteador de Canal e o Seletor de Canal. Além disso, implementa filas de Categoria de Acesso (do Inglês, *Access Category*) (AC). Ao receber um quadro da subcamada LLC o Roteador de Canal checa um campo em seu cabeçalho chamado *EtherType* e decide se ele é um datagrama WSMP ou um datagrama IP. O Roteador de Canal é responsável por mapear aquele datagrama para a fila de AC respectiva de acordo com seu valor de Prioridade do Usuário (do Inglês, *User Priority*) (UP) seguindo o Índice de Categoria de Acesso (do Inglês, *Access Category Index*) (ACI), que representa a prioridade do dado.

Se o dado for um datagrama WSMP, ele será roteado para uma fila de acordo com o identificador do canal e a prioridade do dado e pode ser transmitido tanto no CCH ou em um dos SCHs. Os datagramas IP só podem ser transmitidos através de canais de serviço SCH e devem ser registrados com um perfil de transmissor na *MAC Sublayer Management Entity* (MLME). Este perfil deve conter informações como número do SCH, nível de potência, o estado adaptável deste nível de potência e a taxa de dados. A MLME deve armazenar este e mais perfis na MIB. Ao receber um datagrama IPv6 da LLC, torna-se possível rotear este para o *buffer* de dados que corresponde a um SCH específico. Estes procedimentos permitem que as camadas superiores tenham controle dos parâmetros de transmissão da camada física de forma modularizada [37].

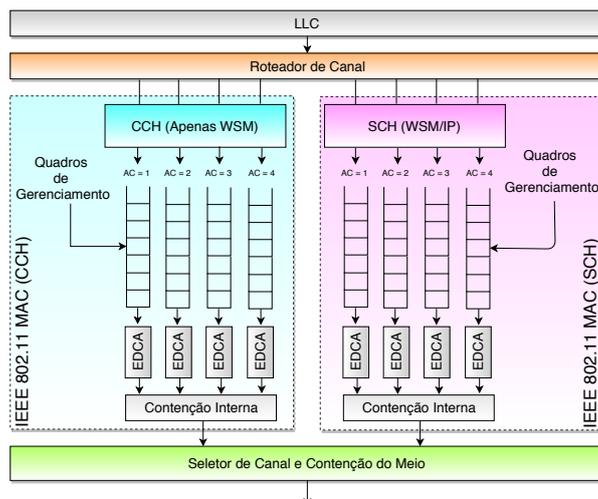


Figura 2.9: Funcionamento do mecanismo CCF.

O Seletor de Canal é responsável por tomar decisões acerca do canal que um quadro ou datagrama será enviado. Ele deve considerar as políticas definidas na MIB para decidir se aquele canal ainda é válido para a transmissão ou não. Estas informações são recebidas de uma entidade de gerenciamento chamada de WME. A Prioridade do Usuário (do Inglês, *User Priority*) também faz parte da camada de enlace, porém não deve ser confundida com a prioridade de aplicações que se refere a decisão da camada de rede de quem deve ter o acesso a um serviço primeiro. A prioridade na camada de enlace indica quais quadros devem ser transmitidos primeiro.

Prioridade de Usuário

O padrão WAVE define que cada WSM do protocolo WSMP deve ter a taxa de transmissão de dados na qual será transmitido, o número do canal que será usado e a potência de transmissão definidos pelas camadas superiores. Dessa maneira, a comunicação entre os nós se torna mais flexível dependendo das condições atuais da rede. O WAVE utiliza o *Enhanced Distributed Channel Access* (EDCA) da emenda IEEE 802.11e [38] e o estende para o uso em múltiplos canais. O EDCA é um mecanismo para a implementação de Qualidade de Serviço (do Inglês, *Quality of Service*) (QoS) em redes sem fio. Ele define prioridades para diferentes tipos de tráfego, designando valores da janela de contenção máxima e mínima dependendo do tipo de dado a ser transmitido.

Sincronização Multi-Canal

O Seletor de Canal consegue realizar suas tarefas devido ao método de sincronização utilizado no WAVE. Cada dispositivo WAVE troca de canais em intervalos de tempo defi-

nidos, ou seja, o acesso aos canais deve ser sincronizado. A informação de temporizadores usada para sincronização deve vir de uma função de gerenciamento de temporização de informações recebidas de outros dispositivos WAVE, mas também pode ser local. Se for local, usa-se o *Coordinated Universal Time* (UTC), podendo ser derivado de vários locais inclusive do próprio sistema de navegação do veículo.

Acesso ao Canal

O esquema de acesso aos canais para um dispositivo de camada única acontece de diferentes maneiras. No acesso contínuo, o dispositivo só usufrui do CCH e não usa nenhum serviço. No modo de acesso alternado, usa-se metade do tempo de sincronização de 100 ms para acessar o canal de controle CCH e a outra metade para um ou mais canais de serviço SCH. Estes intervalos de 50 ms são conhecidos como *Control Channel Interval* (CCHI) e *Service Channel Interval* (SCHI) respectivamente, Figura 2.10. O intervalo de guarda de 2 ms garante que o dispositivo conseguirá realizar a troca entre os canais sem problemas. Para dispositivos com camada múltipla, todos os esquemas de camada única também estão disponíveis, assim como o modo de acesso imediato ou estendido, onde o CCH pode ser acessado mesmo durante o SCHI.

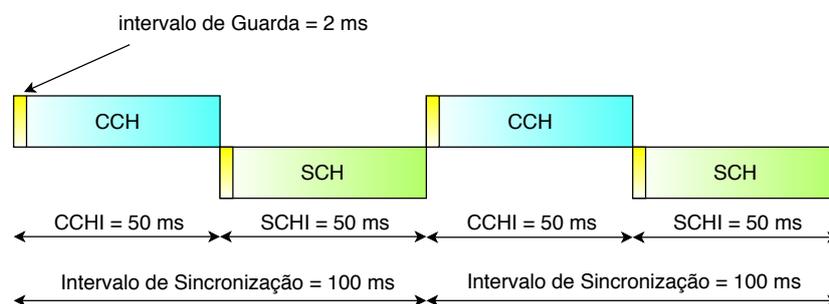


Figura 2.10: Funcionamento do mecanismo de acesso ao canal alternado.

2.4.4 Camada Física

A camada física da pilha WAVE é baseada no padrão IEEE 802.11 [13], mas com modificações para se adaptar ao ambiente de alta mobilidade das redes veiculares. O IEEE 802.11p foi proposto [3] considerando as condições de alta mobilidade dos nós da rede. A principal tarefa da camada física é receber e enviar fisicamente os dados na rede. Sua unidade básica são *bits* que são transmitidos através de ondas eletromagnéticas ou sinais elétricos, representando os valores 0 e 1. Uma das mudanças mais notáveis em relação ao padrão original é a largura de banda de 75 MHz dividida em sete canais de operação

de 10 MHz cada. Estes canais são localizados em um espectro de frequência de banda próximo a 5.9 GHz. Os canais 174, 176, 180 e 182 são usados como canais de serviço ou SCH, enquanto o canal 178 é utilizado como canal de controle ou CCH. O canal 172 não é usado e o canal 184 ou *High Availability Low Latency* (HALL) é designado para uso futuro, Figura 2.11.

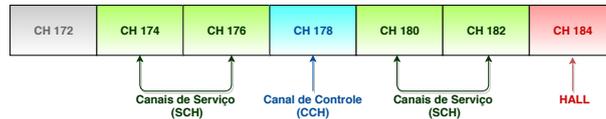


Figura 2.11: Canais existentes segundo o padrão 802.11p.

Para prover o uso de diferentes taxas de dados, o padrão 802.11p define que se deve utilizar o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) definido pela emenda IEEE 802.11a [39]. O OFDM permite que diferentes usuários compartilhem o mesmo canal de forma independente através de subportadoras usadas para a modulação do sinal. Por serem ortogonais, não há interferência entre as subportadoras. Para o WAVE existem 52 subportadoras, que são moduladas utilizando BPSK, QPSK, 16-QAM ou 64-QAM. A taxa de transmissão de dados pode variar de 3 a 27 *Mbps*.

2.5 Filtro de Kalman

O filtro de Kalman foi desenvolvido por Rudolf Emil Kálmán em meados da década de 60 para resolver problemas causados por medidas de sensores com ruído [40]. Um filtro de Kalman é um filtro recursivo e eficiente que estima o estado de um sistema dinâmico linear a partir de várias medidas com ruído. Em resumo, o filtro de Kalman é um conjunto de equações matemáticas e modelos de estado espaço que implementam um estimador baseado em previsão e correção. O filtro de Kalman possui dois elementos principais, o estado ou estimativa e a medida obtida de um sensor. Ele é dividido em duas etapas principais, previsão e correção. Neste trabalho, considera-se o uso do filtro de Kalman para prever a mobilidade de um veículo e remover o ruído causado por um sensor como o GPS. O uso de técnicas de filtragem para a remoção do ruído do GPS pode ser notado em outros trabalhos [41, 42].

No ambiente veicular, pode-se definir o ciclo de funcionamento do filtro de Kalman de acordo com a Figura 2.12. Quando o filtro é inicializado, uma estimativa dos valores iniciais é feita, geralmente assumindo que os valores são iguais a zero. O primeiro passo é calcular o ganho de Kalman, um fator de correção utilizado para ajustar a previsão de acordo com a medida do GPS. Na fase de correção, o veículo realiza uma nova medida de

sua posição com o GPS. Um novo erro de covariância é calculado baseado na diferença entre os valores previstos e a medição. Com os novos valores calculados, torna-se possível realizar uma predição para o próximo intervalo de tempo Δt , assume-se que $\Delta t = 1$ por simplicidade. Como o filtro de Kalman é recursivo, espera-se que a predição se torne mais próxima da realidade com o passar do tempo.

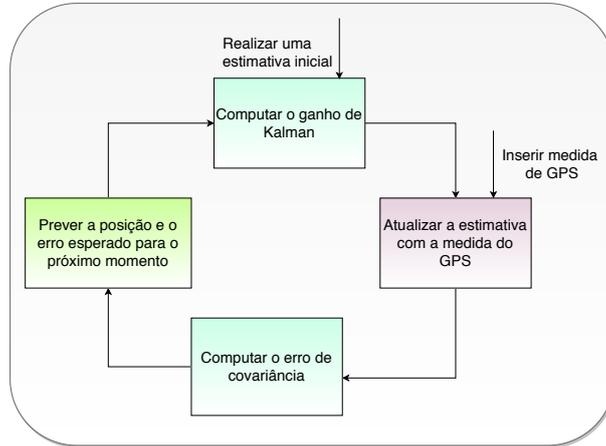


Figura 2.12: Modelo de predição com base no filtro de Kalman.

Para formalizar o funcionamento de um filtro de Kalman é importante definir algumas equações. O vetor do estado de mobilidade X de um veículo em um momento t pode ser definido por:

$$X_t = \begin{bmatrix} x_t \\ v_{x_t} \\ y_t \\ v_{y_t} \end{bmatrix}, \quad (2.1)$$

onde x_t e y_t representam as posições de latitude e longitude, enquanto v_{x_t} e v_{y_t} denotam a velocidade nas duas direções. O comportamento de mobilidade esperado para x_t e y_t pode ser definido da seguinte forma:

$$x_t = x_{t-1} + v_{x_t} \Delta t, \quad (2.2)$$

$$y_t = y_{t-1} + v_{y_t} \Delta t. \quad (2.3)$$

Para prever o estado futuro do sistema, utiliza-se a equação do processo, que pode ser definida por:

$$X_{t+1} = X_t A_t + w_t, \quad (2.4)$$

onde X_t representa um vetor de estado em um momento t , como o definido na Equação 2.1. A_t é uma matriz de transição no tempo t e para o modelo definido, pode ser definida

da seguinte forma:

$$A_t = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

onde é possível notar que a transição se baseia nas leis da cinemática definidas nas Equações 2.2 a 2.3. O ruído do processo é denotado como w_t e é Gaussiano com média zero e matriz de covariância Q , geralmente é possível assumir $w_t = 0$ [41].

A equação de medida representa os valores obtidos através de um sensor e pode ser denotada pela Equação 2.6:

$$Z_t = X_t H_t + u_t, \quad (2.6)$$

onde Z_t é o vetor de medida no momento t com estrutura semelhante ao vetor X_t definido na Equação 2.8. H_t é a matriz de medida e para o modelo proposto pode ser denotada como:

$$H_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

já que o GPS mede apenas a latitude e a longitude. O ruído da medida é denotado como u_t e é Gaussiano com média zero e matriz de covariância R , geralmente é possível assumir $u_t = 0$ [41],

Após realizar a predição e se obter um valor de medida através do sensor, torna-se possível ajustar a predição feita. No filtro de Kalman dois momentos são definidos, valores medidos a priori e a posteriori. No tempo t já existe uma estimativa de X_t no tempo $t-1$, este valor recebe o nome de estimativa a priori e é denotado como $\widehat{X}_{t|t-1}$, a matriz de erro de covariância a priori é definida como $P_{t|t-1}$. A medida feita a posteriori é denotada como $\widehat{X}_{t|t}$ e pode ser obtida através da Equação 2.8:

$$\widehat{X}_{t|t} = \widehat{X}_{t|t-1} + K_t(Z_t + H_t \widehat{X}_{t|t-1}), \quad (2.8)$$

onde K_t representa o ganho de Kalman definido por:

$$K_t = P_{t|t-1} H_t^T (H_t P_{t|t-1} H_t^T + R)^{-1}. \quad (2.9)$$

Após o cálculo de $\widehat{X}_{t|t}$ através da Equação 2.8, torna-se possível calcular a matriz de erro de covariância a posteriori $P_{t|t}$ através da Equação 2.10:

$$P_{t|t} = (1 - K_t H_t) P_{t|t-1}. \quad (2.10)$$

Esta matriz de erro de covariância busca ajustar os valores da predição posteriormente. Por fim, a predição para o próximo momento, $t + 1$ é obtida por:

$$\widehat{X}_{t+1|t} = A_t \widehat{X}_{t|t}. \quad (2.11)$$

A predição da matriz de covariância do erro para o momento $t + 1$ é definida pela Equação 2.12:

$$P_{t+1|t} = A_t P_{t|t} A_t^T + Q. \quad (2.12)$$

Inicialmente, o filtro de Kalman não possui nenhuma medida ou estimativa prévia. Portanto, fixa-se o estado inicial de X como $\widehat{X}_{0|-1} = 0$. A matriz do erro de covariância é determinada como $P_{0|-1}$ e definida por:

$$P_{0|-1} = \begin{bmatrix} 10000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10000 \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

Enquanto as matrizes de covariância Q e R podem ser inicializadas como:

$$Q = \begin{bmatrix} 0,001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,001 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,001 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

2.6 Discussão

Aborda-se a fundamentação teórica para situar o leitor acerca dos assuntos necessários para compreensão do estudo. O funcionamento da pilha TCP/IP e as tecnologias de rede sem fio são discutidas. As tecnologias utilizadas para dar suporte às redes veiculares também figuram este capítulo, dentre elas, o uso de redes celulares, a pilha DSRC/WAVE e o padrão WiMAX. A pilha DSRC/WAVE é dissecada no que tange às camadas de aplicação, transporte, rede, enlace e física. O filtro de Kalman também é discutido no que tange ao uso dele para obter medidas com acurácia através de um dispositivo de GPS que possa ter ruído. No Capítulo 3, um problema recorrente em redes veiculares conhecido como *broadcast storm* é discutido, os protocolos propostos para resolver este problema também são analisados.

Capítulo 3

Controle e Prevenção do *Broadcast Storm* em VANETs

Assim como o modo de operação Ad Hoc das redes *Wi-Fi*, as VANETs também são independentes de uma infraestrutura externa para seu funcionamento. Neste modo de operação, também conhecido como V2V, os nós da rede devem se comunicar através da troca de mensagens periódicas conhecidas como *beacons*. Na pilha DSRC/WAVE, os *beacons* também são conhecidos como *Basic Safety Message* (BSM) e representam um tipo de WSM. Todo WSM é uma mensagem do protocolo WSMP, Seção 2.4.2. Um BSM contém informações acerca da posição geográfica de um veículo, sua velocidade e direção. Em VANETs, os *beacons* devem ser enviados para todos os nós da rede dentro de um raio de transmissão, este processo também é conhecido como difusão ou *broadcast*. As informações extraídas dos *beacons* se tornam obsoletas rapidamente, já que a posição dos veículos está em constante mudança. Segundo o *National Highway Traffic Safety Administration and the Crash Avoidance Metrics Partnership* (NHTSA) [5], a maioria das aplicações para prevenção de acidentes não podem garantir resultados satisfatórios com uma taxa de transmissão de *beacons* menor que 10 Hz, sendo que alguma delas necessitam de uma taxa de até 50 Hz. Todas estas mensagens são enviadas utilizando um único canal de transmissão, o Canal de Controle (do inglês, *Control Channel*) (CCH).

O *broadcast storm* é um problema comum em VANETs que impossibilita o funcionamento de aplicações para prevenção de acidentes. Um *broadcast storm* ocorre quando um alto quantitativo de veículos tentam enviar mensagens simultaneamente, resultando em colisões e conseqüentemente perdas de pacote [43]. Protocolos têm sido propostos para minimizar os efeitos do *broadcast storm* em VANETs. O objetivo principal destes protocolos é criar mecanismos que consigam garantir uma frequência de envio de mensagens seguindo as necessidades das aplicações de prevenção de acidentes, evitando congestões na rede [44]. Assim, protocolos para a o envio consciente de *beacons* se tornaram uma

área de pesquisa em VANETs, ganhando interesse em âmbito acadêmico e comercial [1].

Pode-se dividir os esforços feitos para resolver o *broadcast storm* em protocolos reativos e protocolos proativos como visto na Figura 3.1. Os protocolos reativos utilizam mecanismos para detectar a congestão na rede através do número de colisões entre as últimas mensagens enviadas ou a análise do tempo que o canal ficou ocupado. Estas estratégias esperam que o *broadcast storm* ocorra e depois tomam uma atitude para minimizar seu impacto. Ainda é possível dividir os protocolos reativos em três subcategorias, protocolos baseados em variação da potência de transmissão, da taxa de transmissão de mensagens, ou híbridos. Destoando dos protocolos reativos, os protocolos proativos tentam prever a congestão da rede antes mesmo que ela ocorra. Este mecanismo permite que os veículos ajustem sua taxa de transmissão de *beacons* ou sua potência de transmissão com antecedência, impedindo que o *broadcast storm* sequer ocorra.

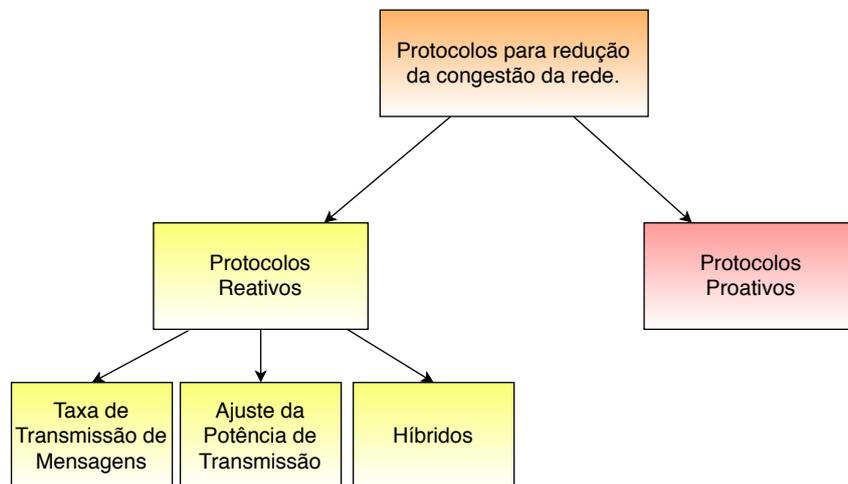


Figura 3.1: Diagrama dos tipos de protocolos para minimizar o *broadcast storm* em VANETs.

3.1 Protocolos Reativos

Protocolos para o envio de *beacons* surgiram para reduzir a congestão da rede causada pela transmissão excessiva destas mensagens. Estes protocolos podem ser divididos em duas categorias principais, reativos e proativos. Os protocolos reativos realizam uma adaptação dos parâmetros de transmissão quando a rede se torna congestionada e depois checam se o problema foi minimizado. Os parâmetros alterados são a taxa de transmissão de mensagens, a potência de transmissão ou ambos. Equanto o ajuste da taxa de transmissão possibilita reduzir o número de mensagens que são inseridas na rede, o ajuste da potência de transmissão limita o alcance da mensagem, liberando o canal de transmissão

mais rapidamente. O principal problema dos protocolos reativos é que o ajuste dos parâmetros de transmissão só ocorre quando um *broadcast storm* é detectado. Portanto, não há nada que possa ser feito durante o período inicial em que a rede se torna congestionada. Em cenários onde existe um número elevado de veículos tentando enviar mensagens simultaneamente, momentos de congestão se tornarão frequentes e irão comprometer o funcionamento de aplicações para prevenção de acidentes. Nas subseções seguintes, algumas estratégias reativas para minimizar os efeitos causados pelo *broadcast storm* serão analisadas.

3.1.1 Variação da Taxa de Transmissão

A variação da taxa de transmissão de mensagens foi a primeira estratégia para tentar minimizar o *broadcast storm*. Com este mecanismo, adota-se uma taxa de transmissão fixa de *beacons* e caso uma congestão seja detectada, o intervalo entre o envio de duas mensagens é aumentado. Com isso, torna-se possível diminuir o quantitativo de mensagens inseridas na rede.

Adaptive Traffic Beacon (ATB)

Um dos protocolos que utiliza a adaptação da taxa de transmissão é o *Adaptive Traffic Beacon (ATB)* [7]. Para detectar momentos de congestão da rede os autores definiram duas métricas, a Qualidade do Canal (C) e a Utilidade da Mensagem (P), que também são utilizadas para alterar a taxa de transmissão de *beacons*. Com estes valores, torna-se possível alterar o intervalo de envio de mensagens de forma consciente.

- **Qualidade do Canal (C):** Para o cálculo de C , três métricas são usadas considerando a condição prévia, atual e a prevista da rede. Em um primeiro momento, o nó apenas detecta o número de colisões no canal e o define como K , o que representa a condição prévia. O segundo passo é medir a relação sinal-ruído ou SNR no canal e definir este valor como S , o que representa a condição atual já que a SNR indica quanto o canal está sendo usado. O último passo é observar os *beacons* enviados por seus vizinhos e definir este valor como N , que serve como medida para prever a condição futura do canal. Com estes valores, os autores propõem uma estimativa para a qualidade do canal. Calcula-se C com base nos valores de K , S e N , onde C varia em um intervalo de $[0, 1]$.
- **Utilidade da Mensagem (P):** Para o cálculo de P , duas métricas são usadas. O primeiro passo é calcular D_e , que representa a distância do veículo até um evento que possa ter ocorrido ou está acontecendo na rede. O segundo passo é calcular a

idade da mensagem, denotada como A . Ambos os valores tem o mesmo peso para o cálculo de P , que também varia entre $[0, 1]$.

O protocolo ATB utiliza C e P para definir o Intervalo de Transmissão de *Beacons* (I). O ATB indica que as mensagens com maior utilidade devem ter seu intervalo reduzido, onde este intervalo pode variar entre I_{min} e I_{max} . Toda vez que um *beacon* é recebido ou enviado o valor de I é atualizado de acordo com a Equação 3.1:

$$I = I_{min} + (I_{max} - I_{min} \cdot (w_I C^2 + (1 - w_I) P^2)), \quad (3.1)$$

onde $w_I = 0,75$ e representa um peso escolhido pelos autores para se adaptar a diferentes protocolos da camada de enlace. Nos testes feitos do protocolo, os autores buscaram dar mais importância para a métrica de qualidade do canal C .

***Dynamic Beaconing* (DynB)**

Outro protocolo para a transmissão de *beacons* que segue uma estratégia semelhante ao ATB é o *Dynamic Beaconing* (DynB) [8]. A ideia principal deste protocolo é adaptar o intervalo de transmissão de *beacons* com duas variáveis principais, b_t (fração de tempo de uso do canal entre o intervalo de tempo $t - I$ e t) e N (número de vizinhos a um salto de distância). O mecanismo de ajuste do intervalo entre o envio dos *beacons* opera da seguinte forma:

$$I = I_{des}(1 + rN), \quad (3.2)$$

onde I_{des} é inicializado para uma taxa de envio de 10 Hz e representa o intervalo desejado para a transmissão. A razão r é calculada segundo a Equação 3.3:

$$r = \frac{b_t}{b_{des}} - 1, \quad (3.3)$$

onde b_t representa o tempo em que o canal estava em uso e b_{des} a carga que se deseja para o uso do canal. O Intervalo de Transmissão I deve ser alterado toda vez que a rede se torna mais densa, ou seja, quando um veículo possui um alto número de vizinhos. Esta alteração só deve ocorrer quando a ocupação do canal de transmissão for maior que um valor desejado. O algoritmo é totalmente distribuído, pois cada veículo pode ter um valor de I diferente dependendo da condição local em que ele se encontra.

3.1.2 Ajuste da Potência de Transmissão

Os protocolos baseados na variação da potência de transmissão tem como principal objetivo diminuir a carga da rede. Eles não surgiram como uma melhora em relação à

variação da taxa de transmissão, mas sim como uma abordagem diferente ao problema. Nesta estratégia, a potência de transmissão geralmente é ajustada de acordo com o tipo de mensagem sendo enviada. Dependendo do valor escolhido para a potência de transmissão, uma mensagem não chegará até os veículos mais distantes e o canal de transmissão será liberado mais rapidamente.

Distributed Fair Power Adjustment for Vehicular Environments (D-FPAV)

O protocolo *Distributed Fair Power Adjustment for Vehicular Environments* (D-FPAV) [45] foi proposto para controlar a congestão no canal de transmissão e garantir justiça e prioridade ao transmitir *beacons*. O D-FPAV ajusta a potência de transmissão dos nós de acordo com a utilidade do *beacon* que será enviado. Para isso, define-se $N = \{u_1, \dots, u_n\}$ como um conjunto de nós se movendo em uma pista modelada como uma linha de comprimento de unidade, ou seja, $R = [0, 1]$. Cada nó $u_i \in N$ envia mensagens periódicas com uma frequência pré-definida F utilizando uma potência de transmissão $p \in [P_{min}, P_{max}]$. P_{min} e P_{max} representam a potência de transmissão mínima e máxima respectivamente. Algumas funções para o funcionamento do protocolo são descritas abaixo.

- ***Power Assignment (PA)***: Dado um conjunto de nós $N = \{u_1, \dots, u_n\}$, PA é uma função que define que cada nó u_i tem um valor $PA(i) \in (0, 1]$ e a potência de transmissão dele é igual a $PA(i) \cdot P_{max}$.
- ***Alcance Carrier Sense (CS)***: A capacidade de um dispositivo receptor de detectar um sinal *Wi-Fi* é conhecida como *Carrier Sense* (CS). Define-se como $CS(PA, i)$, a interseção entre o alcance CS de um nó $u_i \in N$ com potência $PA(i) \cdot P_{max}$ e a região de implantação R . O alcance CS à potência máxima é representado como $CS_{MAX}(i)$.
- ***Beaconing Load (BL)***: A carga que os *beacons* causam na rede é conhecida como *Beaconing Load* (BL). Dado um conjunto de nós N e seus valores de PA, o valor de BL para um nó u_i é calculado segundo a Equação 3.4:

$$BL(PA, i) = |\{u_j \in N, j \neq i : u_i \in CS(PA, j)\}|, \quad (3.4)$$

onde BL representa o número de nós que tem u_i dentro de seu alcance CS.

- ***Beaconing Max-Min Tx Power Problem (BMMTxP)***: Define-se *Maximum Beaconing Load* (MBL) como a carga máxima causada pela transmissão de *beacons*. Dado um conjunto de nós $N = \{u_1, \dots, u_n\}$ em $R = [0, 1]$ e um valor para MBL, pode-se definir \overline{PA} como o PA tal que a potência de transmissão mínima é maximizada e a carga da rede fica abaixo do limiar MBL.

O algoritmo do D-FPAV tem como objetivo resolver o problema BMMTxP descrito no último item. Este algoritmo é baseado em um algoritmo proposto anteriormente pelos mesmos autores conhecido como *Fair Power Adjustment for Vehicular Environments* (FPAV). O FPAV também tenta resolver o mesmo problema. No FPAV, os veículos começam transmitindo suas mensagens com uma potência mínima. Este valor é aumentado iterativamente até que uma congestão na rede seja detectada. A diferença do D-FPAV para o FPAV é que os nós agora realizam essa tarefa localmente, sendo assim cada nó pode ter uma potência de transmissão diferente, atuando de forma distribuída.

Mecanismo de Ajuste Aleatório da Potência de Transmissão

O protocolo proposto por Kloiber *et al.* [46] utiliza um mecanismo para o ajuste da potência de transmissão aleatoriamente através de distribuições de probabilidade. Neste método, cada veículo controla sua potência de transmissão individualmente utilizando uma distribuição de probabilidade sob um intervalo de potência de transmissão aceitável. Segundo os autores, esta estratégia consegue diminuir a congestão no canal de comunicação, pois os veículos estão transmitindo as mensagens próximos a potência média dentro de um intervalo definido, como indicado na Figura 3.2. Valores próximos a potência máxima podem ocorrer com uma probabilidade reduzida, diminuindo a distância que a mensagem consegue alcançar. Como a probabilidade de se usar potências maiores é reduzida o canal de transmissão será liberado rapidamente, já que as mensagens não chegarão a veículos mais distantes.

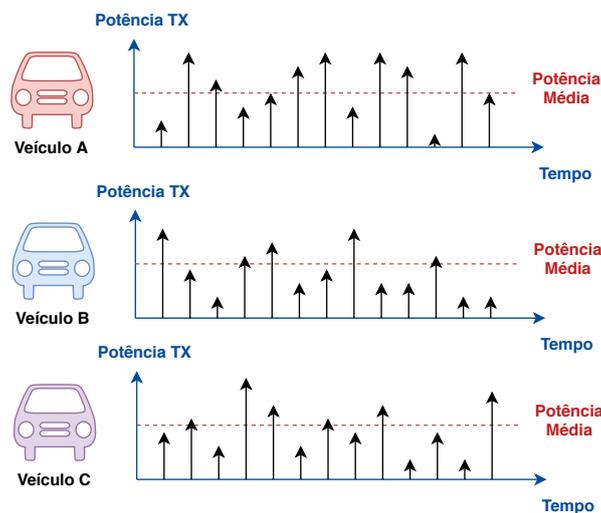


Figura 3.2: Exemplo de três veículos: A, B e C utilizando o mecanismo de seleção de potência.

Um mecanismo adicional que prioriza veículos mais próximos do transmissor do alerta para enviar sua próxima mensagem com uma potência maior. Permitindo que as mensagens destes veículos alcancem veículos mais distantes. Segundo os autores, a seleção aleatória pode mitigar a ocorrência de colisões e interferências causadas pela periodicidade da transmissão de mensagens em ambientes onde os veículos se movimentam lentamente. O principal problema de estratégias baseadas somente na variação da potência de transmissão é que não consideram o impacto causado pela inserção de mensagens na rede. Como o intervalo de envio de *beacons* se mantém estável, o *broadcast storm* ainda poderá ocorrer dependendo da densidade de veículos em um determinado cenário.

3.1.3 Variação da Taxa de Transmissão e Ajuste da Potência de Transmissão

Os protocolos baseados na variação da taxa de transmissão de mensagens e da ajuste da potência de transmissão surgiram como outra alternativa para minimizar os efeitos do *broadcast storm*. Estes protocolos, também conhecidos como protocolos híbridos, visam enviar *beacons* mantendo um raio de alcance razoável através do ajuste da potência de transmissão, enquanto realizam mudanças na taxa de envio para evitar a inserção de muitas mensagens na rede.

INTERN

O INTERN [47] é um protocolo híbrido baseado em outros três protocolos, o LIMERIC [48], o PULSAR [49] e o MINT [50]. O LIMERIC e o PULSAR são utilizados para ajustar o intervalo de transmissão de *beacons*, ou seja, realizar o controle de congestão. O protocolo MINT é utilizado para o ajuste da potência de transmissão, ou seja, controle do alcance da mensagem. O INTERN funciona de forma distribuída e promete garantir os requisitos impostos pelas aplicações enquanto controla a congestão da rede.

- **LIMERIC:** Altera a frequência de envio de *beacons* de acordo com o nível desejado de carga do canal e o valor medido localmente em cada intervalo de sincronização. O intervalo de transmissão de *beacons* é denotado por $r(j)$ e é alterado para um veículo j em um instante t segundo a Equação 3.5:

$$r_j(t) = (1 - \alpha)r_j(t - 1) + \beta(r_g - r(t - 1)), \quad (3.5)$$

onde r_g representa a frequência geral de pacotes, $r(t - 1)$ a frequência geral de pacotes no último intervalo de tempo, α e β são constantes definidas pelos autores para ajustar o funcionamento do protocolo. Os valores de r_g e $r(t - 1)$, a carga do

canal, podem ser medidos através do *Channel Busy Ratio* (CBR), que representa a fração de tempo que o canal estava ocupado. O valor de r_g pode ser substituído por CBR_{max} , que representa o valor desejado para a carga do canal. O valor de $r(t-1)$ pode ser substituído por $CBR(t-1)$, representando o valor de CBR medido no último intervalo.

- **PULSAR:** Propõe um mecanismo chamado *Additive Increase Multiplicative Decrease* (AIMD) para alterar a frequência de envio de *beacons*. O AIMD adiciona o valor de CBR medido localmente e o valor máximo de CBR de seus vizinhos ao *beacon*. Cada veículo adapta a frequência com que envia *beacons* de acordo com o nível de CBR máximo local e o valor de CBR reportado pelos seus vizinhos a no máximo dois saltos de distância. Se o valor resultante for acima de CBR_{max} , a frequência de transmissão é reduzida por um fator multiplicativo, caso contrário, aumentada por um fator aditivo. Além dos valores de CBR, cada veículo adiciona aos seus *beacons* a frequência que ele está enviando *beacons*. Este mecanismo em conjunto com o AIMD, prometem garantir que todos os veículos vão convergir para uma mesma taxa de envio de mensagens.
- **MINT:** Para o ajuste da potência de transmissão, o INTERN utiliza o protocolo MINT [50]. Este protocolo define que cada veículo deve adaptar seus parâmetros de transmissão para o mínimo necessário para o funcionamento da aplicação de segurança atual. Uma aplicação tem seus requisitos cumpridos, se a seguinte condição for válida: A taxa de *beacons* recebidos corretamente por segundo dentro da distância de alerta deve ser maior que o limiar estabelecido pela aplicação em relação a frequência de recepção de pacotes. O MINT determina que a frequência de transmissão de *beacons* tem que ser igual à frequência de recepção definida pela aplicação mais uma margem fixa ΔT_f . Para este fim, a potência de transmissão é designada de acordo com [51], utilizando os requisitos da aplicação e um modelo que relaciona a taxa de perda de pacotes, *Packet Delivery Ratio* (PDR), com a potência de transmissão e a distância entre transmissor e receptor.

O protocolo INTERN integra os três protocolos para garantir controle da congestão da rede de forma consciente. O INTERN utiliza os *beacons* com informações adicionais do PULSAR para atingir uma frequência de transmissão igual em todos os veículos com o mecanismo AIMD. Após calcular a frequência ele define qual será a potência de transmissão de acordo com o protocolo MINT. A frequência de transmissão de pacotes T_f pode ser definida pela Equação 3.6:

$$T_f = R + \Delta T_f, \quad (3.6)$$

onde R representa o valor mínimo da frequência de transmissão de pacotes estabelecido pela aplicação e ΔT_f uma margem de erro denotada por:

$$\Delta T_f = \Delta T_f^T + \frac{\Delta T_f^T}{CBR_{2hops}}(CBR_{max} - CBR_{2hops}) = \Delta T_f^T \frac{CBR_{max}}{CBR_{2hops}}. \quad (3.7)$$

No INTERN, o parâmetro ΔT_f é dinamicamente calculado e é ajustado com intuito de garantir que o valor de CBR não ultrapasse CBR_{max} . Desta forma, também promete garantir que essa frequência atenda aos requisitos da aplicação de segurança sendo executada em cada veículo. CBR_{2hops} representa o valor máximo de CBR identificado pelos seus vizinhos à no máximo dois saltos de distância. Logo, o valor de ΔT_f aumenta quando $CBR_{max} > CBR_{2hops}$ e é diminuído quando $CBR_{max} < CBR_{2hops}$. O parâmetro ΔT_f^T representa o valor mínimo da frequência de transmissão de pacotes pelos vizinhos de um nó. Ele é calculado através das informações adicionais presentes nos *beacons*, estratégia semelhante a do protocolo PULSAR.

3.2 Protocolos Proativos

Novos protocolos seguindo uma estratégia proativa têm sido propostos. Estes protocolos utilizam mecanismos de predição para determinar quando uma congestão vai acontecer na rede. Com isso, torna-se possível tomar ações para evitar que o *broadcast storm* sequer ocorra. Assim como os protocolos reativos, estes protocolos alteram os parâmetros de taxa de envio de *beacons* e de potência de transmissão.

Quando um veículo transmite *beacons*, ele está repassando informações acerca de sua posição geográfica, velocidade e direção. Um outro veículo pode receber esta mensagem e construir uma lista de vizinhos com todos os *beacons* recebidos em um raio de transmissão definido. Um mecanismo de predição de posição em protocolos proativos geralmente define que não há a necessidade de se enviar *beacons* se a posição do veículo pode ser facilmente prevista. Esta estratégia pode diminuir o quantitativo de mensagens que são inseridas na rede, mas a alta mobilidade dos nós impõe desafios às técnicas de predição. Em outras estratégias proativas os veículos tentam prever a densidade local, ou seja, o número de carros a um salto de distância.

Controle Adaptativo da Transmissão

Haug *et al.* [52] propõe um protocolo proativo híbrido dividido em duas etapas. O ajuste da variação da taxa de transmissão de *beacons* define quão frequente um nó em específico deve enviar seus *beacons* através da predição de posição. O ajuste da variação da potência

de transmissão define quão longe uma mensagem deve chegar utilizando a ocupação do canal de transmissão.

- **Controle da Taxa de Transmissão:** Em cada intervalo de tempo t , o veículo j calcula sua probabilidade de transmissão $p_j(t)$ considerando o erro da predição $\tilde{e}_j(t)$ da sua própria posição por seus vizinhos. Este erro é calculado através da distância Euclideana e se o seu valor for maior que um limiar e_{th} preestabelecido, $p_j(t)$ poderá ser obtido através da Equação 3.8:

$$p_j(t) = 1 - \exp(-\alpha \times |\tilde{e}_j(t) - e_{th}|^2), \quad (3.8)$$

onde $\alpha > 0$ representa a sensibilidade em relação a $\tilde{e}_j(t)$. A probabilidade do envio de uma mensagem vai aumentar quanto maior for a diferença entre a posição atual do carro e a posição prevista pelos vizinhos. Caso o erro seja menor que o limiar nenhuma transmissão será feita, ou seja, $p_j(t) = 0$.

- **Controle da Potência de Transmissão:** O raio de transmissão é denotado como $L_j(t)$ e é ajustado de acordo com a situação atual do canal. A ocupação média do canal é denotada como $U_j(t)$ e representa um número real no intervalo $[0, 1]$. Se este valor for maior que um limiar U_{max} , então o raio de transmissão é L_{min} , ou seja, o raio de transmissão mínimo. Se a ocupação do canal for menor que o limiar U_{min} , então o raio de transmissão é L_{max} , ou seja, o raio de transmissão máximo. Nos outros casos L é selecionado de acordo com a Equação 3.9:

$$L_j(t) = L_{min} + \frac{U_{max} - U_j(t)}{U_{max} - U_{min}} \times (L_{max} - L_{min}). \quad (3.9)$$

O valor de $L_j(t)$ é convertido para potência de transmissão através de um mapeamento alcance-potência baseado no modelo empírico do canal. Segundo os autores, L_{min} e L_{max} são valores geralmente determinados através de especificações de aplicações para ambientes veiculares, U_{min} e U_{max} representam o alcance de ocupação do canal linear desejado e são selecionados através de dados experimentais e analíticos.

Mobility Prediction Based Beacon Rate Adaptation (MPBR)

Um protocolo chamado *Mobility Prediction Based Beacon Rate Adaptation* (MPBR) [10] é proposto para resolver o problema do *broadcast storm* em redes veiculares. Este protocolo utiliza um mecanismo de predição para diminuir a frequência com que *beacons* são enviados. O modelo de previsão de mobilidade pode ser visto na Figura 3.3. Ao detectar uma mudança de posição, veículos utilizam um filtro de Kalman para prever seus próximos estados de mobilidade, uma técnica usada para melhorar as medições obtidas

através do GPS. Existe também um módulo de predição baseado em leis da cinemática clássica, ele é utilizado para que cada veículo possa prever sua própria posição e a posição de seus vizinhos. Toda vez que houver uma mudança de posição, o veículo de interesse fará o cálculo do erro da predição feita no passo anterior com base nos valores obtidos do filtro de Kalman e do módulo de predição. Quando o erro da predição ultrapassa um limiar específico, então um *beacon* será enviado. Pode-se afirmar que se o veículo não consegue prever seu estado então os vizinhos também não vão conseguir. O limiar do erro da predição é ajustado de forma dinâmica dependendo do estado atual do tráfego. Quando a acurácia da previsão é alta, a taxa de transmissão de *beacons* pode ser diminuída consideravelmente.

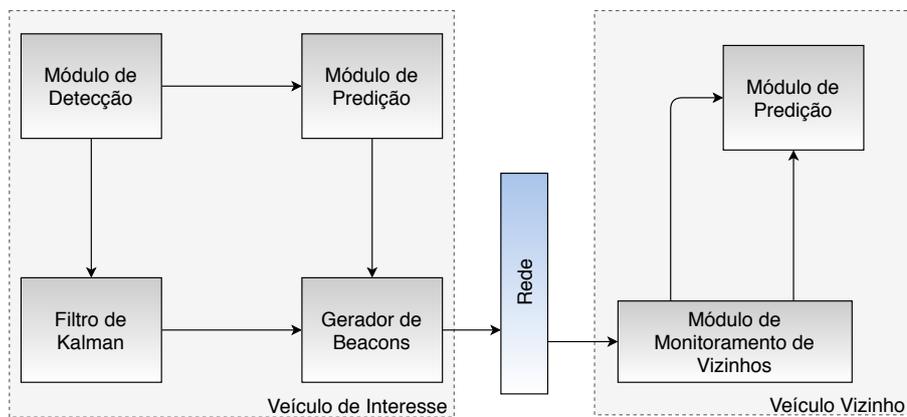


Figura 3.3: Modelo de predição da mobilidade de veículos.

- **Módulo de Detecção:** O módulo de detecção tem como principal função detectar mudanças na posição, velocidade ou direção do veículo. Geralmente obtidos através de um GPS. Os valores medidos no momento k são dados como entrada para o filtro de Kalman e o módulo de predição. O estado de mobilidade do veículo é denotado por:

$$X = [X, Y, V, D], \quad (3.10)$$

onde X e Y representam suas coordenadas geográficas, V representa a velocidade e D a direção.

- **Módulo de Predição:** Usa as leis clássicas da cinemática de acordo com o estado de movimento do veículo no momento k para prever o seu estado de movimento no momento $k + 1$. O estado de movimento dos vizinhos também é atualizado desta maneira. Para predição da posição do veículo, define-se as Equações 3.11 a 3.12:

$$\tilde{x}(k + 1) = \tilde{x}(k) + \tilde{v}_x(k)\Delta T + 0,5\alpha_x(k)\Delta T^2, \quad (3.11)$$

$$\tilde{y}(k+1) = \tilde{y}(k) + \tilde{v}_y(k)\Delta T + 0,5\alpha_y(k)\Delta T^2. \quad (3.12)$$

Para predição da velocidade e direção, define-se as Equações 3.13 a 3.15:

$$\tilde{v}_x(k+1) = v_x(k) + \alpha_x(k)\Delta T, \quad (3.13)$$

$$\tilde{v}_y(k+1) = v_y(k) + \alpha_y(k)\Delta T, \quad (3.14)$$

$$\tilde{d}(k+1) = \tilde{d}(k). \quad (3.15)$$

- **Módulo de Filtro de Kalman:** Ao mesmo tempo que o módulo de predição tenta calcular o estado de mobilidade no momento k (para o próprio veículo, utilizando $k-1$), o filtro de Kalman também tenta estimar o estado de movimento no momento atual, denotado como $\widehat{X}(k)$. O filtro de Kalman é um mecanismo capaz de estimar o estado de um sistema dinâmico e linear a partir de uma série de medidas que podem possuir ruído. Utilizando o filtro, estas medidas apresentam mais acurácia do que simplesmente usar o valor obtido do GPS.
- **Gerador de *Beacons*:** O gerador de *beacons* compara a diferença entre a predição dos estados de movimento do filtro de Kalman ($\hat{x}(k), \hat{y}(k)$) e do módulo de predição ($\tilde{x}(k), \tilde{y}(k)$) segundo a Equação 3.16:

$$\xi(k) = \sqrt{((\tilde{x}(k) - \hat{x}(k))^2 + (\tilde{y}(k) - \hat{y}(k))^2)}. \quad (3.16)$$

Utilizando um limiar de erro da predição Φ , ele determina se deve enviar um novo *beacon* ou não. Se $\xi(k) > \Phi$ então o *beacon* será transmitido, caso contrário nenhuma ação deverá ser realizada. Para decidir o estado atual do tráfego e determinar Φ , os autores definem métricas para calcular a taxa de congestionamento, o tempo em que a velocidade do veículo se aproximou de zero, o ruído da aceleração e a velocidade média. Com estes valores, torna-se possível classificar os dados obtidos.

Prediction and Adaptation Algorithm (PAA)

Diferente do protocolo MPBR, que tenta prever o estado de mobilidade do próprio veículo e o de seus vizinhos, uma nova estratégia é adotada com o protocolo *Prediction and Adaptation Algorithm (PAA)* [9]. O PAA define densidade local como o número de vizinhos a um salto de distância, ou seja, que podem ser alcançados com o envio de apenas uma mensagem. A área que cobre estes vizinhos é denominada campo de visibilidade do rádio ou campo de visão. Com estas informações, o protocolo realiza uma estimativa da densidade local no futuro para determinar o estado do canal de transmissão. Depois de

realizar a predição, cada veículo altera seus parâmetros de transmissão de *beacons* e a potência de transmissão com que eles são enviados. O protocolo PAA promete melhorar a capacidade de adaptação da rede em diferentes cenários.

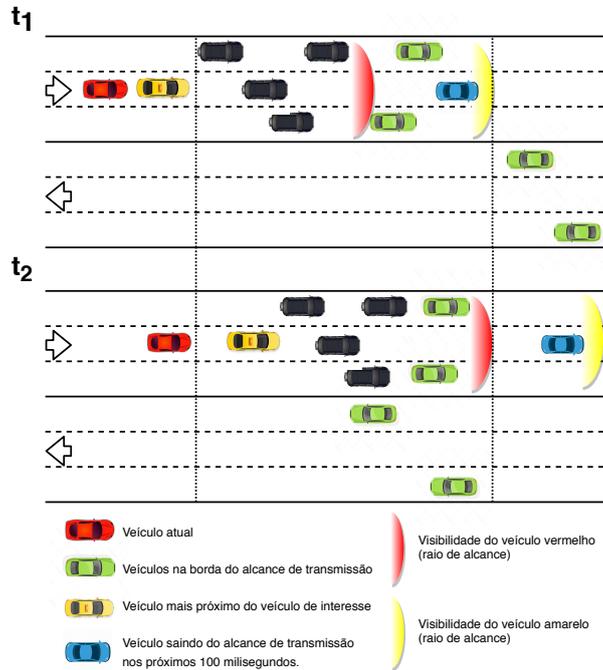


Figura 3.4: Modelo de predição de densidade.

O mecanismo de predição da densidade local adota uma estratégia altruísta, os veículos mais a frente tem a tarefa de informar a densidade a frente para os veículos atrás. Neste protocolo, além da posição geográfica, velocidade e direção, os *beacons* devem conter o número de veículos a frente na direção atual e na direção oposta. Como pode ser visto na Figura 3.4, no tempo t_1 , o carro vermelho consegue ter visibilidade dos carros pretos, enquanto o carro amarelo consegue enxergar até o carro azul. O carro amarelo, por estar mais a frente, tem a missão de informar a densidade local para o carro vermelho no tempo t_2 . Entretanto, no tempo t_1 , até mesmo o carro amarelo não consegue enxergar os carros verdes que estão se movendo na direção oposta.

Como o carro azul deve deixar o campo de visão em t_2 , então o veículo verde atrás dele é o melhor veículo para repassar a informação que existem veículos se movimentando na direção oposta. Ao receber a informação do número de veículos na outra direção, o veículo amarelo terá todas as informações necessárias para reconstruir a densidade local a frente do carro vermelho em t_1 , podendo informá-lo com antecedência. Ao final de todo CCHI, os veículos checam os *beacons* recebidos e selecionam os *beacons* dos vizinhos que estão mais distantes dentro de seu raio de transmissão em ambas direções. Com esta

informação é possível prever a densidade local no próximo momento. Os parâmetros da taxa de transmissão de *beacons* e a potência com que ele deve ser transmitido são alterados de acordo com a densidade atual.

3.3 Análise Comparativa

Após o estudo dos trabalhos propostos por outros autores, torna-se possível realizar uma breve análise comparativa. Esta discussão visa destacar pontos positivos e pontos negativos dos protocolos propostos para prevenção e controle do *broadcast storm* em VANETs. A Tabela 3.1 demonstra as características gerais dos protocolos citados neste trabalho.

Tabela 3.1: Comparação dos protocolos de envio de *beacons* em VANETs.

Protocolo	Estratégia	Ano	Simuladores	I_{bec}	P_t
ATB [7]	Reativa	2011	Veins, SUMO e OMNeT++	Sim	Não
DynB [8]	Reativa	2015	Veins, SUMO e OMNeT++	Sim	Não
D-FPAV [45]	Reativa	2009	NS-2	Não	Sim
Kloiber <i>et al.</i> [46]	Reativa	2012	NS-3, ITS-G5	Não	Sim
INTERN [47]	Reativa	2016	MATLAB	Sim	Sim
Huang <i>et al.</i> [52]	Proativa	2010	OPNET	Sim	Sim
MPBR [10]	Proativa	2018	SUMO, NS-3	Sim	Não
PAA [9]	Proativa	2017	SUMO, NS-3	Sim	Sim

Em relação aos simuladores em redes veiculares, dentre as opções existentes, pode-se citar o NS-3, a combinação Veins, SUMO e OMNeT++, MATLAB e OPNET. Um estudo sobre o uso de simuladores em redes veiculares [53] demonstra que o número de trabalhos utilizando a configuração Veins, SUMO e OMNeT++ possui o maior número de publicações. Os autores também afirmam que esta configuração apresenta a opção de adicionar obstáculos à simulação e quando comparado ao NS-3 possui melhor escalabilidade em relação ao tamanho da rede.

O estado da arte no que tange aos protocolos para a prevenção e controle da congestão do *broadcast storm* em VANETs são discutidos e categorizados em protocolos reativos e proativos. Os protocolos reativos tentam minimizar os efeitos do *broadcast storm* através do ajuste dos parâmetros de transmissão após detectar que o problema ocorreu. Protocolos proativos tentam prever que um *broadcast storm* vai ocorrer e ajustam os parâmetros de transmissão com antecedência. Os protocolos podem alterar os parâmetros de taxa de transmissão de *beacons* (I_{bec}) ou a potência de transmissão (P_t), em alguns protocolos como o INTERN [47], ambos parâmetros são alterados. A Tabela 3.2 traz um comparativo em relação as métricas utilizadas pelos autores para avaliar e validar os protocolos propostos.

A frequência de *beacons* representa o número total de mensagens que foram geradas durante uma simulação. Esta métrica nem sempre é um bom indicador do funcionamento

Tabela 3.2: Métricas de avaliação usadas dos protocolos de envio de *beacons* em VANETs.

Protocolo	Frequência de <i>beacons</i>	CBR	Cobertura	Colisões	PDR
ATB [7]	Não	Não	Sim	Não	Não
DynB [8]	Sim	Sim	Não	Sim	Não
D-FPAV [45]	Não	Sim	Não	Não	Sim
Kloiber <i>et al.</i> [46]	Não	Sim	Não	Sim	Sim
INTERN [47]	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Huang <i>et al.</i> [52]	Sim	Não	Sim	Não	Sim
MPBR [10]	Sim	Não	Não	Não	Sim
PAA [9]	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

correto de um protocolo, visto que provar que um protocolo envia menos *beacons* não garante seu nível de cobertura, algo percebido no protocolo MPBR [10] e no protocolo proposto por Huang *et al.* [52]. A métrica *Channel Busy Ratio* (CBR) denota quanto tempo o canal de transmissão ficou em uso, ou seja, quanto mais *beacons* são enviados, maior será a ocupação. Esta métrica nem sempre é justa para determinar o bom funcionamento de alguns protocolos, visto que o envio de menos *beacons* pode diminuir a ocupação do canal, mas continuar garantindo a cobertura. Algo ignorado em protocolos como o D-FPAV [45] e a proposta de Kloiber *et al.* [46].

A cobertura é uma métrica importante, pois demonstra o grau de conscientização dos veículos presentes em uma vizinhança, ou seja, o número de veículos que conseguem receber mensagens corretamente neste raio de transmissão. Dentre as propostas analisadas, apenas os protocolos ATB [7], PAA [9] e a proposta de Kloiber *et al.* [46] apresentaram resultados sobre a cobertura. O protocolo ATB, por exemplo, apresenta um percentual de cobertura de aproximadamente 75% para um cenário com 159 veículos em $1km^2$, enquanto o protocolo PAA apresenta um percentual de aproximadamente 92% para um cenário com 100 veículos.

A análise da taxa de colisões causadas pelos *beacons* e o *Packet Delivery Ratio* (PDR) são métricas fundamentais, pois provam a eficácia da transmissão de mensagens. Como pode ser visto na Tabela 3.2, estas métricas são consideradas de alguma forma em quase todos os protocolos estudados. O protocolo MPBR garante uma taxa de recepção de pacotes de 91% para cenários com alta densidade de veículos. O protocolo PAA apresenta um percentual de colisões abaixo de 10% para um cenário com 100 veículos. O protocolo INTERN [47] usa uma métrica especial chamada D_p que demonstra a diferença entre o requisito de uma aplicação de segurança e o PDR medido. Toda vez que $D_p > 0$ então os requisitos são cumpridos. Os autores demonstram que o INTERN alcança estes requisitos para três cenários diferentes, rodovia, interseção sem obstáculos e com obstáculos.

3.4 Discussão

Este capítulo apresenta uma breve revisão do estado da arte dos principais protocolos que abordam o problema de *broadcast storm* de *beacons* em VANETs. Categoriza-se os protocolos propostos para resolver este problema em reativos e proativos. Os protocolos reativos podem ser baseados na variação da frequência de *beacons*, no ajuste da potência de transmissão ou ambos. Protocolos proativos geralmente apresentam mecanismos de predição para evitar que o *broadcast storm* ocorra. Por fim uma análise comparativa é feita em relação aos protocolos estudados.

No próximo capítulo, propõe-se o *Density-based Congestion Avoidance Protocol* (DCAP), um protocolo proativo que utiliza mecanismos de predição para a prevenção da congestão em VANETs. Os protocolos utilizados para comparação com a proposta também são apresentados no próximo capítulo.

Capítulo 4

Protocolo DCAP e Protocolos Relacionados

O capítulo apresenta a utilização dos conhecimentos obtidos para apresentar o protocolo *Density-based Congestion Avoidance Protocol* (DCAP), que tem como objetivo prevenir o *broadcast storm* em VANETs. Aborda-se o uso das leis da cinemática para construção de um módulo de predição e o uso do filtro de Kalman para filtrar o ruído em sensores como o GPS e prever a posição de um veículo. Os protocolos utilizados para comparação também são descritos, com destaque ao MPBR que também utiliza o filtro de Kalman e a clusterização *fuzzy c-means* de dados de tráfego. O protocolo padrão do IEEE 802.11p WAVE para VANETs também é brevemente descrito.

4.1 Protocolo DCAP

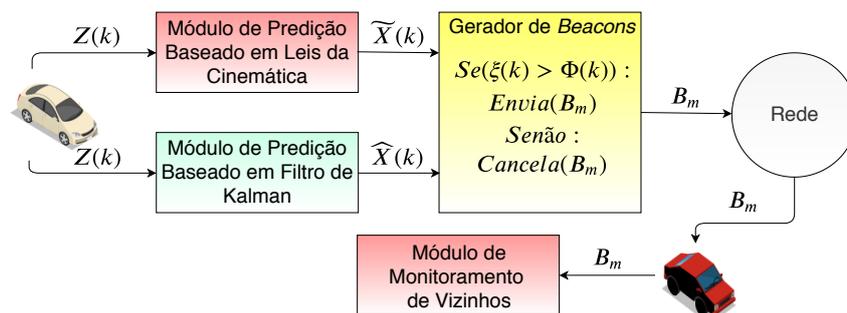


Figura 4.1: Visão geral do funcionamento do protocolo DCAP.

Um dos fatores para o bom funcionamento de um protocolo para controle ou prevenção do *broadcast storm* em VANETs é determinar quando um *beacon* deve ser enviado. No

Tabela 4.1: Exemplo da tabela de vizinhos de um veículo.

ID	Posição	Velocidade	Direção	Tempo
1	(x_1, y_1)	v_1	d_1	t_1
2	(x_2, y_2)	v_2	d_2	t_2
3	(x_3, y_3)	v_2	d_3	t_3

protocolo DCAP, indicado na Figura 4.1, assume-se que cada veículo é equipado com um dispositivo de GPS capaz de realizar medidas de sua posição, denotada como $Z(k)$. Cada veículo também possui um módulo de monitoramento de vizinhos responsável por manter informações de veículos dentro de seu raio de transmissão. Ao receber *beacons*, cada veículo deve guardar o identificador do vizinho, sua posição, velocidade, direção e o tempo que a mensagem foi recebida como indicado na Tabela 4.1. Toda vez que um *beacon* é recebido de um vizinho específico, o seu valor é atualizado na lista. Quando um *beacon* não é recebido, o veículo utiliza um módulo de predição de mobilidade que utiliza leis da cinemática clássica para prever a posição de seus vizinhos em um próximo instante. Este módulo também é utilizado para realizar uma predição da própria posição do veículo, denotado como $\tilde{X}(k)$.

O protocolo DCAP define que o envio de um *beacon* pode ocorrer em dois cenários. Quando a posição do próprio veículo não pode ser estimada com acurácia através do módulo de predição de mobilidade, então, assume-se que seus vizinhos também não conseguirão prever sua posição, logo um *beacon* deve ser enviado. Quando o veículo excedeu o tempo máximo sem transmitir um *beacon*, ele também deverá ser transmitido, mesmo se a predição estiver correta. Este tempo foi definido empiricamente considerando a possibilidade de um veículo mudar de rota. Para determinar a acurácia da predição feita no momento anterior para o instante atual, compara-se este valor com o que foi medido pelo *Global Positioning System* (GPS) do veículo. Entretanto, o dispositivo de GPS pode apresentar ruído em suas medidas, podendo chegar a até 7 m [41], o que influencia na acurácia da posição do veículo. Propõe-se o uso de um mecanismo conhecido como filtro de Kalman para aumentar a acurácia das medidas obtidas pelo GPS através de um mecanismo de predição definido na Seção 2.5. Por fim, pode-se definir o funcionamento do

gerador de *beacons* de acordo com o Algoritmo 1.

Algoritmo 1: GERADOR DE BEACONS

Entrada: $\xi(k), \Phi(k)$

```

1 início
2   se  $(\xi(k) \geq \Phi(k)) \vee (T_{intervalo} \geq T_{max})$  então
3     |    $enviaBeacons(k) = \text{SIM}$ 
4   senão
5     |    $enviaBeacons(k) = \text{NÃO}$ 
6   fim
7 fim
```

Os valores de latitude e longitude obtidos através do filtro de Kalman são denotados como $\widehat{X}(k) = (\widehat{x}(k), \widehat{y}(k))$, o erro da predição ξ no momento k pode então ser obtido através da Equação 3.16. Toda vez que $\xi(k) \geq \Phi(k)$ um *beacon* será enviado. A estratégia para definir o limiar $\Phi(k)$ será apresentada na Subseção 4.1.2. Toda vez que o erro da predição fica acima do limiar definido, os vizinhos não conseguirão prever a posição do veículo atual com acurácia e este valor tem que ser atualizado através do envio de um novo *beacon*. Quando o veículo excede o tempo máximo sem enviar um *beacon* ele também será enviado.

4.1.1 Predição de Mobilidade com Leis da Cinemática

As leis de cinemática clássica são utilizadas para que veículos possam prever seu estado de mobilidade e o estado de mobilidade dos seus vizinhos. Elas podem ser definidas como:

$$\tilde{x}(k) = \tilde{x}(k-1) + \tilde{v}_x(k-1)\Delta t, \quad (4.1)$$

$$\tilde{y}(k) = \tilde{y}(k-1) + \tilde{v}_y(k-1)\Delta t, \quad (4.2)$$

onde x e y representam a latitude e a longitude, Δt o intervalo de tempo escolhido para a atualização destas informações e $\tilde{v}_x(k)$, $\tilde{v}_y(k)$ a velocidade em cada eixo. Com estes valores, os veículos realizam uma predição de sua próxima posição com base no último estado, denotado como $\widetilde{X} = (\tilde{x}(k), \tilde{y}(k))$,

4.1.2 Limiar do Erro da Predição

O limiar do erro da predição Φ é um fator determinante para o desempenho do protocolo proposto. Se este valor for pequeno, então haverá uma tolerância menor a erros, ocasionando no envio de mais *beacons*. Por este motivo, deve-se definir um método para que este limiar se adapte a diferentes cenários de tráfego. O ajuste de Φ vai garantir que os

Tabela 4.2: Categorias limiar Φ utilizado de acordo com o percentual de densidade local.

Categoria de Tráfego	$D_i(k)$	Φ (m)
Leve	$\leq 30\%$	0,5
Moderado	$> 30\%$ e $\leq 60\%$	1,0
Pesado	$> 60\%$	1,5

veículos tenham noção da posição de seus vizinhos sem o envio excessivo de *beacons*. Para o protocolo proposto, sugere-se o cálculo da densidade observada em relação à densidade máxima atual.

O limiar Φ pode ser definido através do número de veículos a um salto distância, ou seja, que podem ser alcançados com apenas uma mensagem. Define-se N como um conjunto de veículos, logo um veículo $v_i \in N$ pode realizar o cálculo do percentual de densidade local $D_i(k)$ observada em um momento k da seguinte forma:

$$D_i(k) = \frac{n(v_i, k) + 1}{D_{max}(k)} \cdot 100, \quad \forall v_i \in N, \quad (4.3)$$

onde $n(v_i, k)$ representa o número de vizinhos de v_i , ou seja, o tamanho da lista de vizinhos do veículo v_i . $D_{max}(k)$ denota a densidade máxima no momento k .

A densidade máxima $D_{max}(k)$ pode ser definida através do cálculo de uma estimativa do número máximo de veículos que podem ocupar o espaço onde o veículo se encontra naquele momento da seguinte forma:

$$D_{max}(k) = \frac{l \cdot (2 \cdot r)}{L_{med} + M_{gap}}, \quad (4.4)$$

onde l representa o número de pistas, r o raio de transmissão, L_{med} o comprimento médio de um veículo e M_{gap} é o espaço mínimo entre dois veículos. Em todo intervalo de atualização, cada veículo irá realizar o cálculo de sua densidade local e máxima naquele momento e definir o limiar de erro da predição de acordo com a Tabela 4.2.

Quando o número de vizinhos se aproxima da densidade máxima, então $D_i(k)$ se aproximará de 100%, indicando uma condição de tráfego pesado. Em ambientes de tráfego leve, os veículos poderão enviar *beacons* com mais frequência, já que menos colisões irão acontecer. Quanto mais congestionado o tráfego se torna, maior será o valor do limiar de erro de predição. Assim, menos *beacons* serão enviados, impedindo que o *broadcast storm* ocorra.

4.1.3 Algoritmo do Protocolo DCAP

Algoritmo 2: NOVO PROTOCOLO PARA A TRANSMISSÃO DE BEACONS

```
1 início
2   repita
3     Atualiza a posição dos veículos vizinhos com base nas Equações 4.1 a 4.2.
4     Remove vizinhos fora do raio de transmissão ou que excederam o tempo
       máximo de persistência.
5     Calcula a densidade local  $D_i(k)$  com base na Equação 4.3.
6     Calcula a densidade máxima  $D_{max}(k)$  com base na Equação 4.4.
7     Determina  $\Phi(k)$  com base na Tabela 4.2.
8     Calcula  $\xi(k)$  de acordo com a Equação 3.16 com entradas  $\widetilde{X}(k)$ ,  $\widehat{X}(k)$ .
9     Aciona o gerador de beacon com o Algoritmo 1 com entrada  $\xi(k)$  e  $\Phi(k)$ .
10  até 1;
11 fim
```

Pode-se generalizar o protocolo de envio de *beacons* proposto segundo o Algoritmo 2. O algoritmo será executado em todo intervalo de atualização, ou seja, em cada momento k até o veículo ser desligado. O primeiro passo é acionar o módulo de monitoramento de vizinhos, que é responsável por atualizar as predições das posições dos vizinhos e remover aqueles que estejam fora do raio de transmissão ou que excederam o tempo de persistência T_{pers} na lista de vizinhos. Após isso, deve-se calcular a densidade local naquele momento com base na Equação 4.3. A densidade máxima também deve ser calculada através da Equação 4.4. Com a densidade local e a densidade máxima, torna-se possível definir o limiar $\Phi(k)$ com base na Tabela 4.2. Por fim, calcula-se o erro médio entre a predição feita e o valor medido pelo GPS corrigido pelo filtro de Kalman. O gerador de *beacon* é então acionado com $\xi(k)$ e $\Phi(k)$ onde a decisão de enviar um *beacon* será feita.

4.2 Protocolos Relacionados

Nesta seção, descreve-se dois protocolos relacionados que serão utilizados para a comparação com o protocolo DCAP em experimentos feitos posteriormente. Primeiramente, apresenta-se o protocolo MPBR que utiliza a predição da posição dos veículos para evitar o *broadcast storm*. Em seguida, o protocolo DSRC é descrito, sendo a forma mais simples de se enviar *beacons* em VANETs, ou seja, nenhum esforço é feito para evitar o *broadcast storm*.

4.2.1 Protocolo MPBR

O protocolo *Mobility Prediction Based Beacon Rate Adaptation* (MPBR) [10] serviu de inspiração para a definição do protocolo proposto e por isso utiliza o filtro de Kalman e possui uma estrutura semelhante como indicado na Figura 3.3. A mudança mais substancial para o funcionamento deste protocolo é que ele utiliza a clusterização *Fuzzy C-Means Clustering Model* (FCM) para determinar o limiar do erro de predição Φ . A clusterização FCM é utilizada para classificar um conjunto de dados, permitindo que cada ponto pertença a um ou mais *clusters*. Este mecanismo utiliza uma matriz U que indica o grau de participação de cada dado a um determinado *cluster*, onde este valor pode variar entre $[0, 1]$. Para utilizar esta técnica para definir o limiar Φ é necessário ter um conjunto de dados que possam auxiliar na detecção do tipo de tráfego atual. Para este fim, define-se o Coeficiente de Congestão CC e o Ruído de Aceleração AN que são valores medidos durante o funcionamento do protocolo e funcionam como dados de entrada para a clusterização FCM.

Coeficiente de Congestão

O coeficiente de congestão CC pode ser determinado através da Equação 4.5:

$$CC = \frac{T - T_0}{T_0}, \quad (4.5)$$

onde T representa o tempo que um veículo levou para percorrer um trecho na pista, T_0 o tempo ideal para percorrer este mesmo trecho. Pode-se notar que o valor de CC nunca será negativo se o veículo não ultrapassar o limite de velocidade da pista. Além disso, de acordo com a equação é fácil notar que o valor de CC será igual a 1 quando o veículo levar o dobro do tempo ideal para realizar aquele percurso. Quando o veículo levar o triplo do tempo ideal, o valor de CC será igual a 2 e assim por diante.

4.2.2 Taxa de Tempo de Estacionamento

A taxa de tempo de estacionamento PTR indica quanto tempo do trecho percorrido o veículo estava parado. Sendo essencial para determinar cenários de congestão. O PTR pode ser definido da seguinte forma:

$$PTR = \frac{T_s}{T}, \quad (4.6)$$

onde T_s representa o tempo em que a velocidade do veículo se aproximou de zero, T representa o tempo total que o veículo levou para realizar aquele percurso.

Ruído de Aceleração

O ruído de aceleração AN indica a estabilidade da velocidade de um veículo. Em um engarrafamento, por exemplo, a velocidade de um veículo estará sempre mudando devido ao número de paradas e partidas. Uma variação da velocidade indica um valor de AN maior. O cálculo de AN é feito segundo a Equação 4.7:

$$AN = \frac{1}{T - T_s} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta v_i^2}{\Delta t_i}, \quad (4.7)$$

onde T_s representa o tempo em que a velocidade de um veículo se aproxima de zero. O intervalo de tempo em que a velocidade do veículo apresenta mudanças é definido como Δt_i e n representa o número de vezes que a velocidade do veículo mudou.

Clusterização FCM

Algoritmos de clusterização são utilizados para classificar um conjunto de dados em categorias ou *clusters*, de forma que os dados em uma categoria apresentam características semelhantes. O *Fuzzy C-Means Clustering Model* (FCM) é um algoritmo de clusterização proposto por Dunn e Bezdek [54]. Neste algoritmo, um dado pode pertencer a um ou mais *clusters*, permitindo maior flexibilidade na classificação.

Os dados de tráfego obtidos a partir das Equações 4.5 a 4.7 são classificados em três *clusters* c_1, c_2, c_3 indicando tráfego leve, moderado e pesado respectivamente. O primeiro passo do algoritmo FCM é inicializar a matriz de partição U que indica o nível de participação de cada dado a um determinado *cluster*. Assumindo N como o conjunto de dados disponíveis, então a matriz U terá dimensões $|N| \times 3$. Para inicializar a matriz, deve-se identificar os limiares iniciais que indicam a participação de cada dado ao *cluster*, Tabela 4.3. Os centros de cada *cluster* são calculados por:

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^{|N|} u_{ij}^m \cdot x_i}{\sum_{i=1}^{|N|} u_{ij}^m}, \quad (4.8)$$

onde $x_i \in N$, representa um dado do conjunto de dados disponíveis e $u_{ij} \in U$ representa o grau de participação de x_i no cluster j . O coeficiente m é qualquer número real maior que 1 e indica o grau de *fuzzification*, assume-se $m = 2$.

Com os novos centros, pode-se atualizar a matriz de participação da seguinte forma:

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (4.9)$$

Tabela 4.3: Limiares para definição do cluster de cada dado.

Tipo de Tráfego	Cluster	Veículo Leve	Veículo Pesado	Φ (m)
Leve	c_1	$CC < 1$	$CC < 1, 2$	0, 5
Médio	c_2	$CC \geq 1$ e $CC < 2$	$CC \geq 1, 2$ e $CC < 2, 2$	1, 0
Pesado	c_3	$CC \geq 2$	$CC \geq 2, 2$	1, 5

onde C representa o número total de clusters.

O FCM funciona de forma iterativa, ou seja, ele continuará calculando os centros dos *clusters* e atualizando os valores de U até que o erro encontrado entre duas iterações seja minimizado. Este erro é denotado como J e pode ser definido por:

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2. \quad (4.10)$$

A condição de parada ocorre quando $J \leq \varepsilon$, onde $\varepsilon = 0,01$ [10].

O Algoritmo 3 demonstra o funcionamento da clusterização *fuzzy c-means*. A entrada do algoritmo é um conjunto de dados chamado *Data*, contendo informações acerca dos valores de CC e AN medidos recentemente. O primeiro passo é inicializar a matriz de participação U seguindo a Tabela 4.3. Em seguida, calcula-se os centros dos *clusters* e se atualiza a matriz de participação U até que o erro J seja minimizado. Por fim, soma-se os valores de participação referentes a cada *cluster* e o que apresentar o maior valor representa o tipo de tráfego classificado e conseqüentemente o valor do limiar tal como indicado pela tabel Tabela 4.3.

Algoritmo 3: DEFINIÇÃO DO LIMIAR DE ERRO DE PREDIÇÃO Φ no MPBR

Entrada: Conjunto de dados *Data*

Saída: $\Phi(k)$

1 **início**

2 | Inicializar a matriz de participação U com base na Tabela 4.3 e entrada *Data*.

3 | **repita**

4 | | Calcular os centros dos *clusters* c_1, c_2, c_3 com a Equação 4.8.

5 | | Atualizar a matriz U com a Equação 4.9.

6 | | Calcular J com a Equação 4.10.

7 | **até** $J \leq \varepsilon$;

8 | $\Phi(k) = ClusterComSomaMaxima(U)$

9 **fim**

4.2.3 Protocolo DSRC

De acordo com o padrão SAE J2735 [35], *beacons* devem ser enviados a uma taxa de 10 Hz por todos os veículos. O protocolo do padrão DSRC para o envio de *beacons* segue a mesma estratégia, ou seja, a cada 0,1 s um novo *beacon* é gerado por todos os veículos. Nenhum ajuste é feito a respeito da taxa de transmissão dos veículos dependendo do estado atual do tráfego. O mesmo vale para o ajuste da potência de transmissão, onde aqui se assume que os veículos devem transmitir com a potência máxima.

4.3 Discussão

Aborda-se o protocolo DCAP, com destaque ao uso do filtro de Kalman para a filtragem de ruído do GPS e a definição do limiar de erro de predição Φ com base na densidade de veículos. Descreve-se os protocolos relacionados que serão utilizados para a comparação experimental posterior, onde o protocolo MPBR também utiliza o filtro de Kalman, mas define o limiar de erro de predição Φ através da clusterização FCM. O protocolo DSRC segue as diretrizes do padrão J2735 [35] e também é brevemente descrito.

No próximo capítulo, aborda-se o ambiente e cenário de simulação utilizado para demonstrar o funcionamento do protocolo DCAP e dos protocolos relacionados. O desempenho do filtro de Kalman será analisado e as métricas utilizadas para comparação dos protocolos são exploradas. Por fim, uma discussão será feita acerca dos resultados obtidos.

Capítulo 5

Resultados das Simulações

Este capítulo tem como principal objetivo analisar o comportamento dos protocolos descritos no Capítulo 4 através de simulações realizadas em um ambiente que se aproxima de uma rede veicular real. Apresenta-se o ambiente de simulação utilizado, bem como os cenários para simulação e suas características. A análise dos resultados das simulações visa demonstrar o desempenho do filtro de Kalman e comparar o funcionamento dos protocolos em dois cenários de simulação.

5.1 Ambiente de Simulação

Após a análise dos simuladores existentes, optou-se pelo uso do SUMO [55] com Veins [56] e OMNeT++ [57]. Um estudo feito em [53] demonstra que para trabalhos científicos, o uso destas ferramentas têm sido o mais usado entre as opções disponíveis para simular redes veiculares. O SUMO [55] é utilizado para simular a mobilidade no trânsito, com este simulador se torna possível definir características de veículos, pistas, obstáculos e fluxos de tráfego. O OMNeT++ [57] é um simulador de eventos discretos, geralmente usado para construir simuladores de rede. O Veins [56] é um *framework* que dispõe toda a implementação da pilha DSRC/WAVE com as características definidas no padrão IEEE 802.11p e da família de padrões IEEE 1609.x.

5.1.1 SUMO

O *Simulation of Urban Mobility* (SUMO) [55] é um simulador de mobilidade de trânsito para o uso em redes veiculares. Com ele é possível definir as características do fluxo de tráfego desejado através de arquivos XML, dando opções para alterar o tipo de veículo e fluxo de tráfego desejado. Além disso, o SUMO também provê a implementação de modelos de mobilidade. Mesmo tendo suas características predefinidas, o SUMO permite

a introdução de aleatoriedade através de variáveis que variam em grau. Esta ferramenta pode ser utilizada para diferentes aplicações como avaliação de semáforos, escolha e redirecionamento de rotas, avaliação de métodos de vigilância de tráfego, previsão de tráfego e simulação de comunicações veiculares. Na Figura 5.1 é possível ver o funcionamento do SUMO em um cruzamento, onde existem semáforos e veículos.



Figura 5.1: Exemplo de simulação de tráfego na interface do SUMO.

5.1.2 OMNeT++

O OMNeT++ [57] é um simulador de eventos discretos de propósito geral, implementado em linguagem de programação C++. Ele é escalável, apresenta consumo de memória e o tempo de simulação é baixo. Ele tem ganhado popularidade entre a comunidade de pesquisa em redes veiculares devido a sua facilidade de uso [53]. Ele provê protocolos de rede e suporta a simulação da camada de enlace e física. Também possui uma interface gráfica e desenho modularizado, Figura 5.2. A licença do OMNeT++ permite seu uso em âmbito acadêmico e educacional, o uso comercial requer outra licença. Ele está disponível para os sistemas operacionais Linux, macOS, Windows para uso não comercial.

5.1.3 Veins

O uso do Veins requer o OMNET++ para simular eventos na rede e o SUMO para simular modelos de tráfego que podem se aproximar da realidade. O Veins provê modelos detalhados do IEEE 802.11p WAVE contando com as adições mais recentes do padrão IEEE 1609.4 [34]. O Veins provê operação multi-canal, controle de acesso baseado em QoS, efeitos de ruído, efeitos de interferência e modelos de propagação para simular efeitos de

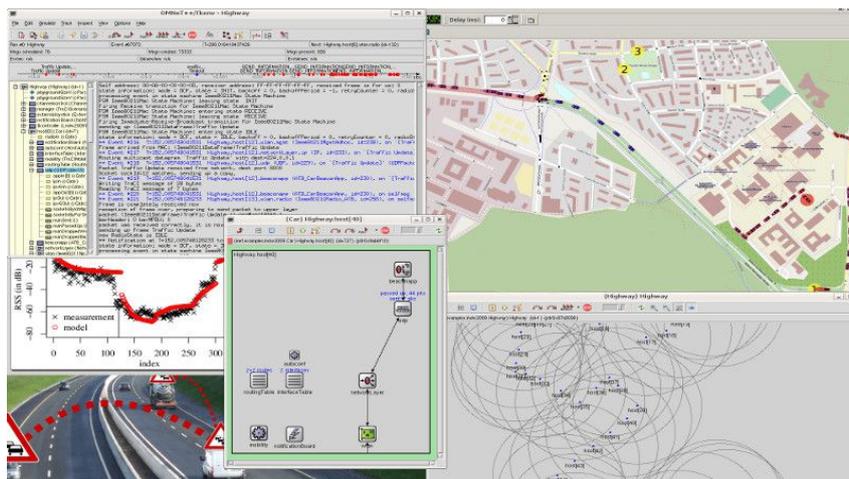


Figura 5.2: Exemplo de simulação de tráfego na interface do OMNeT++.

sombreamento causados por outros veículos e obstáculos. O Veins é um *software* livre compatível com Linux, macOS e Windows.

5.2 Cenários de Simulação

Os cenários de simulação podem ser descritos através de arquivos XML, dentre eles, o arquivo de rede SUMO, o arquivo de polígonos SUMO e o arquivo de rotas SUMO. O SUMO permite descrever o cenário de simulação no que tange ao número de pistas e suas características, bem como faixas de pedestres, ciclovias, paradas de ônibus e semáforos. O SUMO define uma ferramenta que permite a criação de redes através de uma interface gráfica conhecida como NETEDIT. Para utilizar mapas reais, o uso da ferramenta NETCONVERT permite converter arquivos no formato OSM [58] para arquivos de rede SUMO.

As características de um veículo e de como a rota deve ser percorrida são definidas através de parâmetros encontrados na documentação do SUMO [55]. Para se aproximar da realidade, propõe-se os tipos de veículos encontrados na Tabela 5.1 [59]. Ainda é possível definir o fluxo de tráfego dos veículos, podendo definir quais veículos devem ocupar quais faixas, quando eles devem ser gerados, o período em que devem ser gerados, momento de parada, a velocidade de partida e o número de veículos daquele tipo. Define-se que todos os veículos devem partir do começo e ir até o final da rota definida. Veículos pesados só podem trafegar na faixa mais à direita, os outros veículos podem trafegar livremente entre as três faixas. Todos devem partir com velocidade máxima.

Todo veículo obrigatoriamente se movimenta de acordo com a velocidade máxima da pista. Este valor pode ser ajustado com alguns parâmetros, dentre eles o Fator de

Tabela 5.1: Tipos de veículos e suas características físicas.

Tipo de Veículo	Comprimento (m)	Largura (m)
Carro Particular	4,5	2,55
Vans ou Carro com Reboque	9,0	2,55
Caminhão Pequeno	15	2,55
Caminhão Longo ou Ônibus	25,25	2,60

Velocidade, que informa a velocidade com que o veículo deve se movimentar em relação ao máximo da pista. Como veículos pesados se movimentam mais lentamente, optou-se por valores que considerem este comportamento. Ainda é possível determinar valores para gerar imprevisibilidade durante a simulação que representa a imperfeição do motorista, denotado como Fator σ . Os valores escolhidos se encontram na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Tipos de veículos e suas características de mobilidade.

Tipo de Veículo	Fator de Velocidade (%)	Fator σ (%)	Quantitativo (%)
Carro Particular	100%	30%	82%
Vans ou Carros com Reboque	100%	20%	6%
Caminhão Pequeno	95%	10%	6%
Caminhão Longo ou Ônibus	95%	10%	6%

A Tabela 5.3 apresenta outros parâmetros utilizados para simulação. A frequência e a largura de banda foram definidas de acordo com as características da camada física do IEEE 802.11p, discutidas na Subseção 2.4.4. A taxa de *bits* de 6 Mbits/s foi escolhida como indicado em [60], onde se demonstra através de diferentes cenários que é a taxa de *bits* ótima para redes veiculares. O modelo de propagação do sinal *two-ray interference* foi escolhido por simular as características de interferência e atenuação do sinal em redes veiculares com mais acurácia quando comparado à outros modelos [61]. O valor de potência de transmissão escolhido permite que as mensagens alcancem o raio de transmissão de 350 m. Cada protocolo será simulado com 5 repetições para densidades de 30, 60, 90 e 120 veículos, totalizando 60 simulações em cada cenário. Cada repetição indica como o pseudo-gerador de números aleatórios do simulador será inicializado. Serão propostos dois cenários para analisar o comportamento dos protocolos descritos no Capítulo 4.

5.2.1 Cenário A: Congestionamento

O primeiro cenário implementado para simulação apresenta um congestionamento causado por um acidente. Propõe-se o uso de uma estrada com três faixas de 4 Km como indicado na Figura 5.3. No período inicial da simulação, os veículos são gerados a uma taxa de 1 veículo por segundo e devem já começar com a velocidade máxima da pista, aproximadamente 40 Km/h. Quando os veículos trafegam 2 Km, eles são surpreendidos

Tabela 5.3: Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor
Frequência de Banda	5,89 GHz
Largura de Banda	10 MHz
Taxa de Bits	6 Mbits/s
Sensibilidade do Receptor	-89 dBm
Ruído	-110 dBm
Potência de Transmissão (P_t)	20 dBm
Modelo de Propagação	<i>Two-ray interference</i>
Raio de Transmissão (r)	350 m
Altura da Antena (h_t)	1,895 m
Tamanho do <i>Beacon</i>	256 bytes
Intervalo de Atualização (I_{att})	0,1 s
Tempo de Simulação (T_{total})	200 s
Velocidade Máxima	60 Km/h
Densidade de Veículos	30, 60, 90, 120

por um bloqueio na pista causado por um acidente. Os veículos são forçados a trocar para a faixa mais à direita, o que gera um congestionamento na pista. O *broadcast storm* vai ocorrer se a densidade de veículos for alta e se nenhuma estratégia é implantada para reduzir a frequência de *beacons*. Este cenário demonstrará como os protocolos se comportam em um congestionamento e como os protocolos DCAP e MPBR alteram o limiar de erro de predição Φ de acordo com as condições de tráfego na pista.

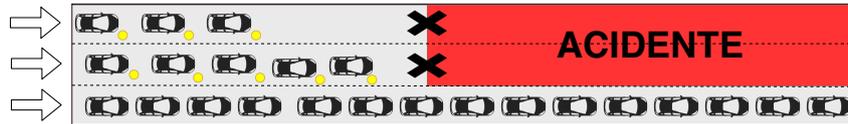


Figura 5.3: Definição do cenário de simulação com três faixas e velocidades diferentes.

5.2.2 Cenário B: L2 Norte

A ferramenta *Open Street Map* (OSM) [58] permite criar um cenário que se aproxima da realidade ao escolher um quadrante para a simulação em uma região mapeada por satélite. Ao escolher o quadrante, a ferramenta gera um arquivo com extensão *.osm* que descreve as características principais da área escolhida. O SUMO fornece uma ferramenta conhecida como NETCONVERT [55] para a conversão deste arquivo em um arquivo de rede SUMO com extensão *.net.xml*. Escolheu-se o quadrante indicado na Figura 5.4 representando um trecho da via L2 Norte localizada em Brasília, DF. O mapa tem área de 8 x 8 Km. Os veículos são gerados a uma taxa de 1 veículo por segundo e devem iniciar com a velocidade

máxima da pista, assim como no cenário A. Eles devem trafegar uma rota com três faixas com a presença de semáforos no caminho modelados de acordo com o seu funcionamento real. Este cenário demonstrará como os protocolos se comportam em um cenário que se aproxima do mundo real.



Figura 5.4: Cenário L2 Norte.

5.3 Análise de Desempenho do Filtro de Kalman

Durante a simulação dos cenários de simulação propostos é possível obter a posição real de cada veículo através do GPS equipado ao mesmo. Esta medida pode ser denotada por:

$$X_{IDEAL}(k) = [x(k), y(k)], \quad (5.1)$$

onde $x(k)$ e $y(k)$ representam a latitude e longitude do veículo no momento k . Entretanto, as medidas obtidas desta maneira não apresentam qualquer ruído, ou seja, sempre mostram exatamente a posição onde o veículo se encontra, assim como um GPS ideal.

Para se aproximar da realidade, optou-se por utilizar uma distribuição normal [62] para inserir ruído na medida $X_{IDEAL}(k)$ obtida do simulador. Esta distribuição de probabilidade pode ser denotada como:

$$X \sim N(\mu, \sigma^2), \quad (5.2)$$

onde X é uma variável aleatória com distribuição normal N com média μ e variância σ^2 . A média μ representa o valor esperado para a variável aleatória, ou seja, valores

mais próximos da média serão mais frequentes. A variância σ^2 representa uma medida de dispersão que mostra o quão distante cada valor está da média esperada. Considera-se uma distribuição de probabilidade vista na Figura 5.5, onde o valor da média μ é igual a 2,5 e a variância σ^2 é igual a 1.

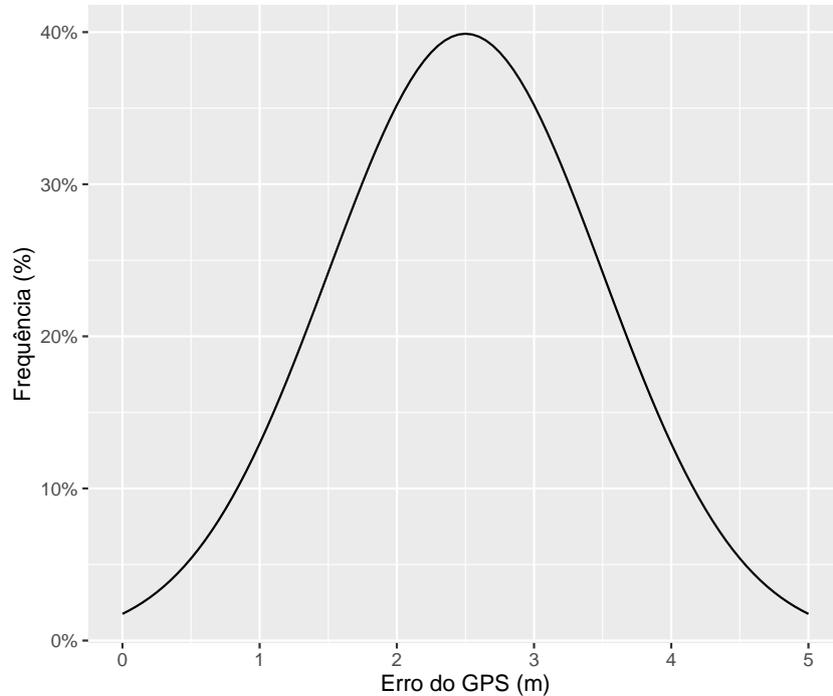
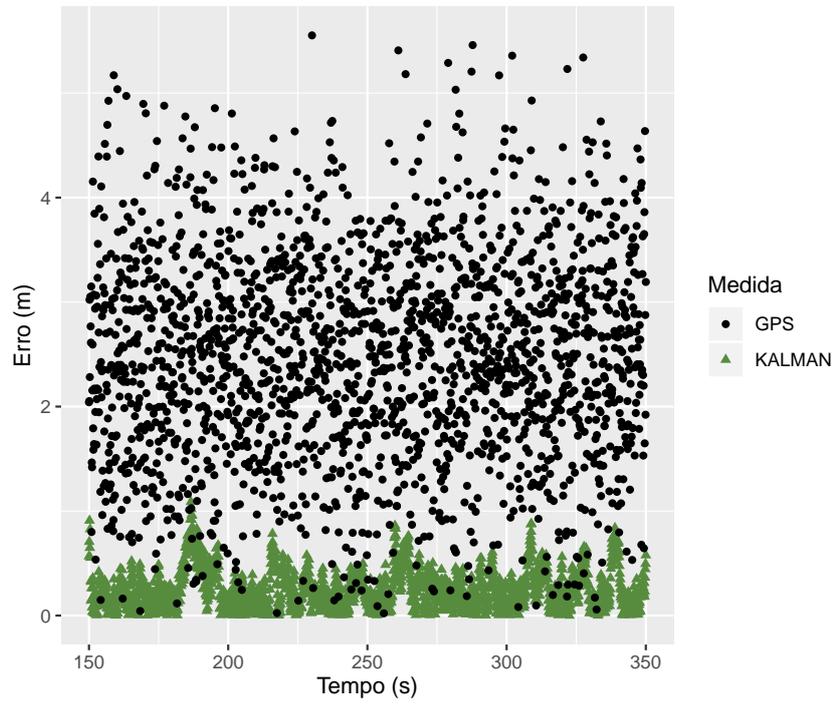


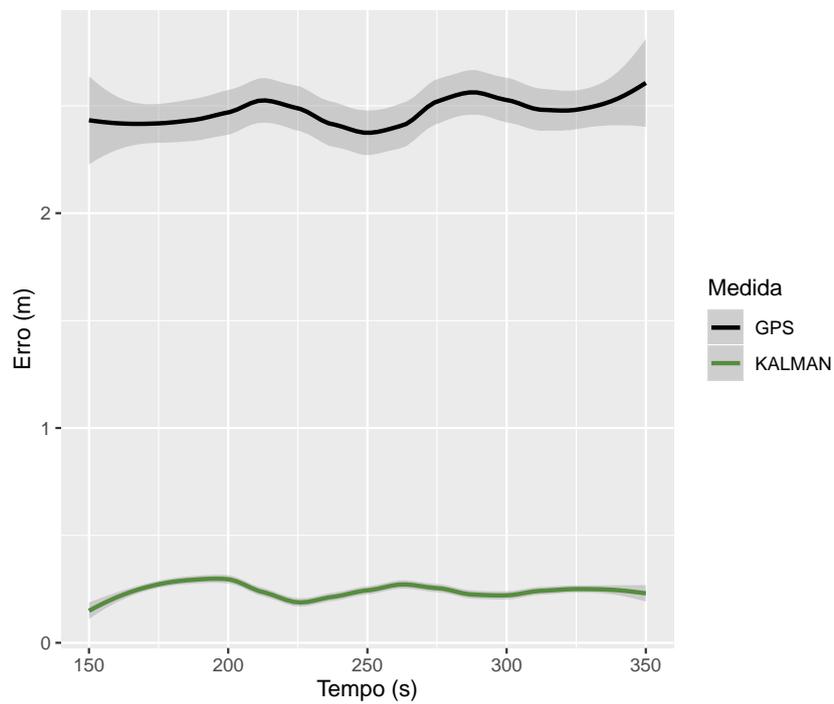
Figura 5.5: Distribuição de probabilidade do erro adicionado à medida do GPS ideal com $X \sim N(2.5, 1)$.

Para ilustrar os benefícios que o filtro de Kalman pode trazer para a filtragem de ruído do GPS, optou-se por analisar como um veículo se comporta durante uma simulação. As medidas obtidas no momento k pelo GPS com ruído podem ser denotadas como $X(k)_{GPS}$, enquanto as medidas obtidas pelo filtro de Kalman são denotadas como $X(k)_{Kalman}$. Com estes valores é possível prever a posição do veículo no momento $k + 1$ através do módulo de predição de mobilidade, Subseção 4.1.1. No momento seguinte, utiliza-se a distância média entre os dois pontos, Equação 3.16, para checar o quão correta a predição foi em relação à posição medida pelo GPS ideal.

Os gráficos da Figura 5.6, apresentam o comportamento do erro da predição de $X(k + 1)_{GPS}$ e $X(k + 1)_{Kalman}$ durante o tempo de simulação de 200 s. Como pode ser visto na Figura 5.6a, o erro do GPS se comporta como esperado através da distribuição de probabilidade modelada, onde valores mais próximos da média ocorrem com mais frequência. Também é possível notar que as medidas do filtro de Kalman não apresentam tanto erro em relação ao GPS com ruído. A Figura 5.6b apresenta os mesmos dados, mas



(a) Erro de predição sem tratamento de dados.



(b) Erro de predição utilizando regressão local.

Figura 5.6: Erro das medidas do GPS e do filtro de Kalman em relação à posição real.

após a regressão através do método de Loess [63], que também é conhecido como regressão local. Este método é não-paramétrico e realiza a regressão de mínimos quadrados em subconjuntos de dados dentro de uma vizinhança definida. Neste gráfico também é possível notar uma sombra próxima às curvas, que demonstra o erro padrão. O filtro de Kalman apresenta mais estabilidade em relação às suas medidas quando comparado ao GPS. Portanto, pode-se concluir que o uso do filtro de Kalman é imprescindível ao lidar com dispositivos que possam conter ruído em suas medidas.

5.4 Avaliação de Desempenho dos Protocolos

Esta seção aborda o comportamento do protocolo proposto DCAP. Compara-se a proposta com os protocolos MPBR [10] e o protocolo DSRC em dois cenários propensos ao problema de *broadcast storm*. Todos os protocolos foram descritos com mais detalhes no Capítulo 4. Além disso, sua implementação foi realizada no mesmo ambiente de simulação descrito e com os mesmos parâmetros de simulação. Para realizar a análise comparativa do desempenho de cada protocolo, utilizou-se métricas como a frequência de *beacons* enviados, a taxa de pacotes perdidos por colisões, a taxa de recepção de pacotes e a cobertura. Estas métricas estão presentes nos protocolos analisados no Capítulo 3, como indicado na Tabela 3.2.

5.4.1 Métricas de Avaliação

Para avaliar o funcionamento dos protocolos, propõe-se o uso de quatro métricas principais. A frequência de *beacons* enviados, a taxa de pacotes perdidos por colisões, a taxa de recepção de pacotes e a cobertura. Estas métricas serão utilizadas para plotar gráficos considerando as densidades de veículos presentes na Tabela 5.3. A frequência de *beacons* enviados por segundo por um veículo v_i pode ser denotada por:

$$F(v_i) = \frac{B(v_i)}{T_{total}}, \forall v_i \in N, \quad (5.3)$$

onde N é o conjunto de veículos presentes na rede, $B(v_i)$ o quantitativo de *beacons* gerados pelo veículo v_i e T_{total} o tempo total de simulação como definido na Tabela 5.3. A média da frequência de *beacons* gerados por segundo por todos os veículos pode então ser definida como:

$$F = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^{|N|} F(v_i), \forall v_i \in N, \quad (5.4)$$

onde $|N|$ representa o quantitativo de veículos presentes na rede.

Os *beacons* são disseminados através do mecanismo de difusão, ou seja, quando um veículo v_i gerar um *beacon*, ele vai realizar uma transmissão e cada veículo receberá uma cópia deste *beacon*. Estas cópias também são chamadas de pacotes. O número de pacotes gerados por um veículo v_i durante a simulação pode ser definido como:

$$P_{total}(v_i) = \sum_{k=0}^{T_{total}} r(v_i, k), \quad \forall v_i \in N, \quad (5.5)$$

onde $r(v_i, k)$ representa o número de veículos presentes no raio de transmissão do veículo v_i no momento k . Para os protocolos DCAP e MPBR, os *beacons* não são gerados com uma frequência fixa, logo se um *beacon* não foi gerado no momento k , considera-se $r(v_i, k) = 0$ no cálculo de P_{total} . O quantitativo total de pacotes gerados por todos os nós pode ser generalizado como:

$$P_{total} = \sum_{i=0}^{|N|} P_{total}(v_i), \quad \forall v_i \in N. \quad (5.6)$$

Durante a simulação, pacotes podem ser perdidos por colisões ou por erros de *bits*. As colisões ocorrem quando dois veículos v_i e v_j geram *beacons* simultaneamente e possuem veículos em comum dentro de seu raio de transmissão. O número de pacotes perdidos por colisões em um momento k pode ser definido por:

$$P_{col}(k) = |\{r(v_i, k)\} \cap \{r(v_j, k)\}|, \quad \forall v_i, v_j \in N, \quad (5.7)$$

representando o quantitativo de vizinhos em comum que dois veículos compartilhavam durante o momento da colisão. Pode-se generalizar o número de pacotes perdidos por colisões da seguinte forma:

$$P_{col} = \sum_{k=0}^{T_{total}} P_{col}(k). \quad (5.8)$$

A taxa de pacotes perdidos por colisões pode então ser calculada por:

$$COL = \frac{P_{col} + P_{rtx}}{P_{total}}, \quad (5.9)$$

onde P_{rtx} representa o número de pacotes perdidos, pois o veículo estava ocupado transmitindo quando recebeu o pacote. P_{rtx} é considerado, já que os veículos que enviaram o *beacon* também podem ser vizinhos. Esta métrica apresenta uma análise importante, pois indica se o protocolo de transmissão de *beacons* conseguiu transmitir suas mensagens nos momentos corretos, ou seja, evitando colisões.

A taxa de recepção de pacotes indica quantos pacotes foram recebidos corretamente durante a simulação e pode ser calculada da seguinte forma:

$$PDR = \frac{P_{total} - P_{rtx} - P_{col} - P_{erro}}{P_{total}}, \quad (5.10)$$

onde P_{erro} representa o número de pacotes recebidos com erros de *bits*.

A última métrica utilizada para a comparação dos protocolos é a cobertura. Esta métrica visa analisar o grau de conhecimento de cada veículo em relação aos veículos dentro de seu raio de transmissão, a cobertura média de um veículo v_i durante uma simulação pode ser definida como:

$$C(v_i) = \frac{1}{T_{total}} \sum_{k=0}^{T_{total}} \frac{n(v_i, k)}{r(v_i, k)}, \quad \forall v_i \in N, \quad (5.11)$$

onde $n(v_i, k)$ representa o número de veículos presentes na lista de vizinhos do veículo v_i momento k . O valor de $r(v_i, k)$ só pode ser obtido através do simulador, visto que ele provê uma maneira de obter a quantidade real de veículos em um raio de transmissão durante a simulação. Quando $n(v_i, k) = r(v_i, k)$ então o percentual de cobertura naquele momento será igual a 100%, visto que o número de vizinhos conhecidos por v_i coincide com os veículos no seu raio de transmissão. A cobertura média de todos os nós pode então ser generalizada como:

$$COB = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^{|N|} C(v_i), \quad (5.12)$$

5.4.2 Intervalo de Confiança

O intervalo de confiança é um tipo de estimativa por intervalo de um parâmetro populacional determinado por dois números obtidos a partir de elementos amostrais. Para determinar um intervalo de confiança é necessário escolher um nível de confiança γ . O valor de γ indica a probabilidade do parâmetro estar presente naquele intervalo, para este trabalho $\gamma = 95\%$, ou seja, o risco do erro da inferência estatística é de 5%. Existem várias formas de se calcular o intervalo de confiança dependendo do conjunto de dados. A distribuição t [64] é indicada para o cálculo do intervalo de confiança da média populacional de uma quantidade pequena de amostras.

A distribuição t é utilizada para encontrar pontos críticos t_c de acordo como o nível de confiança γ e com G_L graus de liberdade. Esta distribuição é regida por G_L , que indica o número de observações independentes em um conjunto de dados, definido por:

$$G_L = n - 1, \quad (5.13)$$

onde n representa o tamanho da amostra. Como foram realizadas 5 simulações diferentes para cada densidade de veículos, conclui-se que sempre haverão 4 graus de liberdade. Para o nível de confiança escolhido $t_c = 2,132$ [62]. O intervalo de confiança CI pode então ser definido da seguinte forma:

$$CI = \bar{X} \pm 2,132 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (5.14)$$

onde \bar{X} representa a média das observações, σ o desvio padrão medido e n o número de medidas. Todos os gráficos apresentados nas subseções seguintes consideram o cálculo do intervalo de confiança de acordo com a Equação 5.14 para a definição de barras de erro.

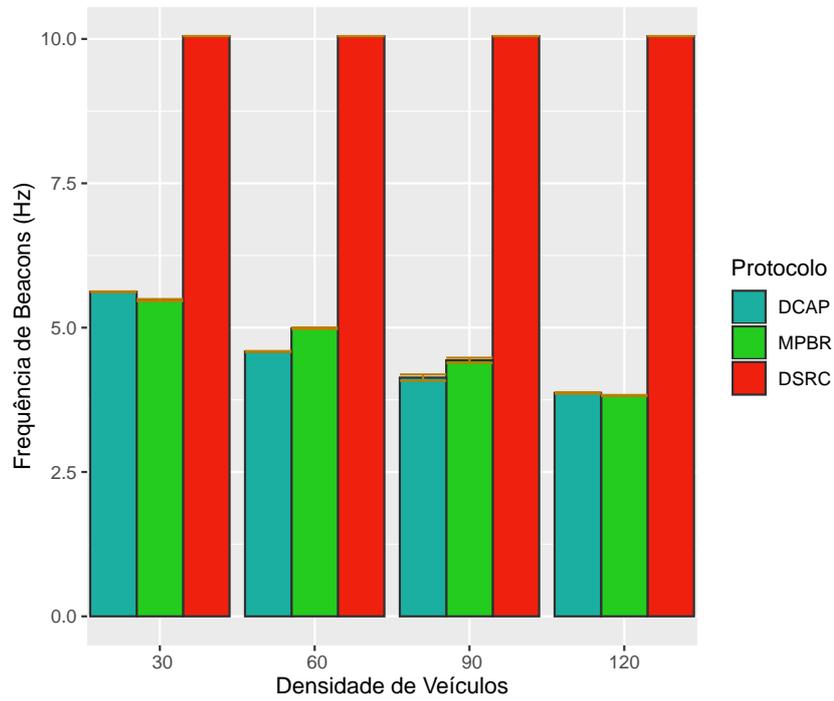
5.4.3 Análise do Cenário A: Congestionamento

O cenário A, descrito na Subseção 5.2.1, foi sugerido para avaliar como veículos se comportam em um ambiente onde um engarrafamento pode acontecer dependendo da densidade de veículos presentes na simulação. Quando um *broadcast storm* ocorrer, espera-se que os protocolos DCAP e MPBR sejam capazes de reduzir o quantitativo de *beacons* sendo enviados durante o tempo de simulação. O protocolo DSRC deve apresentar comportamento semelhante em qualquer cenário, pois a frequência de *beacons* é sempre igual a 10 Hz para todos os veículos.

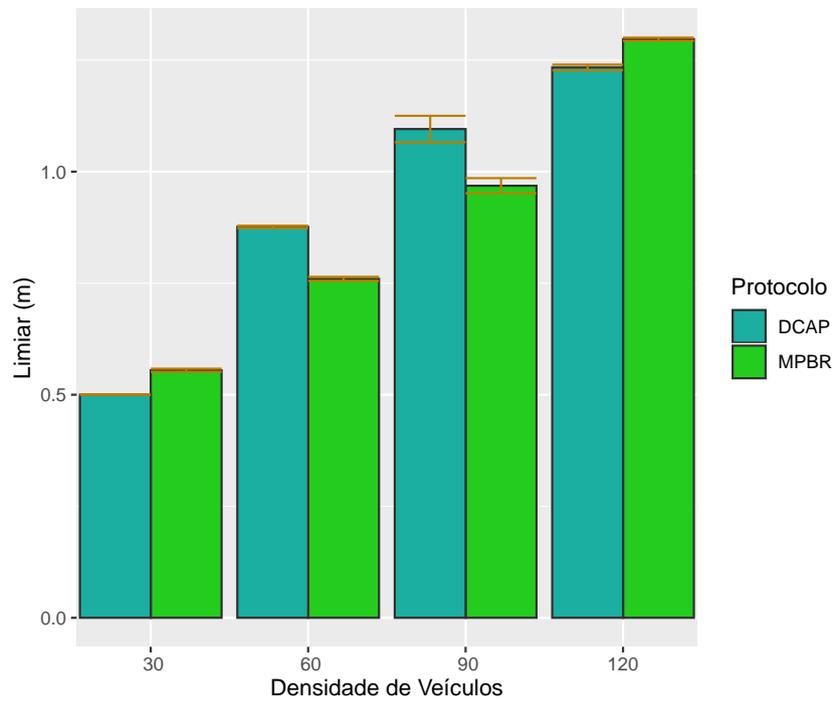
Os gráficos referentes a frequência de *beacons* e a média do limiar do erro da predição (Φ) dos protocolos DCAP e MPBR podem ser vistos na Figura 5.7. Pode-se notar que a frequência de *beacons*, Figura 5.7a, do protocolo DSRC é sempre igual a 10 Hz como esperado, ou seja, cada veículo sempre envia *beacons* com essa frequência. O mecanismo de predição de mobilidade permite reduzir a frequência de *beacons* tanto no protocolo DCAP quanto no protocolo MPBR. O cenário mais propenso ao *broadcast storm* é o de 120 veículos, onde os protocolos DCAP e MPBR reduzem a frequência de envio por veículo para aproximadamente 3,87 Hz e 3,82 Hz respectivamente.

O limiar de erro da predição é utilizado para indicar a tolerância a erros de acordo com a densidade de veículos. Para o protocolo DCAP, quanto maior for a densidade de veículos, maior será o limiar. Esta tendência pode ser notada na Figura 5.7b. O protocolo MPBR se comporta de maneira semelhante, pois quanto mais veículos estão presentes na simulação, mais congestionado o cenário se torna. Para densidade de veículos igual, o limiar foi igual a 0,5 para o DCAP e 0,55 para o MPBR. Indicando menor tolerância a erros, já que haverão menos colisões entre as mensagens, caracterizando um cenário de tráfego leve.

Os gráficos referentes a taxa de recepção de pacotes e a taxa de pacotes perdidos por colisões podem ser vistos na Figura 5.8. Para uma densidade de veículos igual a 120 o

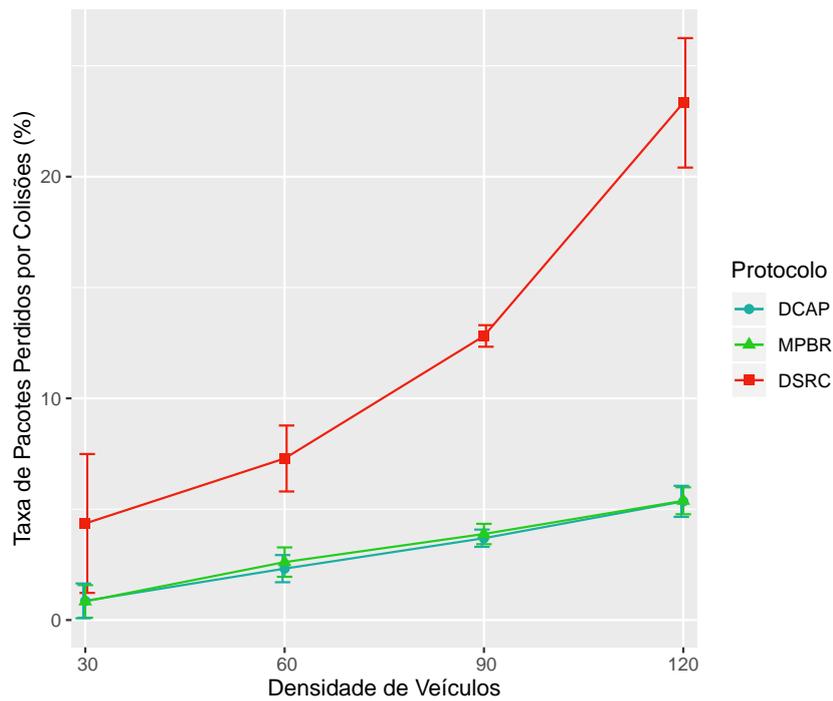


(a) Frequência de *beacons* enviados.

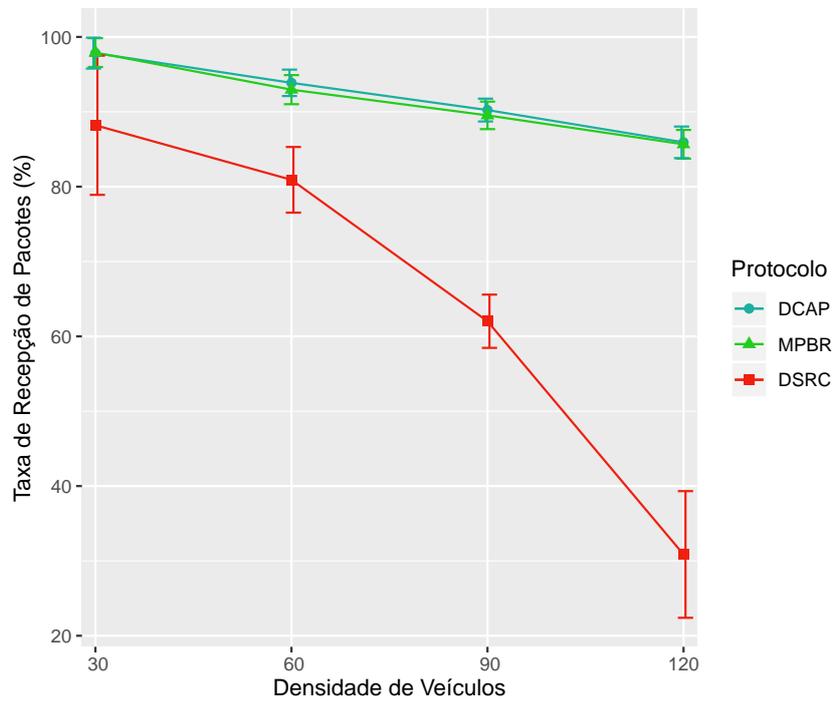


(b) Limiar do erro da predição.

Figura 5.7: Gráficos de barras da frequência de *beacons* enviados e do limiar de erro da predição para o cenário A.



(a) Percentual da taxa de pacotes perdidos por colisões em relação à densidade de veículos.



(b) Percentual da taxa de recepção de pacotes em relação à densidade de veículos.

Figura 5.8: Gráficos da taxa de pacotes perdidos por colisões e taxa de recepção de pacotes para o cenário A.

protocolo DSRC apresentou taxa de pacotes perdidos por colisões de 23,33% e a taxa de recepção de pacotes foi reduzida para 30,86%, cerca de 44,65% pacotes foram perdidos por erros de *bits*. Como os protocolos DCAP e MPBR apresentaram valores semelhantes para a frequência de *beacon* enviados, os valores de *COL* e *PDR* também seguiram a mesma tendência. Para uma densidade de veículos igual a 120, o protocolo DCAP apresentou *COL* igual a 5,35% e *PDR* igual a 85,92%. O protocolo MPBR apresentou *COL* igual a 5,38% e *PDR* igual a 85,65%. Em relação ao protocolo DSRC, o protocolo proposto apresentou uma melhoria da taxa de recepção de pacotes de aproximadamente 55%.

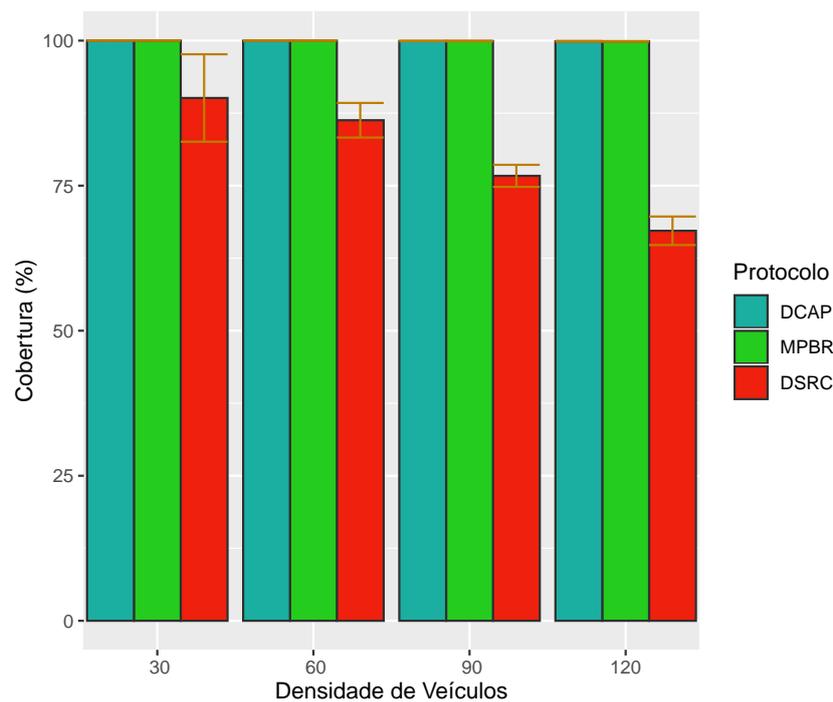


Figura 5.9: Percentual de cobertura para o cenário A.

Em relação à cobertura, pode-se notar na Figura 5.9 que os protocolos DCAP e MPBR conseguiram garantir aproximadamente 100% em todos os cenários. Isto ocorre devido a existência da lista de vizinhos e do ajuste da frequência de *beacons* enviados. O protocolo DSRC atingiu menos que 70% de cobertura para uma densidade de veículos igual a 120. Indicando que em cada intervalo de atualização, os veículos não estavam cientes da existência de aproximadamente 30% dos veículos presentes em seu raio de transmissão, demonstrando a importância de minimizar a congestão da rede.

5.4.4 Análise do Cenário B: L2 Norte

O cenário B, descrito na Subseção 5.2.2, foi sugerido para analisar como os protocolos se comportam em um cenário de tráfego usual. Neste cenário, veículos podem se movimentar

em uma pista de três faixas com a velocidade máxima esperada da via. O protocolo MPBR assume que o *broadcast storm* está relacionado com as condições de tráfego na pista, medindo grandezas como o coeficiente de congestão, taxa de tempo de estacionamento e o ruído da aceleração [10]. Entretanto, este protocolo não considera que o maior causador do *broadcast storm* é na verdade a densidade de veículos dentro do raio de transmissão.

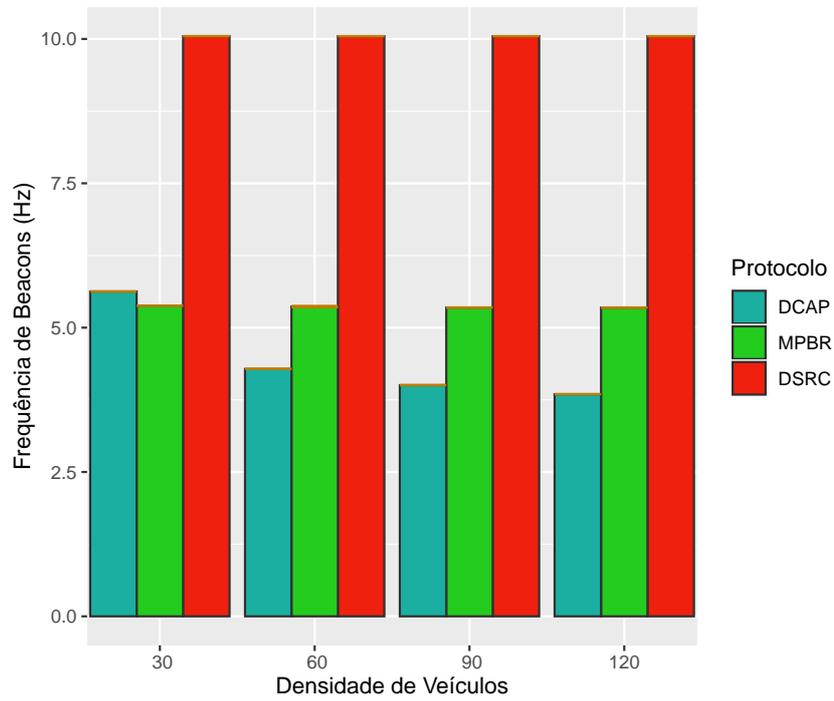
Os gráficos referentes a frequência de *beacons* e o limiar do erro da predição do cenário B podem ser vistos na Figura 5.10. A frequência de *beacons* pode ser vista na Figura 5.10a, onde é possível notar que o protocolo MPBR não reduz o quantitativo de *beacons* mesmo em cenários propensos ao *broadcast storm*, densidades de 60, 90 ou 120 veículos. O gráfico do limiar de erro de predição presente na Figura 5.10b reafirma que o protocolo MPBR não ajusta seu limiar quanto maior a densidade de veículos. Como o protocolo DCAP utiliza a densidade de veículos para ajustar seu limiar, ele conseguirá alterar a taxa de envio de *beacons* de forma mais consciente.

Os gráficos da taxa de pacotes perdidos por colisões e da taxa de recepção de pacotes podem ser vistos na Figura 5.11. O protocolo DCAP apresenta melhorias de aproximadamente 3% e 18% em relação a *COL*, Figura 5.11a, quando comparado aos protocolos MPBR e DSRC em um cenário de *broadcast storm*, densidade de 120 veículos. Este resultado era esperado, visto que o protocolo proposto ajusta a frequência de *beacons* de acordo com a densidade de veículos. O desempenho do DCAP também é superior em *PDR*, Figura 5.11b, onde é possível notar melhorias de aproximadamente 8% (MPBR) e 50% (DSRC) para uma densidade de 120 veículos.

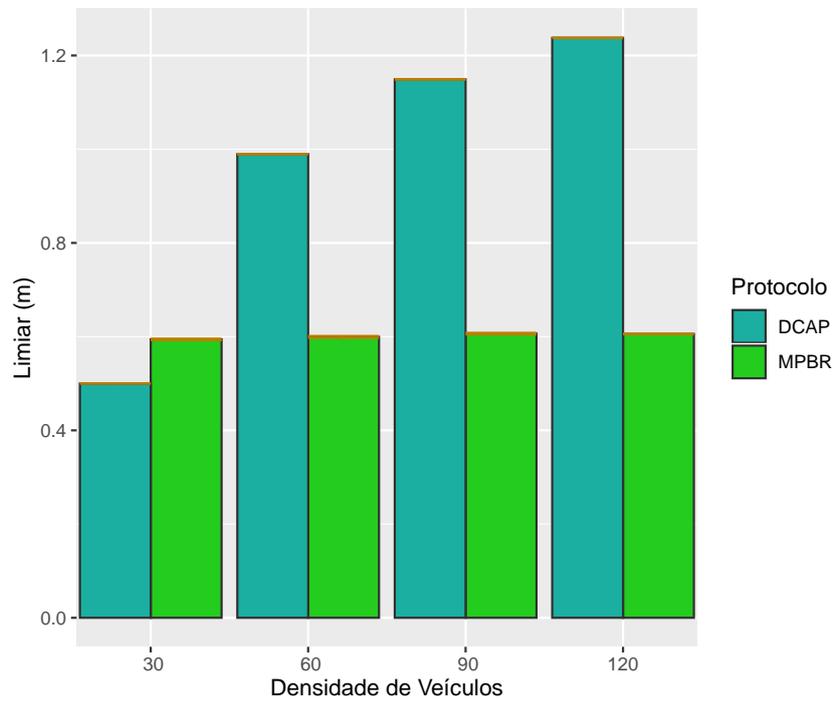
A Figura 5.12 demonstra que os protocolos DCAP e MPBR conseguem garantir que a cobertura se aproxime de 100% devido ao uso da lista de vizinhos. Provando que o protocolo DCAP consegue alcançar cobertura semelhante ao MPBR mesmo reduzindo a frequência de *beacons*. Além disso, o protocolo DCAP diminui a taxa de pacotes perdidos por colisões e aumenta a taxa de recepção de pacotes, aumentando as chances de um pacote ser recebido caso um acidente ocorra.

5.4.5 Considerações Finais

Através da análise do desempenho dos protocolos foi possível notar que em cenários de alta densidade de veículos a taxa de recepção de pacotes diminui devido ao alto número de colisões, caracterizando a ocorrência do *broadcast storm*. O protocolo DSRC não apresenta nenhuma forma para tratar deste problema e apenas envia *beacons* com uma frequência fixa. O protocolo MPBR consegue adaptar a frequência de *beacons* no cenário A, onde um acidente gera uma congestão na pista e reduz a velocidade dos veículos, acionando o protocolo. O DCAP apresenta resultados favoráveis em ambos os cenários. No cenário B, o protocolo obteve resultados superiores ao MPBR dentro das métricas analisadas.

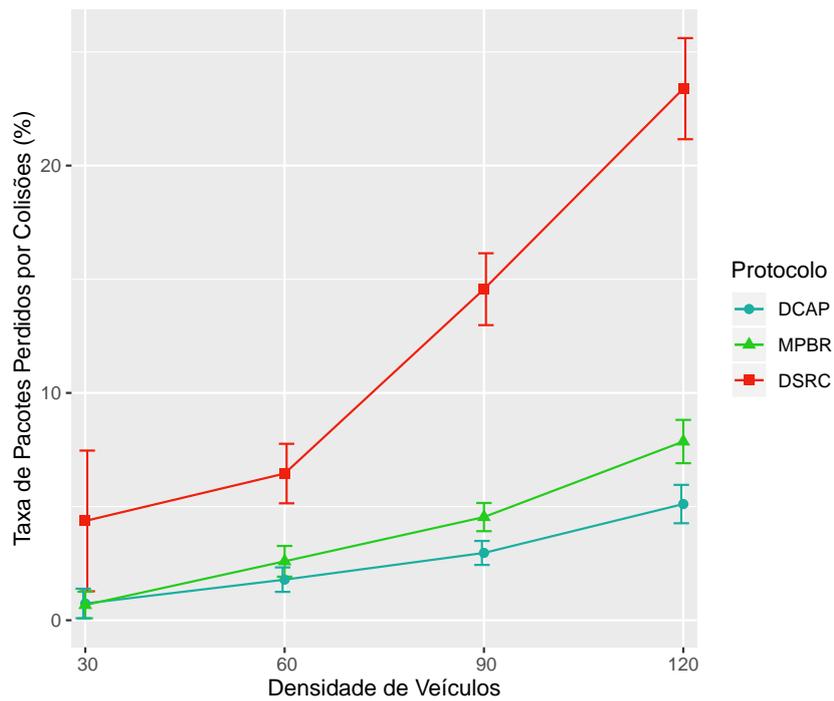


(a) Frequência de *beacons* enviados.

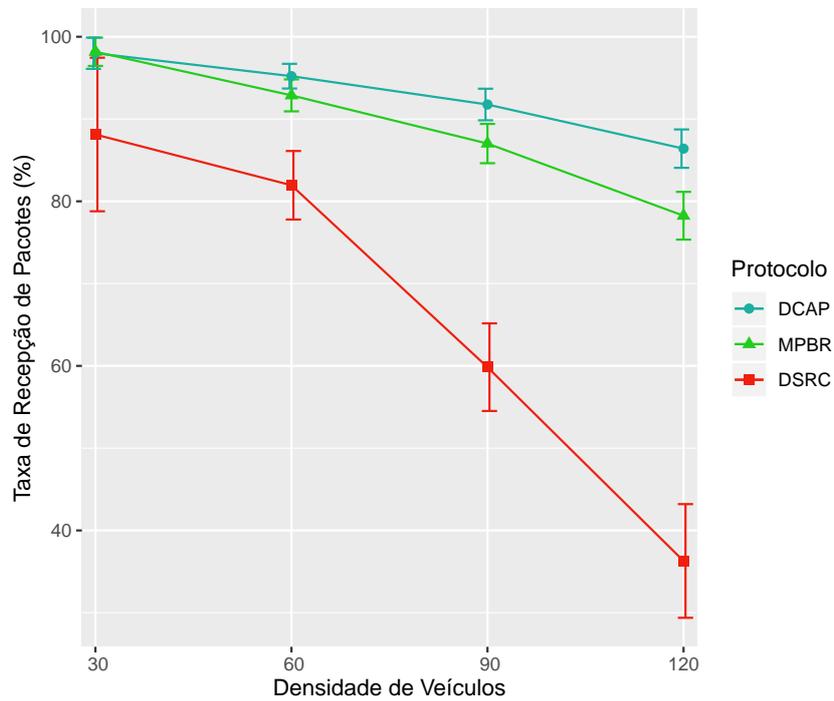


(b) Limiar do erro da predição.

Figura 5.10: Gráficos de barras da frequência de *beacons* enviados e do limiar de erro da predição para o cenário B.



(a) Percentual da taxa de pacotes perdidos por colisões em relação à densidade de veículos.



(b) Percentual da taxa de recepção de pacotes em relação à densidade de veículos.

Figura 5.11: Gráficos da taxa de pacotes perdidos por colisões e taxa de recepção de pacotes para o cenário B.

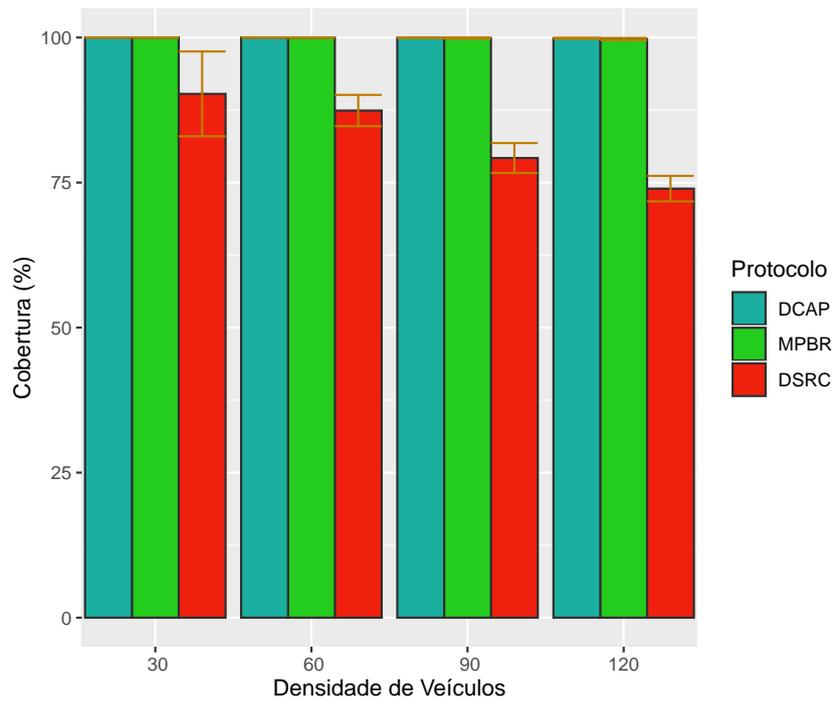


Figura 5.12: Percentual de cobertura para o cenário B.

Conclui-se que o *broadcast storm* está relacionado com a densidade de veículos presentes no raio de transmissão de um veículo, diferente do protocolo MPBR que considera as condições de mobilidade do veículo.

Capítulo 6

Conclusão

As redes veiculares fazem parte de um conjunto de Sistemas de Transporte Inteligente (do Inglês, *Intelligent Transportation Systems*) (ITS), que tem como principal objetivo evitar acidentes e garantir conforto aos seus usuários. Aplicações de segurança em redes veiculares podem envolver cenários de colisão traseira, mudança de faixa ou interseções perigosas. Existem dois modos de operação em redes veiculares e eles são conhecidos como Comunicação de Veículo para Veículo (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle Communication*) (V2V) e Comunicação de Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Infrastructure Communication*) (V2I). As redes V2V também podem receber o nome de Rede Ad Hoc Veicular (do Inglês, *Vehicle Ad-Hoc Network*) (VANET), pois neste modo de operação, os veículos devem construir a topologia da rede através do envio de mensagens conhecidas como *beacons*.

O desenvolvimento deste estudo teve como principal objetivo propor mecanismos que possibilitam minimizar um problema comum em redes veiculares conhecido como *broadcast storm*. As aplicações de segurança em VANETs definem requisitos rígidos em relação a taxa de envio de *beacons*, podendo exigir a transmissão de no mínimo 10 mensagens por segundo. Cenários com uma alta densidade de veículos poderão tornar as colisões entre estas mensagens algo comum, o que diminuirá a taxa de recepção de pacotes e consequentemente impossibilitará o funcionamento correto destas aplicações. Para resolver este problema, o protocolo DCAP foi proposto utilizando técnicas como o filtro de Kalman e o cálculo da densidade de veículos para a classificação do tráfego atual.

Durante este trabalho foi possível notar experimentalmente que o filtro de Kalman é um mecanismo eficaz para tratar do ruído causado por dispositivos eletrônicos como o GPS. A capacidade de ajuste do filtro às situações dinâmicas das redes veiculares foi comprovada em um ambiente de simulação. Neste estudo também foi possível analisar e comparar o comportamento do protocolo DCAP em cenários propensos ao *broadcast storm*. Em ambientes com alta densidade de veículos foi possível notar que a proposta

garante uma taxa de recepção de pacotes de aproximadamente 86%. Enquanto em outro cenário com alta densidade de veículos, mas sem a presença de um engarrafamento, houveram melhorias de 8% e 50% em relação a outras propostas.

Trabalhos Futuros

Para continuar validando o protocolo DCAP sugere-se a utilização de outros cenários para testes, como o encontro de dois fluxos de tráfego vindo de direções diferentes, uma interseção e tráfego real capturado através do GPS. Durante este estudo foi possível notar que o valor da potência de transmissão está diretamente relacionado com a taxa de erros de *bits*, pode-se realizar um estudo sobre o efeito dos modelos de propagação sobre esta grandeza. A adição do protocolo proposto a um protocolo de transmissão de mensagens de alerta pode ser considerado, onde também seria possível analisar como mensagens de alerta são transmitidas. Em relação a predição da posição do veículo, sugere-se uma evolução do filtro de Kalman para o filtro de Kalman *unscented*, que permite realizar estimativas não lineares.

Referências

- [1] Hasan, Syed: *Intelligent transportation systems : 802.11-based vehicular communications*. Springer, Cham, Switzerland, 2018, ISBN 978-3-319-64057-0. 1, 13, 16, 29
- [2] Jiang, Daniel e Luca Delgrossi: *IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments*. Em *VTC Spring 2008 - IEEE Vehicular Technology Conference*. IEEE, maio 2008. <https://doi.org/10.1109/vetecs.2008.458>. 1, 15
- [3] *IEEE Standard for Information technology– Local and metropolitan area networks– Specific requirements– Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2010.5514475>. 1, 4, 14, 16, 20, 23
- [4] Bharati, Sailesh: *Link-layer cooperative communication in vehicular networks*. Springer, Cham, 2018, ISBN 978-3-319-58721-9. 1
- [5] *Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC*, janeiro 2005. <https://trid.trb.org/view/757708>, Acessado em 29/03/2019. 2, 4, 28
- [6] Virdaus, Irvanda Kurniadi, Moonsoo Kang, Soekjoo Shin e Goo Rak Kwon: *A simulation study: Is the broadcast storming really harmful for emergency delivery in VANETs?* Em *2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*. IEEE, outubro 2015. <https://doi.org/10.1109/atc.2015.7388415>. 3
- [7] Sommer, Christoph, Ozan Tonguz e Falko Dressler: *Traffic information systems: efficient message dissemination via adaptive beaconing*. IEEE Communications Magazine, 49(5):173–179, maio 2011. <https://doi.org/10.1109/mcom.2011.5762815>. 3, 4, 30, 41, 42
- [8] Sommer, Christoph, Stefan Joerer, Michele Segata, Ozan K. Tonguz, Renato Lo Cigno e Falko Dressler: *How Shadowing Hurts Vehicular Communications and How Dynamic Beaconing Can Help*. IEEE Transactions on Mobile Computing, 14(7):1411–1421, julho 2015. <https://doi.org/10.1109/tmc.2014.2362752>. 3, 4, 31, 41, 42

- [9] Zemouri, Sofiane, Soufiene Djahel e John Murphy: *An Altruistic Prediction-Based Congestion Control for Strict Beaconing Requirements in Urban VANETs*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, páginas 1–16, 2018. <https://doi.org/10.1109/tsmc.2017.2759341>. 3, 4, 39, 41, 42
- [10] Li, Fei e Chuanhe Huang: *A Mobility Prediction Based Beacon Rate Adaptation Scheme in VANETs*. Em *2018 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. IEEE, junho 2018. <https://doi.org/10.1109/iscc.2018.8538734>. 3, 4, 37, 41, 42, 49, 51, 61, 68
- [11] Tanenbaum, Andrew S.: *Computer Networks 5th Edition*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2010, ISBN 0132126958. 7, 8, 11
- [12] Kurose, James F. e Keith W. Ross: *Computer Networking: A Top-Down Approach (6th Edition)*. Pearson, 6th edição, 2012, ISBN 0132856204, 9780132856201. 7, 8, 13
- [13] *IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2016.7786995>. 12, 23
- [14] Vacca, John R.: *Wireless Data Demystified*. McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA, 2002, ISBN 007139852X. 12
- [15] Carter, Alan: *Intelligent Transport Systems*. Journal of Navigation, 54(1):57–64, 2001. 13
- [16] *IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2014.6755433>. 13
- [17] Willke, Theodore, Patcharinee Tientrakool e Nicholas Maxemchuk: *A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 11(2):3–20, 2009. <https://doi.org/10.1109/surv.2009.090202>. 13
- [18] Gramaglia, M., M. Calderon e C. J. Bernardos: *ABEONA Monitored Traffic: VANET-Assisted Cooperative Traffic Congestion Forecasting*. IEEE Vehicular Technology Magazine, 9(2):50–57, junho 2014. <https://doi.org/10.1109/mvt.2014.2312238>. 14
- [19] Terroso-Saenz, Fernando, Mercedes Valdes-Vela, Cristina Sotomayor-Martinez, Rafael Toledo-Moreo e Antonio F. Gomez-Skarmeta: *A Cooperative Approach to Traffic Congestion Detection With Complex Event Processing and VANET*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 13(2):914–929, junho 2012. <https://doi.org/10.1109/tits.2012.2186127>. 14
- [20] Touluni, Hamza, Benayad Nsiri, Mohammed Boulmalf, Mohammed Bakhouya e Tayeb Sadiki: *An approach to avoid traffic congestion using VANET*. Em *2014 International Conference on Next Generation Networks and Services (NGNS)*. IEEE, maio 2014. <https://doi.org/10.1109/ngns.2014.6990245>. 14

- [21] Xiong, Naixue, Athanasios V. Vasilakos, Laurence T. Yang, Witold Pedrycz, Yan Zhang e Yingshu Li: *A Resilient and Scalable Flocking Scheme in Autonomous Vehicular Networks*. *Mobile Networks and Applications*, 15(1):126–136, maio 2009. <https://doi.org/10.1007/s11036-009-0168-3>. 14
- [22] Sou, Sok Ian: *Modeling Emergency Messaging for Car Accident over Dichotomized Headway Model in Vehicular Ad-hoc Networks*. *IEEE Transactions on Communications*, 61(2):802–812, fevereiro 2013. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2012.010913.110368>. 14
- [23] Miller, Jeffrey: *Vehicle-to-vehicle-to-infrastructure (V2V2I) intelligent transportation system architecture*. Em *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. IEEE, junho 2008. <https://doi.org/10.1109/ivs.2008.4621301>. 14
- [24] *Specification for Telecommunications and Information Exchange Between Roadside and Vehicle Systems – 5 GHz Band Dedicated Short Range Communications (DSRC) Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. <https://doi.org/10.1520/e2213-03r18>. 15
- [25] *802.16/Conformance03-2004 - IEEE Standard for Conformance to IEEE 802.16. Part 3: Radio Conformance Tests (RCT) for 10-66 GHz Wireless MAN-SC Air Interface*, 2004. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2004.94576>. 16
- [26] Chou, Chien Ming, Chen Yuan Li, Wei Min Chien e Kun chan Lan: *A Feasibility Study on Vehicle-to-Infrastructure Communication: WiFi vs. WiMAX*. Em *2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware*. IEEE, 2009. <https://doi.org/10.1109/mdm.2009.127>. 16
- [27] *Interoperability Issues for Commercial Vehicle Safety Applications*, setembro 2012. <https://www.nhtsa.gov/document/interoperability-issues-commercial-vehicle-safety-applications>, Acessado em 02/04/2019. 16
- [28] *Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Resource Manager*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2006.246485>. 17, 18
- [29] *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments–Security Services for Applications and Management Messages - Amendment 1*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2017.8065169>. 17
- [30] *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Networking Services*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2016.7458115>. 17, 18, 19
- [31] Deering, S. e R. Hinden: *Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification*, dezembro 1998. <https://doi.org/10.17487/rfc2460>. 17
- [32] Postel, J.: *Transmission Control Protocol*, setembro 1981. <https://doi.org/10.17487/rfc0793>. 17
- [33] Postel, J.: *User Datagram Protocol*, agosto 1980. <https://doi.org/10.17487/rfc0768>. 17

- [34] *IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) – Multi-Channel Operation*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2016.7435228>. 17, 20, 54
- [35] *Dedicated Short Range Communications (DSRC) Message Set Dictionary*, março 2016. https://www.sae.org/standards/content/j2735_201603/. 17, 52
- [36] *Vehicle-to-Vehicle Communications: Readiness of V2V Technology for Application*, agosto 2014. <https://www.nhtsa.gov/staticfiles/rulemaking/pdf/V2V/Readiness-of-V2V-Technology-for-Application-812014.pdf>, Acessado em 10/04/2019. 18
- [37] Morgan, Yasser L.: *Managing DSRC and WAVE Standards Operations in a V2V Scenario*. *International Journal of Vehicular Technology*, 2010:1–18, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/797405>. 21
- [38] *IEEE Standard for Information technology–Local and metropolitan area networks–Specific requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications - Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2005.97890>. 22
- [39] *IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN Specific Requirements - Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band*. <https://doi.org/10.1109/ieeestd.1999.90606>. 24
- [40] Kalman, R. E.: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. *Journal of Basic Engineering*, 82(1):35, 1960. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>. 24
- [41] Feng, Huifang, Chunfeng Liu, Yantai Shu e Oliver W. W. Yang: *Location Prediction of Vehicles in VANETs Using A Kalman Filter*. *Wireless Personal Communications*, 80(2):543–559, agosto 2014. <https://doi.org/10.1007/s11277-014-2025-3>. 24, 26, 45
- [42] Wang, Ershen, Weiping Zhao e Ming Cai: *Research on improving accuracy of GPS positioning based on particle filter*. Em *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. IEEE, junho 2013. <https://doi.org/10.1109/iciea.2013.6566543>. 24
- [43] Feukeu, E.A. e T. Zuva: *Overcoming Broadcast Storm Problem in a Vehicular Network*. Em *2017 13th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*. IEEE, dezembro 2017. <https://doi.org/10.1109/sitis.2017.72>. 28
- [44] Park, Yongtae e Hyogon Kim: *Collision Control of Periodic Safety Messages With Strict Messaging Frequency Requirements*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 62(2):843–852, fevereiro 2013. <https://doi.org/10.1109/tvt.2012.2227070>. 28

- [45] Torrent-Moreno, M., J. Mittag, P. Santi e H. Hartenstein: *Vehicle-to-Vehicle Communication: Fair Transmit Power Control for Safety-Critical Information*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 58(7):3684–3703, setembro 2009. <https://doi.org/10.1109/tvt.2009.2017545>. 32, 41, 42
- [46] Kloiber, Bernhard, Jerome Harri e Thomas Strang: *Dice the TX power — Improving Awareness Quality in VANETs by random transmit power*. Em *2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. IEEE, novembro 2012. <https://doi.org/10.1109/vnc.2012.6407445>. 33, 41, 42
- [47] Sepulcre, Miguel, Javier Gozalvez, Onur Altintas e Haris Kremo: *Integration of congestion and awareness control in vehicular networks*. Ad Hoc Networks, 37:29–43, fevereiro 2016. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2015.09.010>. 34, 41, 42
- [48] Bansal, Gaurav, John B. Kenney e Charles E. Rohrs: *LIMERIC: A Linear Adaptive Message Rate Algorithm for DSRC Congestion Control*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 62(9):4182–4197, novembro 2013. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2275014>. 34
- [49] Tielert, Tessa, Daniel Jiang, Qi Chen, Luca Delgrossi e Hannes Hartenstein: *Design methodology and evaluation of rate adaptation based congestion control for Vehicle Safety Communications*. Em *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. IEEE, novembro 2011. <https://doi.org/10.1109/vnc.2011.6117132>. 34
- [50] Sepulcre, Miguel, Javier Gozalvez, Jerome Harri e Hannes Hartenstein: *Application-Based Congestion Control Policy for the Communication Channel in VANETs*. IEEE Communications Letters, 14(10):951–953, outubro 2010. <https://doi.org/10.1109/lcomm.2010.091010.100345>. 34, 35
- [51] Killat, Moritz e Hannes Hartenstein: *An Empirical Model for Probability of Packet Reception in Vehicular Ad Hoc Networks*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009:1–12, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/721301>. 35
- [52] Huang, Ching Ling, Yaser Fallah, Raja Sengupta e Hariharan Krishnan: *Adaptive intervehicle communication control for cooperative safety systems*. IEEE Network, 24(1):6–13, janeiro 2010. <https://doi.org/10.1109/mnet.2010.5395777>. 36, 41, 42
- [53] Mussa, Sofian Ali Ben, Mazani Manaf, Kayhan Zrar Ghafoor e Zouina Doukha: *Simulation tools for vehicular ad hoc networks: A comparison study and future perspectives*. Em *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*. IEEE, outubro 2015. <https://doi.org/10.1109/wincom.2015.7381319>. 41, 53, 54
- [54] Bezdek, James C.: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Springer US, 1981. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-0450-1>. 50

- [55] Krajzewicz, Daniel, Jakob Erdmann, Michael Behrisch e Laura Bieker: *Recent Development and Applications of SUMO - Simulation of Urban MObility*. International Journal On Advances in Systems and Measurements, 5(3&4):128–138, dezembro 2012. <https://elib.dlr.de/80483/>. 53, 55, 57
- [56] Sommer, C, R German e F Dressler: *Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis*. IEEE Transactions on Mobile Computing, 10(1):3–15, janeiro 2011. <https://doi.org/10.1109/tmc.2010.133>. 53
- [57] *OMNeT++ Discrete Event Simulator*. <https://omnetpp.org>. Acessado em 02/02/2019. 53, 54
- [58] *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/>, Acessado em 18/03/2019. 55, 57
- [59] Javadi, Saleh, Muhammad Rameez, Mattias Dahl e Mats I. Pettersson: *Vehicle Classification Based on Multiple Fuzzy C-Means Clustering Using Dimensions and Speed Features*. Procedia Computer Science, 126:1344–1350, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.08.085>. 55
- [60] Jiang, Daniel, Qi Chen e Luca Delgrossi: *Optimal data rate selection for vehicle safety communications*. Em *Proceedings of the fifth ACM international workshop on Vehicular Inter-Networking - VANET 2008*. ACM Press, 2008. <https://doi.org/10.1145/1410043.1410050>. 56
- [61] Sommer, Christoph, Stefan Joerer e Falko Dressler: *On the applicability of Two-Ray path loss models for vehicular network simulation*. Em *2012 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*. IEEE, novembro 2012. <https://doi.org/10.1109/vnc.2012.6407446>. 56
- [62] Soong, T. T.: *Fundamentals of Probability and Statistics for Engineers*. Wiley, dec 2007, ISBN 0470868139. <https://www.xarg.org/ref/a/B000WCJF2K/>. 58, 64
- [63] Prabhakaran, Selva. <http://r-statistics.co/Loess-Regression-With-R.html>, Acessado em 28/04/2019. 61
- [64] Hill, G. W.: *Algorithm 396: Student's t-quantiles*. Communications of the ACM, 13(10):619–620, outubro 1970. <https://doi.org/10.1145/355598.362776>. 63