



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

GEM: um protocolo eficiente de difusão de mensagens geocast em redes veiculares

Túlio Abner de Lima

Monografia apresentada como requisito parcial
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador
Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim

Brasília
2019

Dedicatória

Dedico este trabalho a todas as pessoas que necessitam das pesquisas científicas e dos avanços tecnológicos para terem melhores condições de vida. Dedico também àqueles que doam toda a sua vida e seu trabalho para tornar o mundo um lugar melhor, mais belo e verdadeiro.

Agradecimentos

Acima de tudo, agradeço a Deus pelo dom da minha vida, por sua graça que me sustenta todos os dias, por todas as portas que foram abertas ou fechadas, pela sua Providência e Salvação. A Ele toda Honra, Glória e Louvor para sempre! Agradeço também à Virgem Maria, nossa Mãe, por sua Intercessão poderosa e cuidado maternal e a todos os anjos e santos, especialmente ao meu Anjo da Guarda que sempre me acompanha.

Aqui nessa vida, as pessoas também são como anjos enviados por Deus, por isso agradeço especialmente à importantíssima ajuda do meu orientador, o Prof. Dr. Jacir Luiz Bordim, por sua paciência, sua confiança depositada em mim e por acreditar em meu potencial. Sem a sua orientação esse trabalho não seria possível. Agradeço igualmente ao Prof. Dr. Marcos Fagundes Caetano, que desde o início se prontificou a me ajudar e cujos conselhos são de extrema importância para minha vida profissional e pessoal. Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Koji Nakano da Universidade de Hiroshima, Japão, por conceder recursos computacionais essenciais para a realização deste trabalho. Agradeço ao Paulo Victor por ter partilhado comigo a experiência desse trabalho e também ao meu colega e amigo Otávio Alves Dias, por seu companheirismo durante todos os anos deste curso. Com certeza o que aprendemos aqui permanecerá por toda a vida.

Não poderia deixar de agradecer à minha família, que foi o meu sustento e o meu guia durante toda a minha vida e que me apoiou nos momentos mais difíceis. Aos meus queridos pais, Sálvio e Cláudia, que me amam com todo o carinho, aos meus irmãos Bruno, Lorena e Paulo César e a todos os meus familiares e amigos que muito me ajudaram com sua amizade e suas orações. Deus lhes pague! Agradeço, de modo muito especial, à minha namorada Kamila Bueno, que sempre foi para mim uma companheira e sempre se esforçou para me ajudar de todas as formas possíveis.

Por fim, quero agradecer a todas as pessoas que se dedicam no mundo todo ao desenvolvimento de *softwares* livres e possibilitam que tantas outras tenham acesso a educação e trabalho. Eis aí uma forma muito nobre de exercer a nossa profissão.

Resumo

A Rede *Ad hoc* Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad hoc Network* - VANET), tecnologia desenvolvida para melhorar o ambiente de trânsito, utiliza protocolos de difusão de mensagens *geocast* para alertar os motoristas em situações de risco. Este trabalho apresenta uma análise sobre a eficiência de protocolos encontrados na literatura e busca propor uma alternativa que traga melhorias em seu desempenho. Através do levantamento do estado da arte, descobriu-se que o processo de difusão *geocast* em redes VANET pode ser realizado utilizando-se várias abordagens distintas, e que, mesmo trazendo diversas vantagens, cada uma possui características que podem ser melhoradas. Seguindo estas observações, foi desenvolvido o Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast (GEM), de abordagem reativa, que utiliza o envio periódico de *beacons* para auxiliar o processo de escolha de encaminhadores. O desempenho do protocolo proposto foi avaliado através de simulação computacional em um cenário de rodovia e comparado com outras duas propostas semelhantes, já consolidadas na literatura: o protocolo Inundação e o Protocolo Reativo Baseado em Distância (DR). Em todos os aspectos avaliados, a nova proposta apresentou resultados satisfatórios, obtendo desempenho superior aos protocolos comparados, com destaque para a quantidade de transmissões 13 vezes menor e a quantidade de colisões 43 vezes menor que as quantidades apresentadas pelas outras propostas no cenário mais denso. O protocolo GEM também se mostrou ser aplicável em cenários com alta ou baixa densidade de trânsito, pois seu comportamento permaneceu estável mesmo com a mudança da densidade de veículos no trânsito.

Palavras-chave: VANET, redes veiculares, *geocast*, difusão de mensagens

Abstract

Vehicular Ad hoc Network (VANET), technology developed to improve the traffic environment, uses geocast message dissemination protocols to alert drivers in risky situations. This paper presents an analyses about the efficiency of protocols found in the literature and seeks to propose an alternative that brings improvements in its performance. By surveying the state of the art, it was found that the geocast dissemination process in VANET networks can be accomplished using several different approaches, and that, while having several advantages, each has characteristics that can be improved. Following these observations, the reactive approach Geocast Message Forwarding Protocol (from Portuguese, Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast - GEM) was developed, which uses the periodic sending of beacons to assist the process of choosing forwarders. The performance of the proposed protocol was evaluated by computer simulation in a highway scenario and compared with two other similar proposals, already consolidated in literature: the Flooding protocol and the Distance-based Reactive Protocol (DR). In all evaluated aspects, the new proposal presented satisfactory results, outperforming the compared protocols, with emphasis on the number of transmissions 13 times lower and the number of collisions 43 times lower than the amounts presented by the other proposals in the denser scenario. The GEM protocol also proved to be applicable in both high or low density traffic, as its behavior has remained stable even with the change in traffic density.

Keywords: VANET, vehicular networks, geocast, message dissemination

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Problema	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo Geral	3
1.2.2	Objetivos Específicos	3
1.3	Metodologia	4
1.4	Estrutura do Trabalho	4
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	VANET	5
2.1.1	Características	6
2.1.2	Funcionamento	6
2.2	Padronização	7
2.2.1	Camadas de Protocolos	8
2.3	Aplicações	12
2.4	Difusão de Mensagens	13
2.4.1	<i>Geocast</i>	14
2.5	Simulação de VANET	17
2.5.1	Ferramentas de Simulação	17
2.5.2	Cálculo de Propagação	22
3	Trabalhos Relacionados	27
3.1	Reativos	27
3.2	Proativos	31
3.3	Análise Comparativa	36
4	Mecanismo de Encaminhamento de Mensagens <i>Geocast</i> - GEM	38
4.1	Funcionamento	38
4.2	Avaliação da Proposta	45
4.2.1	Ambiente de Simulação	45

4.2.2 Métricas de Avaliação	47
4.2.3 Resultados	49
5 GEM-C	56
5.1 Área de Interrupção da Conexão	56
5.2 Abordagens da Literatura	58
5.3 Escolha de Encaminhadores com Cobertura da Área de Interrupção	60
5.3.1 Delimitação das Zonas de Encaminhamento	62
5.3.2 Adaptação do GEM	65
5.4 Avaliação da Melhoria	66
5.4.1 Resultados	67
6 Conclusão e Trabalhos Futuros	70
6.1 Conclusões Acerca dos Resultados	71
6.2 Trabalhos Futuros	72
Referências	73

Lista de Figuras

1.1	Representação da difusão de mensagens de alerta em uma VANET (Adaptado de [1]).	2
2.1	Tipos de comunicação em uma rede VANET. Comunicação entre veículos - V2V e Comunicação entre veículo e infraestrutura - V2I.	7
2.2	Pilha de protocolos ITS com os protocolos pertencentes a cada camada, tendo como referência a pilha de camadas da Internet.	8
2.3	Canais SCH e CCH (Adaptado de [2]).	10
2.4	Acesso aos canais CCH e SCH dividido em intervalos de 50 ms. a) Acesso contínuo. b) Acesso alternado. c) Acesso imediato (Adaptado de [3]).	11
2.5	Protocolo de <i>geocast</i>	14
2.6	Estrutura dos simuladores de VANET. a) O simulador de mobilidade fornece as trilhas de movimentação pré-calculadas para o simulador de rede. b) O simulador integrado realiza a comunicação bidirecional entre os simuladores em tempo de execução.	18
2.7	Comunicação entre as ferramentas OMNeT++, Veins e SUMO (Adaptado de [4]).	22
2.8	Relação entre potência e distância do sinal propagado.	23
2.9	Interferência entre transmissões simultâneas que gera colisão de mensagens.	23
2.10	Diferentes trajetórias que o sinal pode percorrer entre o transmissor e o receptor. d_{dif} é a distância percorrida pelo sinal difratado. d_{dir} é a distância percorrida pelo sinal propagado diretamente ao receptor. d_{ref} é a distância percorrida pelo sinal refletido.	24
2.11	Comparação entre o modelo de Espaço Livre e o modelo de Interferência de Dois Raios.	25
3.1	Divisão dos trabalhos selecionados em reativos e proativos.	27
3.2	Exemplo de difusão de mensagens nos protocolos A)Inundação e B)DR.	28
3.3	Área por onde a mensagem deve ser disseminada pelo protocolo IVG (Adaptado de [5]).	29

3.4	Processo de criação da árvore de <i>multicast</i> pelo protocolo ROVER (Adaptado de [6]).	32
3.5	Construção da rota para a disseminação de mensagens pelo protocolo de <i>mobicast</i> (Adaptado de [7]).	34
3.6	Envio de mensagens pelos membros da espinha dorsal de conexão no protocolo DBA-MAC (Adaptado de [8]).	35
4.1	Exemplo da propagação da mensagem <i>geocast</i> dentro da Zona de Interesse no protocolo GEM.	39
4.2	Formação da vizinhança de um veículo através do envio de <i>beacons</i>	40
4.3	Segmento do cenário de rodovia construído para a simulação na ferramenta SUMO.	45
4.4	Identificação de valores extremos através da técnica de amplitude interquartil.	49
4.5	Gráfico dos saltos realizados para cobrir a ZDI de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.	50
4.6	Gráfico das transmissões realizadas durante a difusão <i>geocast</i> de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.	51
4.7	Gráfico do número de registros de colisão realizados pelos veículos de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.	52
4.8	Gráfico do atraso para cobrir a ZDI de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.	53
4.9	Gráfico da cobertura da ZDI de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.	54
5.1	Modelo TRI para a propagação de um sinal de 50 mW com antenas de recepção e transmissão a 1,9 m de altura.	57
5.2	Propagação de um sinal de 7 mW destacando a área de interrupção da comunicação entre as distâncias 129 e 160 m e o alcance de transmissão de 395 m.	58
5.3	Propagação de um sinal de 13,2 mW com o alcance de transmissão de 395 m, mas sem área de interrupção da comunicação.	59
5.4	Combinação do sinal de duas antenas com separação vertical. A antena A1 está a 2,76 m de altura e a antena A2 está a 2,13 m de altura (Adaptado de [9]).	60

5.5	Casos possíveis de escolhas de encaminhadores que podem ou não cobrir os nós que estão na área de interrupção. O primeiro, segundo e terceiro caso realizam a cobertura, o quarto e quinto caso não.	61
5.6	Demarcação da área de interrupção.	62
5.7	Demarcação da primeira zona δ_p	63
5.8	As áreas de interrupção se interseccionam novamente quando o vizinho está à distância igual a $2\alpha_i$	64
5.9	Termina a interseção entre as área de interrupção no ponto $2\alpha_f$. A segunda zona que não é propícia para a escolha de encaminhadores, definida como δ_s , fica entre os pontos $2\alpha_i$ e $2\alpha_f$	64
5.10	Demarcação das zonas de escolha dos encaminhadores para prover cobertura para a área de interrupção. Os vizinhos escolhidos nas zonas azuis proveem cobertura, os escolhidos nas zonas laranjas não proveem.	65
5.11	Gráfico da distância média dos saltos realizados pela mensagem com cobertura (GEM-C) e sem cobertura (GEM) da área de interrupção, de acordo com a densidade do trânsito.	67
5.12	Gráficos com os resultados de saltos e transmissões, comparando os protocolos GEM e GEM-C.	68
5.13	Gráficos com os resultados de colisões, atraso e cobertura, comparando os protocolos GEM e GEM-C.	69

Lista de Tabelas

2.1	Algumas das informações contidas na mensagem BSM [10].	9
3.1	Comparação dos algoritmos de difusão <i>geocast</i>	36
4.1	Tabela de vizinhos N do nó n_1	40
4.2	Parâmetros de simulação.	46

Lista de Abreviaturas e Siglas

AIQ Amplitude Interquartil.

BSM Basic Safety Message.

CCH Control Channel.

DR Distance-based Reactive Protocol.

DSRC Dedicated Short-Range Communications.

FCC Federal Communications Commision.

FS Free-Space Model.

GEM Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast.

GEM-C Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast com Cobertura da Área de Interrupção.

GPS Global Positioning System.

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IP Internet Protocol.

ITS Intelligent Transportation System.

LLC Logical Link Control.

MAC Media Access Control.

MANET Mobile Ad hoc Network.

OBU Onboard Unit.

RSU Roadside Unit.

SAE Society of Automotive Engineers.

SCH Service Channel.

TCP Transmission Control Protocol.

TraCI Traffic Control Interface.

TRI *Two-Ray Interference Model.*

UDP *User Datagram Protocol.*

V2I *Vehicle-to-Infrastructure.*

V2V *Vehicle-to-Vehicle.*

VANET *Vehicular Ad hoc Network.*

WAVE *Wireless Access in Vehicular Environments.*

Wi-Fi *Wireless Fidelity.*

WSM *WAVE Short Message.*

WSMP *WAVE Short Message Protocol.*

ZdI *Zona de Interesse.*

Capítulo 1

Introdução

Segundo uma pesquisa publicada em 2018 pelo Serviço de Proteção ao Crédito (SPC) [11], os brasileiros gastam em média, nas grandes cidades, duas horas e vinte e oito minutos se deslocando diariamente no trânsito, muitas vezes enfrentando engarrafamentos. Outra pesquisa [12] revelou que o custo para a economia do país, devido os congestionamentos, chega a R\$ 267 bilhões por ano, valor que poderia ser convertido em receita, caso o tempo gasto no trânsito fosse utilizado de forma mais produtiva. Mas os prejuízos vão além dos valores financeiros. Segundo dados publicados pelo Ministério da Infraestrutura [13] [14], em 2018 ocorreram 69.200 acidentes em rodovias federais, o que correspondeu a 97% de todos os acidentes de trânsito no Brasil naquele mesmo ano; e com relação ao meio ambiente, o setor de transportes é responsável por 48,7% das emissões de CO_2 no país, sendo 91,6% desse valor correspondente ao transporte rodoviário, o qual também é responsável por 93% do gasto de combustíveis em todo o setor de transportes.

O estado em que se encontra o sistema de transportes brasileiro se repete também em outros países [15], mas felizmente, para reverter esse cenário global, diversas pesquisas surgiram em todo mundo combinando tecnologias que podem modificar a forma como é realizado o transporte de pessoas e cargas atualmente. Surgiu assim o conceito de Sistema de Transporte Inteligente (do Inglês, *Intelligent Transportation System* - ITS). O ITS busca melhorar a eficiência do trânsito através da coleta de dados de veículos, pedestres, vias e meio ambiente, gerando informações úteis para que se possa atuar diretamente no ambiente de trânsito, modificando o seu funcionamento e auxiliando os seus usuários.

Uma das tecnologias que pode compor um ITS é a Rede *Ad hoc* Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad hoc Network* - VANET), uma estrutura de rede criada especificamente para conectar veículos em um ambiente de trânsito, ilustrada na Figura 1.1, onde os veículos estão enviando mensagens de alerta através de uma conexão sem fio. A VANET possibilita que os veículos compartilhem informações entre si ou com outros dispositivos na Internet. Essa estrutura de comunicação serve como base para o desenvolvimento de aplicações

com diversos propósitos, entre eles: garantir mais segurança para os usuários durante a sua locomoção no trânsito, melhorar a eficiência do trânsito evitando engarrafamentos e diminuir a quantidade de emissões poluentes adaptando o comportamento dos motoristas.



Figura 1.1: Representação da difusão de mensagens de alerta em uma VANET (Adaptado de [1]).

Entre exemplos de aplicações de segurança de trânsito podemos citar as aplicações de difusão de mensagens de alerta. Nesse exemplo, quando um veículo percebe algum evento que o coloca em alerta, como: uma frenagem brusca, um acidente de trânsito ou óleo derramado na via; ele transmite uma mensagem alertando os veículos que estão próximos, os quais devem repassá-la aos próximos veículos até cobrir uma área delimitada, de modo que um novo acidente seja evitado. Esse processo de difusão de mensagens se chama *geocast*.

1.1 Problema

Como as aplicações do ITS com foco em segurança no trânsito buscam a preservação da vida dos usuários e do patrimônio, é necessário que as mensagens que alertam sobre um determinado evento cheguem a todos os veículos potencialmente envolvidos no menor tempo possível. Além disso, o impacto causado na rede VANET, gerado pelas mensagens enviadas por essas aplicações, deve ser mínimo, para que os outros serviços executados na mesma rede não sejam prejudicados. Para se alcançar esses objetivos, são necessários

mecanismos de *geocast* eficientes que levem em consideração as diversas particularidades e distintos cenários do ambiente de trânsito.

Diversas soluções foram propostas na literatura para resolver o problema da difusão de mensagens *geocast*. Em [5] e [16], encontramos mecanismos que utilizam contenção durante a escolha de encaminhadores para evitar a necessidade de troca de mensagens de controle. Contudo, essa técnica aumenta o atraso de entrega e a probabilidade de ocorrerem colisões entre mensagens e transmissões desnecessárias. Em [6], [7] e [8], os mecanismos propostos buscaram realizar a entrega das mensagens através da construção e manutenção de rotas na rede como forma de garantir a cobertura de todos os veículos e diminuir a quantidade de transmissões. Entretanto, manter rotas em uma rede de topologia altamente dinâmica se torna uma tarefa ineficiente e não atende às necessidades das aplicações de segurança de trânsito. Tendo em vista estas observações, se faz necessário o desenvolvimento de uma alternativa que esteja mais adequada ao problema em questão.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Como objetivo geral deste trabalho, buscamos desenvolver um protocolo de envio de mensagens *geocast* que, em comparação ao estado da arte, traga mais eficiência para as aplicações de segurança do trânsito em VANETs, reduzindo o atraso de entrega e a quantidade de transmissões e colisões, e maximizando a cobertura da rede.

1.2.2 Objetivos Específicos

O objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Analisar mecanismos de *geocast* encontrados na literatura, identificando suas características positivas e negativas.
- Desenvolver um novo mecanismo de *geocast* que atenda às características do ambiente de trânsito, utilizando as informações obtidas pela análise das propostas encontradas.
- Simular, em ambiente computacional, a proposta desenvolvida, como também outros mecanismos semelhantes.
- Comparar os resultados obtidos entre os mecanismos e avaliar se a nova proposta apresentou desempenho satisfatório.

1.3 Metodologia

A metodologia de pesquisa empregada neste trabalho se baseia em: reconhecer os esforços já realizados no desenvolvimento de mecanismos de *geocast* através do levantamento do estado da arte; identificar quais características podem ser melhoradas; propor melhorias que guiarão o desenvolvimento de um novo mecanismo de *geocast*; avaliar as melhorias propostas através de simulação computacional e comparação com outros mecanismos semelhantes encontrados na literatura.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho se organiza com a seguinte estrutura: no Capítulo 2, começaremos realizando um estudo teórico dos fundamentos da tecnologia de redes veiculares, descreveremos o processo de difusão de mensagens *geocast* em VANETs e explicaremos como é realizada a simulação computacional da comunicação entre veículos. No Capítulo 3, nos encarregaremos de apresentar trabalhos que demonstrem o avanço alcançado no desenvolvimento de mecanismos para a difusão de mensagens *geocast* em VANETs, as suas contribuições e as características que podem ser melhoradas. No Capítulo 4, apresentaremos uma nova proposta para a difusão de mensagens *geocast*, o Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast (GEM), e realizaremos uma análise comparativa entre nosso mecanismo e outros mecanismos similares utilizando a simulação computacional de ambientes de trânsito.

Após o desenvolvimento do mecanismo GEM, percebemos que haviam algumas limitações com respeito à capacidade de cobertura do mecanismo. Por essa razão, no Capítulo 5, nós descreveremos as adaptações que foram aplicadas e avaliaremos os benefícios alcançados através de simulação computacional. Por fim, no Capítulo 6, concluiremos o nosso trabalho avaliando se os resultados obtidos foram satisfatórios e ressaltaremos as adições que poderão ser feitas futuramente para o melhoramento do Mecanismo de Encaminhamento de Mensagens *Geocast*.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

O trabalho que se desenvolve a seguir se baseia na aplicação de redes de computadores em ambientes veiculares para o desenvolvimento de aplicações que tragam soluções para os problemas enfrentados nos sistemas de transporte. Em vista disso, apresentaremos neste capítulo a teoria fundamental necessária para se compreender o funcionamento das redes veiculares. A Seção 2.1 introduz a tecnologia empregada na construção de redes veiculares, apresentando suas características e seu funcionamento. A Seção 2.2 contextualiza o desenvolvimento científico das redes veiculares e descreve os padrões estabelecidos. Na Seção 2.3 destacamos algumas das aplicações fundamentais desta tecnologia. A Seção 2.4 descreve o problema da difusão de mensagens em ambientes veiculares e os pontos que devem ser observados. Por fim temos a Seção 2.5 que apresenta as ferramentas utilizadas na simulação computacional das redes veiculares e os modelos matemáticos desenvolvidos para o cálculo da propagação do sinal.

2.1 VANET

Sistema de Transporte Inteligente (do Inglês, *Intelligent Transportation System* - ITS) foi o termo criado pelo governo norte-americano na década de 90 para designar os avanços alcançados no desenvolvimento de tecnologias que beneficiassem o sistema de transporte como um todo [17]. O termo é bastante amplo e abrange diversas tecnologias: sistemas de semáforo, controle de freio, aplicativos de transporte público, Sistema de Posicionamento Global (do Inglês, *Global Positioning System* - GPS) [18], e nas últimas duas décadas tem sido usado para designar a tecnologia de Rede *Ad hoc* Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad hoc Network* - VANET), uma rede de comunicação sem fio entre veículos que surgiu com o propósito de prover mais segurança, eficiência e conforto para os sistemas de transporte e os seus usuários [2].

2.1.1 Características

A VANET é uma evolução da Rede *Ad hoc* Móvel (do Inglês, *Mobile Ad hoc Network* - MANET), a qual foi desenvolvida para a conexão de dispositivos móveis com o auxílio de pouca ou nenhuma infraestrutura, onde o recurso computacional dos dispositivos é inferior e o fornecimento de energia é limitado [19]. Dessa forma, a VANET é uma variação onde os nós são veículos automóveis e o ambiente de implantação é o próprio ambiente de trânsito. Segundo [18], [19] e [20], podemos destacar as seguintes características nas redes VANET:

- Os veículos automóveis são maiores que os dispositivos convencionais de conexão em rede e fornecem suprimento de energia suficiente para o uso de *hardwares* com mais capacidade de processamento e armazenamento;
- É possível utilizar informações de sensores instalados no veículo, como localização (por exemplo, GPS), velocidade e orientação;
- Os nós podem alcançar altas velocidades, mas como seguem o padrão das vias de trânsito, a movimentação se torna de certa forma previsível;
- A alta mobilidade dos nós pode gerar mudanças frequentes e repentinas na topologia e na densidade da rede;
- A rede não possui restrição de tamanho, podendo cobrir cidades inteiras;
- Os nós trocam informações constantemente, gerando um alto tráfego de dados.

Essas características diferem as redes VANET de outros tipos de rede (como redes de sensores, por exemplo) e são importantes para guiar o seu desenvolvimento e funcionamento.

2.1.2 Funcionamento

Em uma rede VANET podemos encontrar dois tipos de dispositivos. A Unidade a Bordo do Veículo (do Inglês, *Onboard Unit* - OBU) [2] é um dispositivo instalado no veículo que permite que ele se conecte na VANET. Por veículo podemos nos referir por exemplo a: carros, ônibus, caminhões ou motos. A Unidade na Margem da Pista (do Inglês, *Roadside Unit* - RSU) [2] é um dispositivo estacionário normalmente instalado em estruturas como semáforos, placas ou postes, e fica localizado próximo à passagem dos veículos [21].

Devido à sua característica *ad hoc*, a rede VANET não necessita de infraestrutura para o seu funcionamento, pois os veículos podem se comunicar diretamente, o que chamamos de comunicação Veículo para Veículo (do Inglês, *Vehicle-to-Vehicle* - V2V), como ilustra

a Figura 2.1. Apesar disto, o uso de RSUs viabiliza aos OBUs o acesso à Internet e desempenha o papel de conexão entre veículos e centros de gerenciamento de trânsito, os quais fornecem mapas e orientam os condutores sobre a condição das vias. Quando ocorre a comunicação entre OBUs e RSUs chamamos de comunicação Veículo para Infraestrutura (do Inglês, *Vehicle-to-Infrastructure - V2I*), como na Figura 2.1. As comunicações V2V e V2I podem também ocorrer simultaneamente.

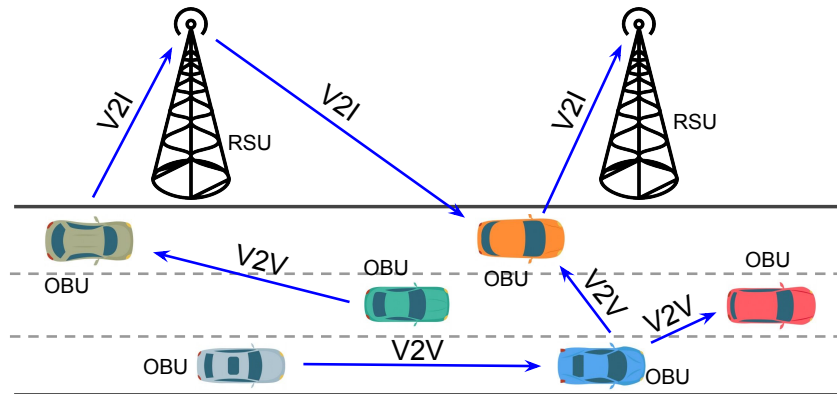


Figura 2.1: Tipos de comunicação em uma rede VANET. Comunicação entre veículos - V2V e Comunicação entre veículo e infraestrutura - V2I.

Nesta seção introduzimos o conceito de VANET, suas características e o seu funcionamento básico. Na próxima seção trataremos dos padrões e protocolos estabelecidos pela comunidade científica.

2.2 Padronização

Em 1999, a Comissão Federal de Comunicações (do Inglês, *Federal Communications Commission - FCC*), órgão norte-americano, regulamentou o espectro de rádio de 75 MHz na faixa de 5,850–5,925 GHz para as comunicações dedicadas de curto alcance (do Inglês, *Dedicated Short-Range Communications - DSRC*) [17]. A partir daí, o governo americano começou a investir em um projeto para a padronização de tecnologias que habilitassem a comunicação em redes VANET. Em 2004, um grupo de pesquisa do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (do Inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*) se encarregou de trabalhar em uma adaptação do protocolo IEEE 802.11 [22], conhecido como Wi-Fi. Esse padrão era amplamente utilizado para acesso em redes móveis, mas necessitava de modificações para atender às exigências dos ambientes veiculares. A adaptação foi publicada com o nome de IEEE 802.11p [23] e introduziu pela primeira vez o mecanismo de acesso em redes móveis batizado de Acesso Sem Fio em Ambientes

Veiculares (do Inglês, *Wireless Access in Vehicular Environments* - WAVE). Depois de concluída, a adaptação foi agregada ao padrão IEEE 802.11.

Outro grupo de trabalho do IEEE desenvolveu a família de padrões IEEE 1609 [2] que ficou conhecida como Arquitetura WAVE e define mecanismos para a troca de mensagens entre os veículos. A partir de 2006, a Sociedade de Engenheiros Automotivos (do Inglês, *Society of Automotive Engineers* - SAE) publicou os padrões SAE J2735 [10] e SAE J2945 [24] que definem modelos de mensagens e requisitos de performance para as aplicações de segurança na VANET [25].

Japão e União Europeia também desenvolveram os próprios padrões para o ambiente de rede veicular. Atualmente, a comunidade internacional está empregando esforços para alcançar uma harmonização entre os padrões [26].

2.2.1 Camadas de Protocolos

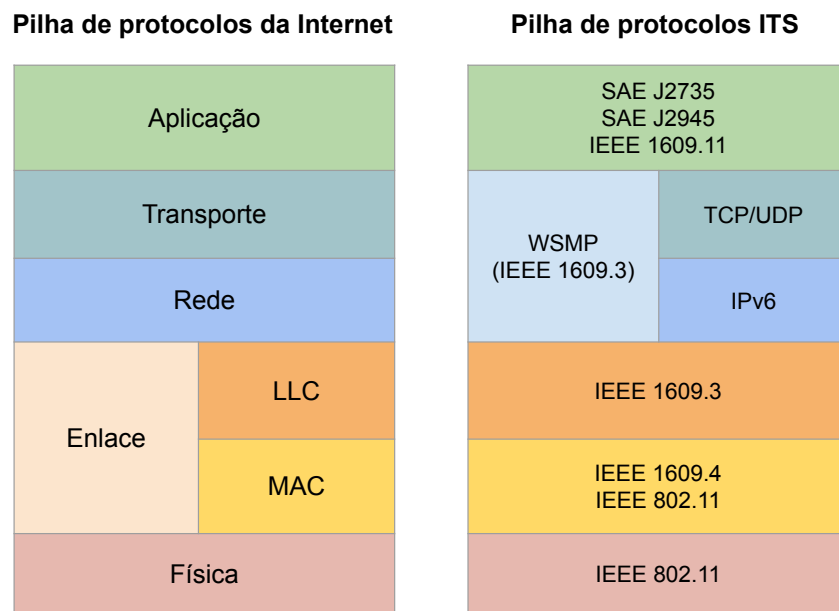


Figura 2.2: Pilha de protocolos ITS com os protocolos pertencentes a cada camada, tendo como referência a pilha de camadas da Internet.

Para organizar as diversas funções desempenhadas no processo de troca de mensagens na rede VANET, os protocolos foram distribuídos em camadas, cada uma provendo um serviço específico. A modularização proporcionada por essa estrutura possibilita que diversos protocolos, desenvolvidos de modo independente, possam operar em conjunto e serem atualizados sem afetar o sistema [27]. A pilha de protocolos ITS é organizada como mostra a Figura 2.2. Ela incorpora os protocolos publicados pelos órgãos IEEE e

Tabela 2.1: Algumas das informações contidas na mensagem BSM [10].

Mensagem de Segurança Básica - BSM
Tempo
Posição (coordenadas e elevação)
Velocidade
Direcionamento
Aceleração
Dimensões do veículo
Acionamento do sistema de freio
Ângulo de direção dos pneus

SAE e estabelece a base mínima para o funcionamento das aplicações ITS. A estrutura é composta de seis camadas, que serão explicadas em detalhes a seguir.

Camada de Aplicação

Na camada de Aplicação são desenvolvidas as aplicações específicas para a rede VANET, como as citadas na Seção 2.3, e os seus protocolos. Temos como exemplo o padrão IEEE 1609.11 [28] que define um protocolo para sistemas de pagamento eletrônico sem fio.

Cada protocolo na camada de Aplicação utiliza mensagens para se comunicar com as aplicações nos outros veículos, mas para que a comunicação ocorra é necessário que os modelos de mensagens sejam padronizados. O padrão SAE J2735 [10] descreve diversos modelos de mensagens para a troca de informações de segurança, alertas e mapas. Um exemplo importante é a Mensagem de Segurança Básica (do Inglês, *Basic Safety Message* - BSM). Ela armazena informações básicas sobre a situação do veículo (como mostra a Figura 2.1) que podem ser usadas em diversas aplicações.

Para que todos os nós possuam uma consciência sobre os veículos que estão ao seu redor, cada veículo pode transmitir mensagens BSM periodicamente, em uma frequência que geralmente varia de 1 até 10 mensagens por segundo [29] [30]. Devido a essa função de sinalização que a BSM desempenha, é comum chamá-la de **beacon**.

Camadas de Transporte e Rede

Devido às características específicas do ambiente veicular, as camadas de Transporte e Rede possuem duas estruturas definidas pela arquitetura WAVE. A primeira estrutura implementa os protocolos tradicionais de transporte: Protocolo de Controle de Transmissão (do Inglês, *Transmission Control Protocol* - TCP) e Protocolo de Datagrama de Usuário (do Inglês, *User Datagram Protocol* - UDP), juntamente com o protocolo de rede: Protocolo de Internet (do Inglês, *Internet Protocol* - IP). Essa estrutura é utilizada para o envio de pacotes entre os veículos e entre veículos e a Internet através da infraestrutura.

Vale destacar que, como alguns autores afirmam [31], essa estrutura enfrenta complicações no ambiente veicular, pois a infraestrutura nem sempre está disponível e a topologia da rede é altamente variável.

A segunda estrutura unifica as camadas de Transporte e Rede em um único protocolo, o Protocolo de Mensagens Curtas WAVE (do Inglês, *WAVE Short Message Protocol - WSMP*) definido no padrão IEEE 1609.3 [32]. O WSMP é mais adequado para aplicações baseadas em mensagens, pois permite o envio de Mensagens Curtas WAVE (do Inglês, *WAVE Short Message - WSM*) que são projetadas para comunicações curtas entre nós fisicamente próximos ou difusões de mensagens sem destinatários específicos (*broadcast*). Os mecanismos de envio de mensagens serão tratados com mais detalhes na Seção 2.4.

Camada de Enlace

Na pilha de protocolos tradicional, encontramos a camada de Enlace que gerencia o acesso ao meio para os nós e garante a entrega dos pacotes de um nó para outro [27]. Na arquitetura WAVE, a camada de Enlace está dividida nas subcamadas Controle de Enlace Lógico (do Inglês, *Logical Link Control - LLC*) e Controle de Acesso ao Meio (do Inglês, *Media Access Control - MAC*). A subcamada LLC, definida pelo padrão IEEE 1609.3 [32], realiza a conexão entre as camadas superiores WSMP e IP e a subcamada inferior MAC.

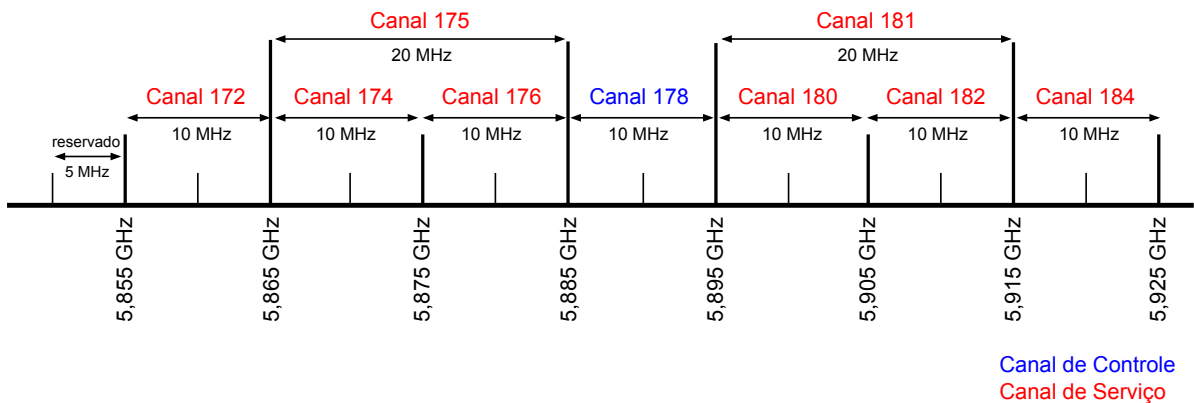


Figura 2.3: Canais SCH e CCH (Adaptado de [2]).

A subcamada MAC, como citado, é uma subcamada da camada de Enlace. Ela é descrita pelos padrões IEEE 1609.4 e IEEE 802.11 e gerencia o acesso aos canais de rádio reservados para o ambiente veicular. O espectro de rádio DSRC foi dividido em 7 canais de 10 MHz (como ilustra a Figura 2.3), sendo o canal 178 definido como canal de controle (do Inglês, *Control Channel - CCH*) e os canais 172, 174, 176, 180, 182 e 184 como canais de serviço (do Inglês, *Service Channel - SCH*). Os canais 174 e 176 combinados formam

o canal 175 com 20 MHz, e os canais 180 e 182 formam o canal 181, também com 20 MHz. No canal CCH trafega somente mensagens do protocolo WSMP. Nos canais SCH as aplicações podem transferir dados tanto pelo protocolo WSMP como pelo protocolo IP [2] [3].

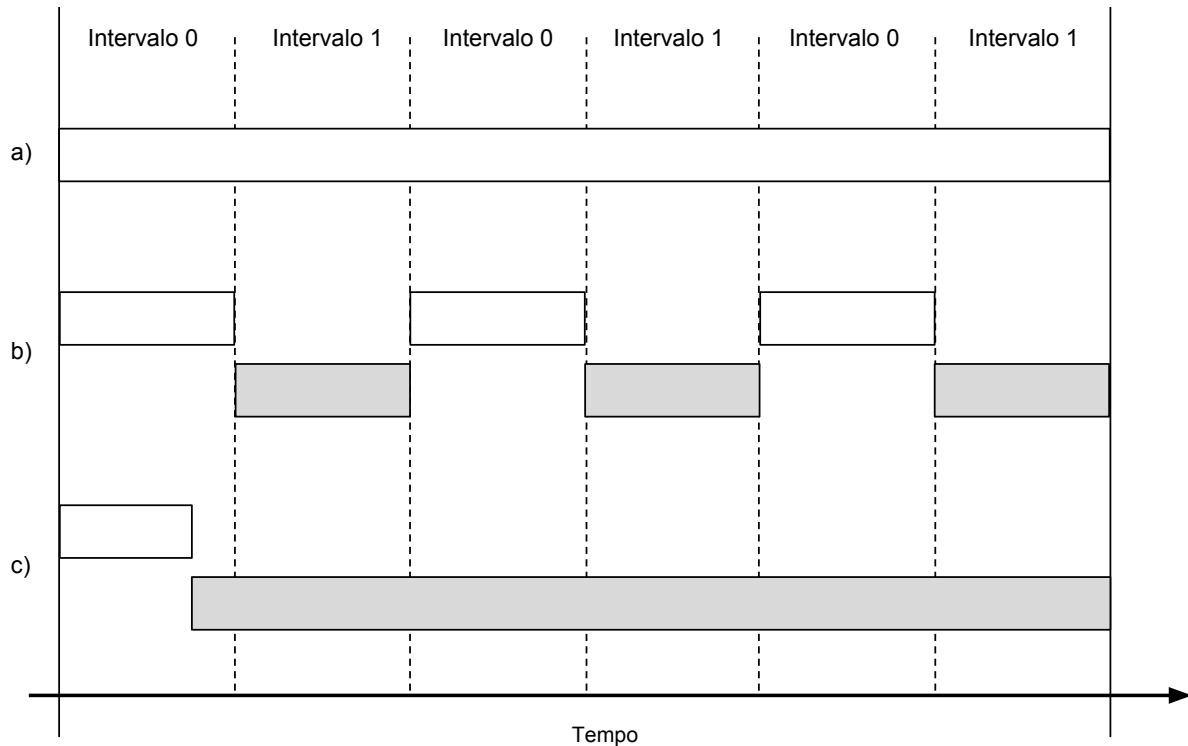


Figura 2.4: Acesso aos canais CCH e SCH dividido em intervalos de 50 ms. a) Acesso contínuo. b) Acesso alternado. c) Acesso imediato (Adaptado de [3]).

Além da divisão de frequência, o acesso ao meio também é dividido por tempo, sendo distribuído em intervalos de 50 ms, como ilustra a Figura 2.4. Cada intervalo é reservado para o acesso a um canal específico, e quando termina o intervalo, o rádio pode ser sintonizado para outro canal ou permanecer no mesmo. A alternância entre os canais pode ser realizado de três formas distintas: no acesso contínuo (a) o dispositivo permanece sintonizado em um só canal durante todo o período; no acesso alternado (b) ele deve revezar entre dois canais; no acesso imediato (c) o dispositivo pode trocar de canal antes do fim do intervalo de comunicação, se identificar que uma transmissão relevante está sendo realizada em outro canal [3].

Para evitar que mais de um dispositivo transmita ao mesmo tempo no mesmo canal, causando assim interferência entre as transmissões (como veremos na Seção 2.5.2), a subcamada MAC implementa um mecanismo de **contenção** chamado Algoritmo Exponencial de *Backoff* [22], que funciona da seguinte forma: quando um nó decide transmitir

em um canal, ele sorteia um tempo aleatório de espera no intervalo $[0, CW]$ e o decrementa enquanto o canal estiver livre. Se o canal estiver ocupado, o tempo de espera não é decrementado. O nó que esgotar primeiro o tempo de espera terá o direito de transmitir a mensagem, e os outros nós deverão esperar até que a transmissão termine para continuarem decrementando o seu tempo de espera.

Caso o tempo de espera de mais de um dispositivo termine ao mesmo tempo, ocorrerá uma interferência entre as transmissões e os dispositivos terão que sortear um novo valor de espera. A cada nova tentativa, o limite CW cresce seguindo a série de potências de 2, sendo inicialmente igual à janela de contenção mínima CW_{Min} e chegando até a janela de contenção máxima CW_{Max} , valores definidos pelo padrão IEEE 802.11 [22].

Camada Física

A camada Física implementa o padrão IEEE 802.11, tradicionalmente conhecido como Wi-Fi. Ela é responsável por realizar o envio bit-a-bit das mensagens entre os nós [27]. Nos canais de 10 MHz são suportadas as taxas de dados de 3, 4,5, 6, 9, 12, 18, 24 e 27 Mb/s, sendo dobradas nos canais de 20 MHz [22].

Foram apresentadas as camadas da pilha de protocolos ITS. Todas as camadas combinadas, cada uma exercendo sua função específica, formam a base necessária para o funcionamento das aplicações ITS, que serão descritas na seção seguinte.

2.3 Aplicações

Os benefícios almejados pela implantação dos sistemas ITS serão alcançados com o desenvolvimento de aplicações que saibam aproveitar as informações geradas pelos veículos e transformá-las em conhecimento útil para transformar o ambiente de trânsito. Segundo Singh e Agrawal [19] e o Departamento de Trânsito dos Estados Unidos [33], as aplicações ITS podem ser classificadas nas seguintes categorias:

- **Segurança do trânsito:** As aplicações de segurança do trânsito levam o motorista a ter uma maior consciência do trânsito ao seu redor, trazendo informações que possivelmente não estão no seu campo de percepção. Podem informar sobre as condições climáticas ou físicas de uma pista e avisar se houver algum canteiro de obras, acidente, ou outros obstáculos. Há aplicações com foco em evitar acidentes avisando ao motorista se houver outro carro em rota de colisão, se não for seguro para ultrapassar ou se cruzar um sinal vermelho. Outras aplicações auxiliam em cenários pós-acidente, chamando automaticamente o resgate e alertando os outros

motoristas. As aplicações de segurança do trânsito impõem requisitos rigorosos na rede, pois são mais sensíveis a atrasos e perdas de mensagens [34].

- **Eficiência do trânsito:** Os veículos fornecem continuamente informações sobre o seu estado em tempo real; essas informações são coletadas e utilizadas em sistemas desenvolvidos para o gerenciamento do tráfego. Em retorno, esses sistemas podem fornecer rotas alternativas para aliviar congestionamentos, podem adaptar o comportamento dos semáforos, automatizar pedágios e dar mais eficiência para os sistemas de transporte público e de cargas e veículos de emergência. Outras aplicações podem auxiliar o comportamento dos motoristas para economizar combustível e produzir menos poluição, gerando assim menos impacto ambiental.
- **Conforto dos usuários:** Aplicações de conforto dos usuário abrangem entre outros: *streaming* de áudio e vídeo, *e-mail*, *feed* de notícias, mensagens instantâneas e aplicações de realidade aumentada para enriquecimento da experiência no trânsito. As aplicações que proveem mais conforto aos usuários são importantes para atrair o interesse do mercado, por isso, é necessário desenvolver tecnologias que garantam uma conexão constante e de qualidade com a Internet [21].

Estes são exemplos de algumas das aplicações mais comuns que estão em desenvolvimento para o ambiente de redes veiculares. Na próxima seção, discutiremos sobre os mecanismos que realizam a troca de mensagens entre os nós integrantes da VANET e possibilitam o funcionamento das aplicações.

2.4 Difusão de Mensagens

As diferentes aplicações ITS, conforme a finalidade desempenhada, exigem métodos distintos de troca de mensagens entre os dispositivos participantes da rede. Podem haver envios de mensagem destinados a dispositivos específicos, ou então destinados a cobrir uma área geográfica. Mas a princípio, precisamos compreender que cada transmissão de informações realizada por um dispositivo cobre uma área limitada, designada como **alcance de transmissão**. Fora dessa área, a potência do sinal transmitido é insuficiente para ser compreendido por outros dispositivos (maiores detalhes na Seção 2.5.2). Por essa razão, quando o destino da mensagem está dentro do alcance de transmissão, ela é enviada diretamente para o receptor, mas quando está fora, ela deve ser repassada por outros nós até que chegue ao destino.

Em aplicações que utilizam comunicações ponto-a-ponto entre um veículo e um servidor ou entre dois veículos (por exemplo: aplicações de acesso a conteúdo multimídia,

de mensagens instantâneas ou de informações de trânsito), o nó que envia a mensagem deve conhecer previamente o outro nó para o qual a mensagem é destinada, e esse destino pode estar em qualquer posição da rede. Para realizar o envio, utiliza-se o mecanismo de roteamento, onde é escolhido um conjunto de nós da rede que repassarão as mensagens entre si, formando uma rota que liga a origem ao destino [27] [35] [20].

Em outras aplicações (aplicações de segurança do trânsito, por exemplo), a mensagem é disseminada entre todos os nós que estão próximos da origem ou localizados dentro de uma área delimitada, sem que seja necessário conhecer previamente quem ou quantos são esses nós. A essa distribuição de mensagens damos o nome de **difusão** (do Inglês, *broadcast*) e quando é realizada dentro de uma área geográfica e limitada por ela, damos o nome de difusão geográfica (do Inglês, *geocast*) [35] [18]. Vamos entender mais a fundo o funcionamento do *geocast*, que é o foco deste trabalho.

2.4.1 Geocast

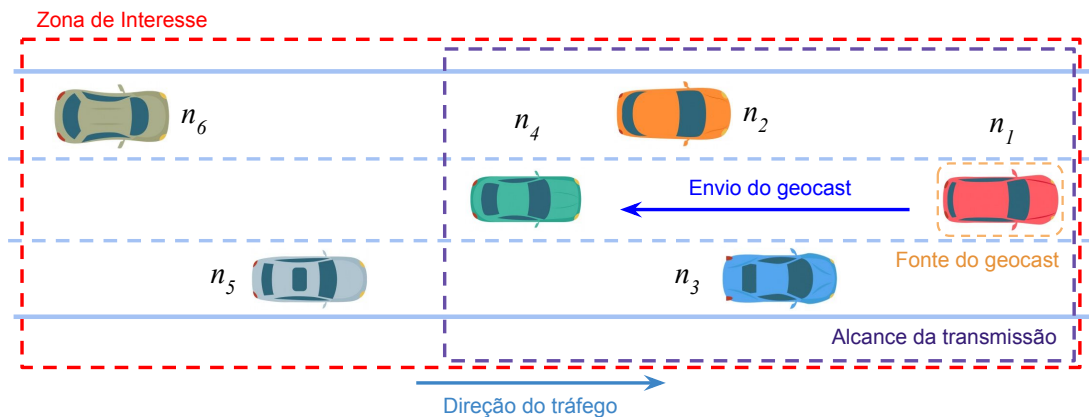


Figura 2.5: Protocolo de *geocast*.

Uma aplicação que visa evitar acidentes no ambiente de trânsito, por exemplo, deve enviar mensagens sobre eventos ocorridos no trânsito para os veículos que possam ser afetados por eles (normalmente os veículos fisicamente mais próximos) e essas mensagens devem ser entregues o mais rápido possível. Para isso, é feita a difusão da mensagem dentro de uma área geográfica, a qual chamamos de **Zona de Interesse** - ZdI [36], estabelecida pelo nó que originou a mensagem, como mostra a Figura 2.5. Os veículos podem estar no alcance de transmissão do nó de origem ou fora dele, a várias transmissões de distância. Por isso, se faz necessário um mecanismo que faça o encaminhamento da mensagem até que se cubra toda a ZdI, classificado como protocolo de *geocast*.

No exemplo da Figura 2.5, ao gerar o *geocast*, o nó n_1 envia para os seus vizinhos a mensagem com os dados da aplicação e um campo informando a área geográfica ZdI por

onde essa mensagem deve ser difundida. Quando outro nó recebe a mensagem, ele verifica se está dentro da ZDI e repassa a mensagem para os seus vizinhos. Se a mensagem chegar a um nó que está fora da ZDI, esse nó ignora a mensagem. Nos casos em que o nó de origem do *geocast* não está localizado dentro da ZDI é necessário realizar o roteamento para que a mensagem chegue até a área desejada e então seja difundida [18].

Protocolos de *geocast* projetados para VANET devem observar as seguintes características [36] [18]:

- A topologia da rede VANET é altamente dinâmica, por isso o protocolo deve se adaptar às mudanças no trânsito sem gerar carga excessiva com a troca de mensagens de controle (mensagens enviadas para coordenar a comunicação entre os nós, não necessariamente transportando informações da aplicação).
- Algumas aplicações, como as de segurança do trânsito, são sensíveis a atrasos e exigem o menor tempo de entrega possível.
- O trânsito possui padrões de movimentação característicos. Os eventos ocorridos na pista são de interesse dos veículos que estão se aproximando, não daqueles que já passaram pelo evento. Por isso, normalmente, a mensagem não precisa ser propagada em todas as direções. Em cruzamentos, pode ser necessário expandir a difusão para as diferentes vias.
- Os veículos fornecem informações que podem auxiliar a difusão, como: localização, velocidade, direção, rotas e mapas.
- Em cenários com baixa concentração de veículos, podem haver pontos de desconexão que interrompem a difusão.

O protocolo mais comum de difusão de mensagens *geocast* é o Inundação (do Inglês, *flooding*) [37] [35]. Nesse protocolo, cada nó que recebe uma mensagem pela primeira vez repassa-a para os próximos nós. O protocolo Inundação é bastante simples, pois não necessita que os nós tenham qualquer informação sobre a topologia. Mas, apesar disto, ele gera uma carga excessiva de mensagens, pois todos os nós realizam a transmissão, cobrindo mais de uma vez a mesma área, o que pode levar ao congestionamento da rede, problema conhecido como tempestade de difusão (do Inglês, *broadcast storm*) [18].

Em uma rede afetada pela tempestade de difusão, ocorrem muitas **colisões** entre as mensagens. Uma colisão se dá quando mais de um nó transmite ao mesmo tempo, em um mesmo canal e em lugares próximos; assim, as transmissões causam interferência mútua, fazendo com que as mensagens se percam [34]. O congestionamento da rede também aumenta o tempo de espera entre os nós devido à ocupação do canal, prejudicando o desempenho das aplicações.

Para se evitar o problema da tempestade de difusão, o protocolo de *geocast* deve limitar o número de nós responsáveis pelo repasse das mensagens, utilizando um **mecanismo de escolha de encaminhadores** (ou transmissores). Esse mecanismo identifica aqueles nós que são mais adequados para o envio das mensagens, levando em conta características que garantam que o nó não irá se desconectar da rede e cobrirá um número maior de veículos, seja por sua localização, pela distância entre os nós, pela cobertura dos vizinhos, pela qualidade do sinal, por acompanhar a velocidade média dos veículos, pelo padrão de movimentação e etc.

O processo de escolha dos transmissores pode se dar de várias formas. Podemos citar: através do envio periódico de *beacons* entre os veículos para que cada nó conheça os seus vizinhos e possa determinar os encaminhadores, ou através de mecanismos de contenção, onde um nó realiza uma transmissão e todos os vizinhos que a recebem calculam um tempo de espera sem transmitir a mensagem; o nó, no qual o tempo de contenção acabar primeiro, retransmite a mensagem.

A escolha do nós encaminhadores pode ser realizada antecipadamente, ou no momento em que o veículo deseja difundir uma mensagem. Dependendo da abordagem utilizada, podemos classificar os protocolos de *geocast* em proativos e reativos.

Protocolos Proativos

Protocolos proativos realizam a escolha dos nós encaminhadores antes da necessidade de enviar a mensagem [8] [18], através da comunicação e coordenação entre os nós. Como benefício, a abordagem proativa simplifica e agiliza a difusão das mensagens, uma vez que a estrutura de nós encaminhadores já está definida. Em contrapartida, é necessário garantir constantemente que os nós escolhidos continuem conectados e, em caso de desconexão, deve-se determinar novos nós encaminhadores, o que requer a troca de mensagens de controle entre os veículos e pode aumentar a carga na rede. Além disso, os nós encaminhadores podem ficar sobrecarregados por serem responsáveis por todas as transmissões e, por isso, podem perder pacotes [27].

Protocolos Reativos

Protocolos reativos respondem sob demanda, ou seja, determinam os nós transmissores somente no momento do envio de uma mensagem [8] [18]. Não há a construção e a manutenção de uma estrutura de encaminhadores, por isso, não há a necessidade do compartilhamento de mensagens de controle, o que diminui a carga na rede. Por outro lado, o processo de escolha de encaminhadores realizado a cada salto pode adicionar mais atraso ao processo de difusão. O mecanismo reativo, ao utilizar contenção, não evita que várias carros possam transmitir ao mesmo tempo, pois o tempo de contenção

é calculado independentemente por cada veículo, podendo ocasionalmente ser o mesmo e causar colisões e transmissões desnecessárias.

Como foi dito, os mecanismos de difusão de mensagens são essenciais para a eficiência das aplicações desenvolvidas para o ambiente veicular, pois, se a troca de informações não for coordenada, o envio de mensagens em grande escala pode se tornar uma tarefa impossível. Os métodos utilizados para a validação dos mecanismos de difusão desenvolvidos serão discutidos na seção seguinte.

2.5 Simulação de VANET

Durante o desenvolvimento de uma nova tecnologia, antes de sua implantação, essa deve passar por testes que verifiquem sua eficácia e evitem um fracasso na vida real. E a preocupação é maior no caso das redes veiculares, que envolvem a segurança física dos usuários. O Governo dos Estados Unidos tem investido mais de 45 milhões de dólares em um projeto de implantação de tecnologias ITS em cenários reais para realizar testes e avaliações de desempenho [38]. Mais de 10.000 veículos foram equipados para se comunicarem, além de mais de 500 RSUs e pedestres conectados. O projeto iniciou em 2015 e tem previsão para concluir em 2021. Com base nesses dados, podemos observar que a avaliação de redes veiculares com testes reais que traga resultados consistentes requer um grande número de veículos, com os equipamentos instalados, e o trabalho intenso de várias pessoas, o que pode ser de alto custo financeiro e temporal. O ambiente real também adiciona complexidade à análise, pois acrescenta outros fatores, como: clima, obstáculos físicos, interferência de outros dispositivos e erros humanos e de equipamentos. Apesar de serem importantes para a validação da tecnologia, os testes reais não são convenientes para a fase de pesquisa e desenvolvimento inicial [39].

2.5.1 Ferramentas de Simulação

Para auxiliar o processo de pesquisa, foram criadas ferramentas de simulação computacional capazes de recriar cenários complexos que se aproximam do real e fornecem resultados precisos, em pouco tempo e com baixo custo. A princípio, para a simulação de VANETs, era necessário um simulador de mobilidade, que criava a movimentação de veículos seguindo modelos de trânsitos reais e gerava arquivos com as trilhas de movimentação. Esses arquivos eram então carregados em um simulador de rede que simulava a comunicação entre os veículos gerados, implementando os protocolos necessários para o funcionamento da VANET. Hoje, existem os simuladores integrados, que acoplam um simulador de rede

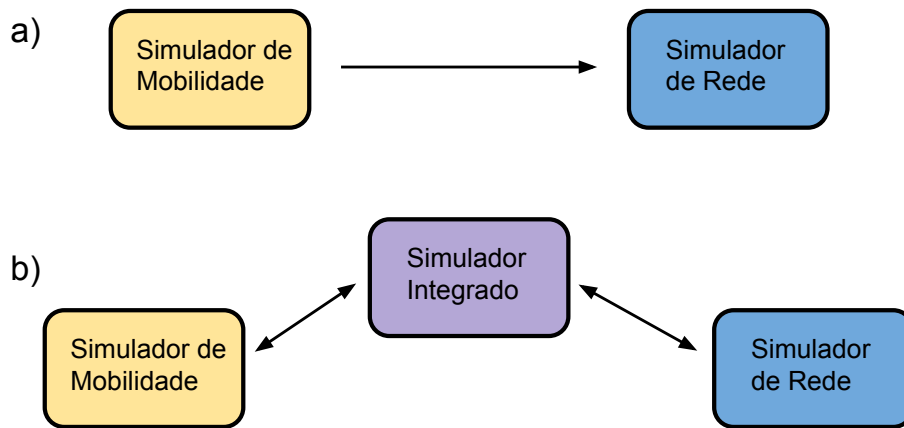


Figura 2.6: Estrutura dos simuladores de VANET. a) O simulador de mobilidade fornece as trilhas de movimentação pré-calculadas para o simulador de rede. b) O simulador integrado realiza a comunicação bidirecional entre os simuladores em tempo de execução.

juntamente com um simulador de mobilidade e possibilitam a interação entre as duas simulações em tempo de execução, como mostra a Figura 2.6 [36].

Spaho *et al.* [36] e Mussa *et al.* [39] realizaram avaliações entre as ferramentas de simulação disponíveis. Foi constatado que os simuladores integrados são mais favoráveis à simulação de VANET, pois possibilitam que as aplicações implementadas na rede veicular alterem o comportamento dos veículos e do trânsito em tempo de execução. No mundo real, um motorista mudaria o seu comportamento ao receber um alerta de congestionamento, de velocidade excedida, ou risco de colisão. Seguindo esta visão, os simuladores integrados permitem avaliar com mais fidelidade o impacto real de uma aplicação ITS no sistema de trânsito.

Para realizarmos a escolha das ferramentas de simulação que melhor se adequam à finalidade deste trabalho, priorizamos os seguintes aspectos [36]:

- Oferecer pouca ou nenhuma limitação com relação às possibilidades de implementação das aplicações.
- Ter licença aberta, ao menos para o uso acadêmico.
- Ter boa e vasta documentação que auxilie no processo de desenvolvimento.
- Receber suporte constante e atualizações.

As ferramentas mais presentes na literatura serão apresentadas a seguir.

Simuladores de Mobilidade

A simulação de ambientes veiculares segue modelos matemáticos que descrevem o comportamento de cada veículo no trânsito, tentando se aproximar o máximo possível do comportamento de motoristas reais. Segundo [40], a simulação pode ser macroscópica, reproduzindo características e impactos gerais do trânsito, como: densidade, fluxo ou poluição, mas sem simular cada veículo separadamente. Ou a simulação pode ser microscópica, quando simula a dinâmica de cada veículo isoladamente: sua movimentação, velocidade e comportamento. Sabendo disto, consideramos que a simulação de aplicações em VANET deve ser microscópica, pois necessita da informação individual de cada veículo.

Os primeiros modelos criados para a simulação geravam nós com velocidades e direções aleatórias em um mapa vazio, o que claramente não retratava o comportamento real do trânsito. Depois, os modelos foram evoluindo, fazendo com que os nós seguissem trilhas baseadas em mapas reais. As trilhas foram adaptadas para suportarem várias faixas com sentidos contrários e foram incluídos cruzamentos onde os veículos param e esperam sua vez de atravessar. Os modelos mais atuais simulam componentes complexos, como: semáforos de cruzamentos, veículos mudando de faixa, bicicletas e pedestres [36] [40]. Abaixo estão listados algumas ferramentas utilizadas para simulação de mobilidade de trânsito.

- **Paramics:** Paramics [41] foi desenvolvido pela empresa *Quadstone* para a simulação microscópica de trânsito. Ele possibilita uma simulação robusta, em duas ou três dimensões, de malhas de trânsito que incluem semáforos, transporte público, pedestres, entre outros elementos mais complexos. Realiza processamento paralelo, o que torna a simulação mais rápida. Apesar disto, não possui licença aberta.
- **TRANSIMS:** Desenvolvido em licença aberta, o TRANSIMS [42] fornece um ambiente simples de simulação veicular capaz de exportar vias de mapas reais. O usuário pode modelar características demográficas da população para controlar a quantidade de tráfego gerado. Apesar de estar sendo suportada atualmente, a ferramenta carece de documentação.
- **VISSIM:** A ferramenta VISSIM [43] foi desenvolvida pela empresa *PTV Group* para simulação de trânsito. Ela também suporta simulações em duas ou três dimensões. Um dos diferenciais é a simulação mesoscópica que combina os paradigmas macroscópico e microscópico. Nela, os veículos só são simulados individualmente em eventos específicos, o que torna a simulação mais rápida. VISSIM é distribuído com licença comercial.

- **SUMO:** SUMO [40] foi desenvolvido pelo Instituto de Sistemas de Transportes da Alemanha em 2001 de forma gratuita e aberta para auxiliar no planejamento de trânsito e otimização de vias. Ele foi escrito em C++ e possui uma execução simples e rápida, permitindo importar vias e outros elementos, como edifícios, de mapas reais. O SUMO gera trilhas de movimentação para agilizar simulações onde o cenário é fixo, mas também permite que sejam feitas alterações no comportamento do trânsito em tempo de simulação. A ferramenta recebe atualizações constantes e possui uma vasta documentação.

Simuladores de Rede

Simuladores de rede são ferramentas de simulação de eventos discretos que coordenam a interação entre módulos em um ambiente virtual e representam os efeitos dessas interações no tempo real. No ambiente de redes veiculares, o simulador deve atribuir um módulo de conexão de rede para cada dispositivo presente na simulação. Esse módulo implementa e executa os protocolos de comunicação das diferentes camadas como em um dispositivo real. A movimentação dos nós é fornecida por um simulador de mobilidade e agregada à simulação. Algumas ferramentas de simulação de redes estão listadas abaixo:

- **NS-2:** Ferramenta largamente utilizada no ambiente de pesquisa e ensino acadêmico e desenvolvida com código aberto e livre. O NS-2 [44] foi escrito em linguagem C++ e suas simulações são descritas com *scripts* TCL. Em cenários de simulação com muitos nós o processamento pode ser lento e consumir muitos recursos de memória [39]. A ferramenta não recebe mais atualizações desde 2011.
- **NS-3:** NS-3 [45] foi desenvolvido como uma evolução do NS-2 e está em constante desenvolvimento. Possui um gerenciamento melhor de memória e tem desempenho melhor para grandes simulações [39]. Possui também uma documentação ampla.
- **OMNeT++:** OMNeT++ [46] é um simulador de eventos discretos de propósito geral, mas que é amplamente utilizado para a simulação de redes de comunicação. Ele foi projetado em linguagem C++ e é de licença livre e código aberto. Sua arquitetura é hierárquica e modular permitindo a junção de componentes desenvolvidos separadamente. Essa característica torna fácil a implementação de novos protocolos. O OMNeT++ tem um consumo menor de memória e processamento comparado com as outras ferramentas [39]. Sua documentação é bastante ampla.

Simuladores Integrados

Os simuladores integrados realizam a ligação entre o simulador de mobilidade e o simulador de rede. Essa ligação pode ser feita através da troca de mensagens entre as

ferramentas de simulação ou através da implementação híbrida das duas funcionalidades em um mesmo *software* [36]. Uma das principais características que devem ser exploradas em um simulador integrado é permitir que as duas simulações se influenciem mutuamente em tempo de execução, refletindo com mais fidelidade o cenário real [39]. Abaixo estão listadas algumas das ferramentas de simulação integrada mais comuns na literatura:

- **GrooveNet:** Foi desenvolvido pela Universidade *Carnegie Mellon* [47] em linguagem C++. Realiza simulação híbrida de VANET, ou seja, a própria ferramenta simula a mobilidade dos nós e o funcionamento da rede sem a necessidade de outros *softwares*, mas, apesar disto, os eventos ocorridos na rede de comunicação não podem interferir no comportamento dos nós. O GrooveNet apresenta bom desempenho em simulações de larga escala, possui interface gráfica robusta e arquitetura modular, o que facilita o processo de desenvolvimento de novos protocolos. Desde 2013 o GrooveNet não recebe mais atualizações.
- **TraNS:** O simulador TraNS [48] foi projetado como uma ferramenta de ligação entre os simuladores SUMO e NS-2, permitindo simulações interativas entre os dois simuladores utilizando o protocolo TraCI. O *software* foi escrito em linguagem Java e C++ e possui licença aberta, mas não recebe mais suporte.
- **Veins:** O Veins [49] é um *framework* robusto e altamente escalável projetado para a simulação de redes VANET. Integra os simuladores SUMO e OMNeT++ através do protocolo TraCI, e, assim como o TraNS, possibilita a interatividade entre as aplicações de comunicação e a mobilidade dos veículos. Está em constante desenvolvimento e possui código aberto. O Veins se destaca por simular a interferência nas transmissões ocasionada por edifícios e pelos próprios veículos. Permite também a implementação de modelos de propagação que calculam o desvanecimento do sinal.

Ferramentas Escolhidas

Como ferramenta de simulação para este trabalho, foi escolhido o *framework* Veins [49], o *software* de simulação de VANET que realiza a ligação entre os simuladores de rede OMNeT++ [46] e de mobilidade SUMO [40]. O Veins foi escolhido por ser um *software* livre, de código aberto, com ampla documentação e em desenvolvimento contínuo. Entre a comunidade acadêmica é o mais utilizado e citado em publicações [39]. O SUMO é um simulador de mobilidade veicular microscópica, ou seja, simula a movimentação de cada veículo em particular. Ele permite importar estruturas reais de tráfego de bancos de dados de mapas¹ ou criá-las manualmente, as quais podem incluir: vias de sentido único

¹OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/>

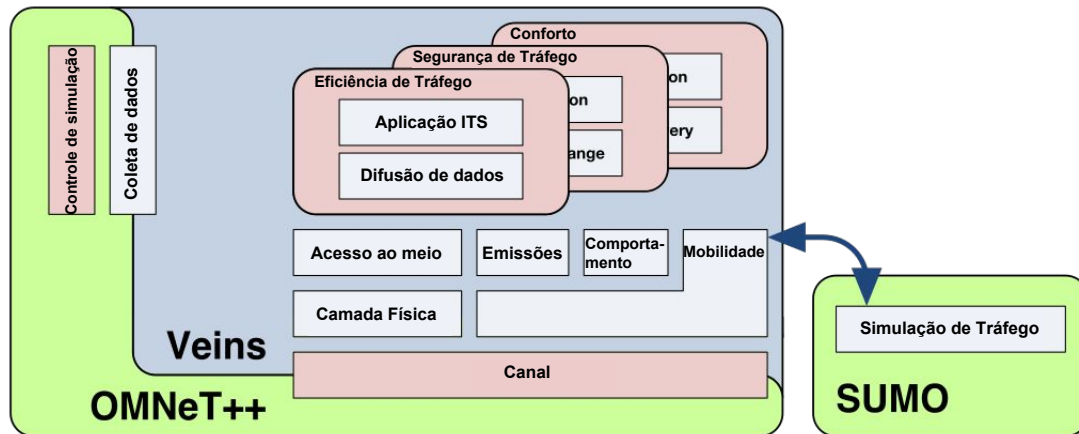


Figura 2.7: Comunicação entre as ferramentas OMNeT++, Veins e SUMO (Adaptado de [4]).

ou duplo, com várias faixas, semáforos em cruzamentos, edifícios e obstáculos. Também é possível simular diferentes comportamentos para os motoristas, além de permitir qualquer tipo de veículo, ou mesmo pedestres. O OMNeT++ é um simulador de eventos discretos modular, baseado em componentes e utilizado, entre outras finalidades, para a simulação de comunicação de dispositivos em rede. Ele gerencia o meio de comunicação, o envio de mensagens, a propagação e decaimento do sinal e a comunicação entre as camadas de protocolos. O Veins implementa os protocolos da arquitetura WAVE, IEEE 802.11 e DSRC através de um módulo agregado ao OMNeT++. A arquitetura de comunicação entre as ferramentas está ilustrada na Figura 2.7.

Para realizar a comunicação entre os simuladores de rede e de mobilidade, o Veins utiliza o protocolo Interface de Controle de Tráfego (do Inglês, *Traffic Control Interface - TraCI*) [50]. O TraCI estabelece uma comunicação TCP entre os simuladores, por onde o SUMO fornece informação de posição, inserção, remoção e outras características físicas dos nós, e o OMNeT++ pode realizar ações no cenário de trânsito, como: mudar velocidade e rota dos veículos, controlar semáforos, entre outros. O Veins implementa módulos para o cálculo da interferência causada por objetos presentes no cenário de simulação, os quais incluem edifícios e veículos, e módulos para o cálculo da propagação do sinal, que será descrito na próxima seção.

2.5.2 Cálculo de Propagação

As redes de comunicação com ou sem fio possuem o mesmo objetivo: trocar informações entre os dispositivos conectados. A diferença está no fato de que nas redes com fio os bits de informação são enviados através de um meio físico composto de material sólido, como os fios de cobre, cabos coaxiais e fibras ópticas. Esse meio é chamado guiado, pois leva os

bits do transmissor diretamente para o receptor através de um caminho exclusivo. Já nas redes sem fio, os bits são enviados por ondas de rádio através do espaço aberto. Esse meio é compartilhado entre todos os transmissores e é chamado não guiado, ou seja, as ondas se propagam em todas as direções e não há garantias de que a informação enviada chegará ao destino [27]. O meio físico de transmissão sem fio possui algumas características que prejudicam a propagação dos dados, essas características serão descritas com base nas referências [27] e [51].

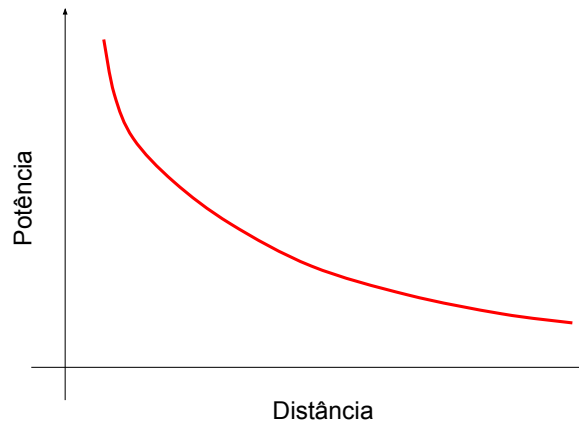


Figura 2.8: Relação entre potência e distância do sinal propagado.

A primeira característica é chamada **perda de caminho**, pois as ondas eletromagnéticas, quando percorrerem o espaço de propagação, sofrem um desvanecimento na potência do sinal proporcional à distância percorrida, como representado na Figura 2.8. Em outras palavras, quanto mais distante está o receptor do transmissor, mais fraco será o sinal recebido. E a perda é ainda mais acentuada quando o sinal atravessa objetos físicos, como construções, veículos ou árvores.



Figura 2.9: Interferência entre transmissões simultâneas que gera colisão de mensagens.

Outra característica importante é que, em razão do meio ser compartilhado, o sinal propagado sofrerá interferência se outras transmissões forem realizadas simultaneamente na mesma frequência. Quando ocorre uma interferência, a mensagem não pode ser com-

preendida pelos receptores, então dizemos que houve uma **colisão** entre mensagens, como está ilustrado na Figura 2.9.

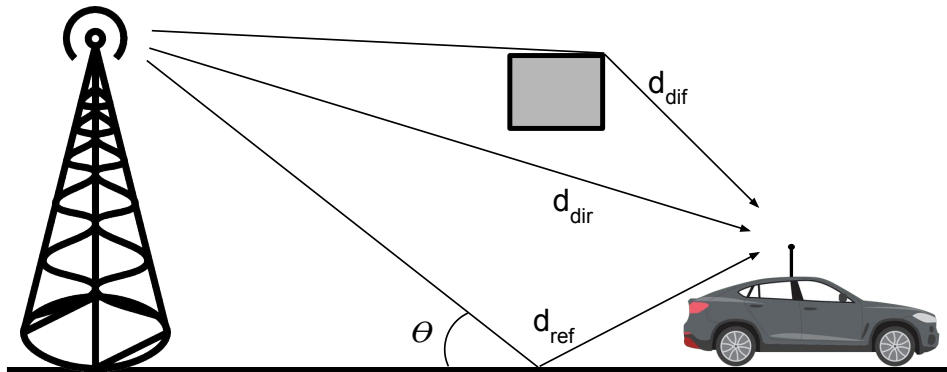


Figura 2.10: Diferentes trajetórias que o sinal pode percorrer entre o transmissor e o receptor. d_{dif} é a distância percorrida pelo sinal difratado. d_{dir} é a distância percorrida pelo sinal propagado diretamente ao receptor. d_{ref} é a distância percorrida pelo sinal refletido.

Quando o sinal é propagado no meio, ele pode percorrer diferentes caminhos até o receptor. Como podemos observar na Figura 2.10, o sinal pode chegar diretamente ao receptor, se não houverem obstáculos no caminho, ele pode ser refletido em objetos e no solo, ou pode também ser desviado por difração. O sinal resultante percebido pelo receptor é a soma de todos os sinais que se propagaram por caminhos diferentes. No entanto, por percorrerem distâncias diferentes, os sinais poderão ou não estar defasados em relação ao sinal original, provocando interferências construtivas ou destrutivas. Essa característica é chamada de **propagação multicaminho**.

Modelos de Propagação

Para se analisar a propagação do sinal no ambiente veicular, são construídos modelos matemáticos que calculam a perda da potência de transmissão pela distância percorrida, levando em consideração as diversas características citadas acima. Esses modelos são importantes para as simulações de VANET, pois ajudam a estimar o alcance de transmissão de cada dispositivo e o seu impacto na conectividade dos nós da rede. Ajudam também a calcular as colisões e interferências sofridas pelas mensagens [51].

O modelo clássico de propagação de sinal utilizado em grande parte dos simuladores é o modelo de Espaço Livre (do Inglês, *Free-Space Model* - FS) [51]. Ele calcula, de forma simples, a perda de potência sofrida pelo caminho através da equação

$$L_{FS}[dB] = 20 \log_{10} \left(4\pi \frac{d}{\lambda} \right), \quad (2.1)$$

onde d é a distância euclidiana entre o transmissor e o receptor e λ é o comprimento de onda.

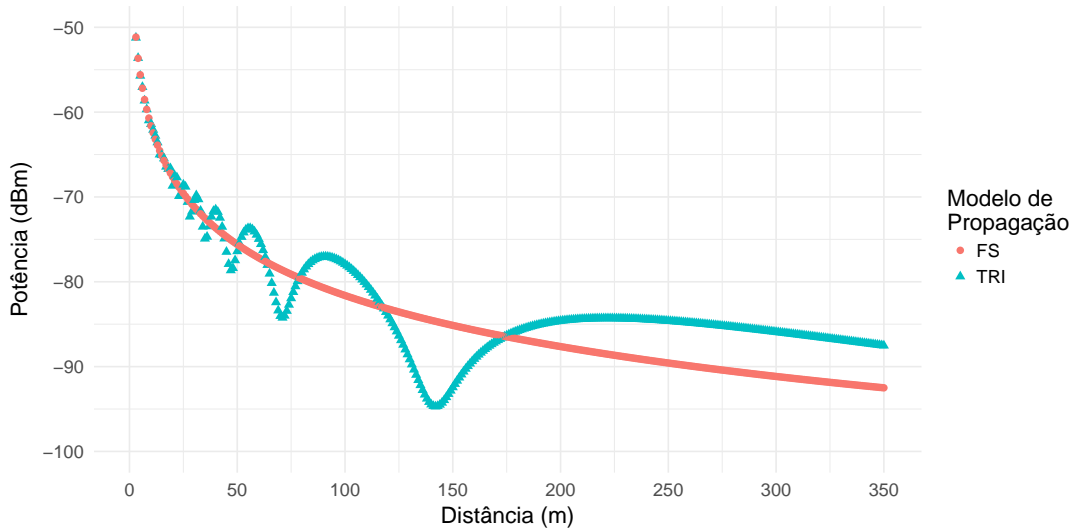


Figura 2.11: Comparação entre o modelo de Espaço Livre e o modelo de Interferência de Dois Raios.

Entretanto, o modelo FS não leva em consideração a interferência gerada pelas propagações de multicaminho, presentes principalmente na reflexão das ondas no solo. Sommer *et al.* [51] demonstraram que o modelo FS não é suficiente para descrever o comportamento da propagação de ondas em redes VANET, o que é reforçado pelos trabalhos de Karedal *et al.* [52] e Kunisch e Pamp [53]. Eles realizaram um experimento real com dois veículos que trocavam mensagens em distâncias variadas e chegaram à conclusão de que o modelo que mais se ajusta aos resultados empíricos é o modelo de Interferência de Dois Raios (do Inglês, *Two-Ray Interference Model* - TRI), expresso pela equação

$$L_{TRI}[dB] = 20 \log_{10} \left(4\pi \frac{d}{\lambda} \left| 1 + \Gamma_{\perp} e^{i\phi} \right|^{-1} \right), \quad (2.2)$$

onde Γ_{\perp} é o coeficiente de reflexão que determina a atenuação sofrida pelo sinal ao refletir no solo, a contante “ e ” se chama número de Euler e equivale a aproximadamente 2,718 e ϕ é a diferença de fase entre o sinal transmitido diretamente e o sinal refletido. Calculamos Γ_{\perp} como

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\sin \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}{\sin \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \theta_i}}, \quad (2.3)$$

onde θ é o ângulo de reflexão no solo e ϵ_r é a constante dielétrica do ar. Calculamos ϕ como

$$\phi = 2\pi \frac{d_{dir} - d_{ref}}{\lambda}, \quad (2.4)$$

onde temos d_{dir} como a distância percorrida pelo sinal transmitido diretamente para o receptor e d_{ref} como a distância percorrida pelo sinal refletido no solo. Os valores de d_{dir} , d_{ref} , $\sin \theta_i$ e $\cos \theta_i$ são calculados nas equações

$$d_{dir} = \sqrt{d^2 + (h_t - h_r)^2}, \quad d_{ref} = \sqrt{d^2 + (h_t + h_r)^2}, \quad (2.5)$$

$$\sin \theta_i = (h_t + h_r)/d_{ref}, \quad \cos \theta_i = d/d_{ref}, \quad (2.6)$$

onde utilizamos a altura da antena do transmissor h_t e a do receptor h_r . Na Figura 2.11, os modelos FS e TRI são comparados. Como podemos observar, no modelo TRI a onda refletida no solo gera interferência na onda transmitida diretamente, que pode ser construtiva ou destrutiva dependendo da distância entre as antenas. O modelo TRI é utilizado pelo *framework* Veins para realizar o cálculo de propagação e interferência das transmissões nas simulações de VANET.

Neste capítulo, fornecemos a base teórica necessária para se compreender o funcionamento da tecnologia de redes veiculares intitulada VANET, seus padrões, protocolos e aplicações. Em seguida, discutimos como é realizada a difusão de mensagens entre os dispositivos participantes da rede e as ferramentas de simulação utilizadas para os testes de eficiência dos protocolos desenvolvidos. No próximo capítulo, traremos trabalhos desenvolvidos pela comunidade acadêmica que tratam dos assuntos expostos.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Na literatura, encontra-se uma ampla gama de trabalhos que realizam a tarefa de difusão *geocast* de mensagens em redes VANET utilizando diferentes abordagens. Neste capítulo, apresentaremos alguns desses trabalhos e as abordagens que foram utilizadas, e discutiremos quais métodos devem ser adotados para trazer mais eficiência na difusão *geocast*. Ao selecionar os trabalhos, os separamos pelo tipo de abordagem utilizada, como mostra a Figura 3.1, seguindo a definição apresentada na Seção 2.4. Os trabalhos IVG [5], DRG [16] e Reativo auxiliado por *beacons* [54] utilizam a abordagem reativa, enquanto os trabalhos ROVER [6], Mobicast [7] e DBA-MAC [8] utilizam a abordagem proativa.

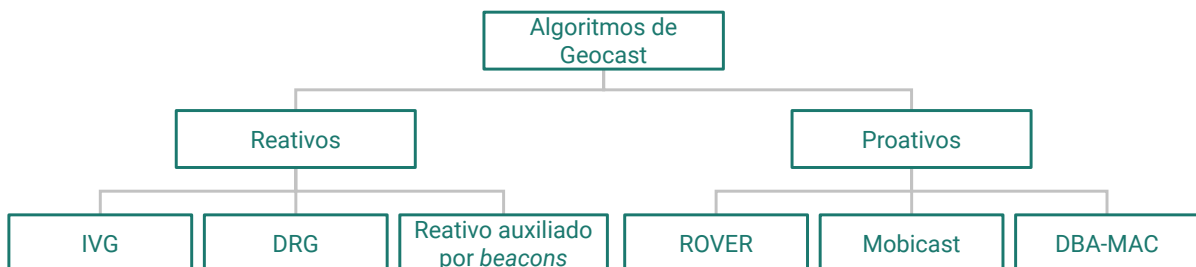


Figura 3.1: Divisão dos trabalhos selecionados em reativos e proativos.

3.1 Reativos

Os seguintes trabalhos são classificados como reativos, pois fazem a escolha dos nós transmissores no momento em que a mensagem é enviada, sem a necessidade de coordenação entre os nós. Como exemplos mais básicos de protocolos reativos podemos citar o Inundação [37] [35] e o Protocolo Reativo Baseado em Distância (do Inglês, *Distance-based Reactive Protocol - DR*) [55] [8], que são frequentemente encontrados na literatura. O protocolo Inundação, como foi explicado na Seção 2.4.1, realiza a difusão das mensagens

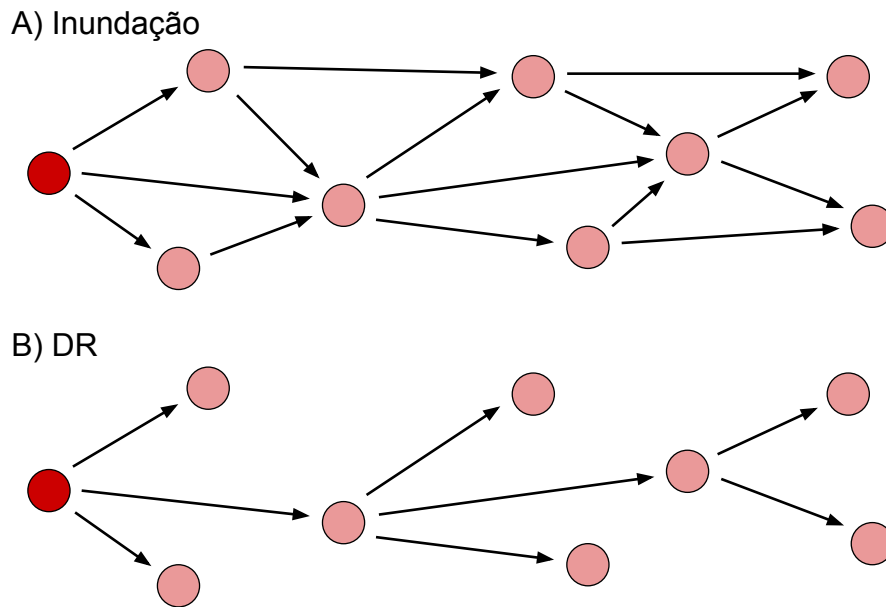


Figura 3.2: Exemplo de difusão de mensagens nos protocolos A)Inundação e B)DR.

geocast de forma indiscriminada, pois cada vizinho retransmite a mensagem depois que a recebe pela primeira vez, como podemos ver na Figura 3.2.

O protocolo DR seleciona os vizinhos encaminhadores a partir da distância do salto, utilizando um mecanismo de contenção que prioriza os veículos mais distantes. Quando o tempo de contenção acaba, o veículo realiza a transmissão da mensagem, se ainda não tiver ouvido a transmissão de outro veículo. Dessa forma, a quantidade de transmissões é reduzida, como demonstra a Figura 3.2. Estas duas abordagens são utilizadas pela maioria dos trabalhos que serão apresentados como forma de comparação de desempenho e, por isso, também serão utilizadas neste trabalho, como será descrito no próximo capítulo.

A. IVG

Bachir e Benslimane [5] propuseram o protocolo de disseminação de mensagens de alerta para rodovias chamado *Geocast* Entre Veículos (do Inglês, *Inter-Vehicle Geocast* - IVG). Quando ocorre um acidente, o IVG envia uma mensagem para todos os nós que estiverem atrás do local do evento nas duas direções de movimento da via até uma distância limite, como mostra a Figura 3.3, formando assim um grupo *multicast* (*multicast* é o nome dado ao envio de uma mensagem para um grupo de dispositivos na rede). A cada salto, os encaminhadores são escolhidos de forma reativa: cada vizinho que recebeu a mensagem calcula um tempo de contenção para realizar o envio, mas não envia se ouvir a transmissão de outro nó antes da sua. O cálculo do tempo de contenção é baseado na distância entre

o nó fonte (s) e o nó receptor (x) de forma que favoreça os nós que estão mais distantes. O cálculo é realizado seguindo a equação

$$\text{contenção}(x) = CM \cdot \frac{R^\epsilon - D_{sx}^\epsilon}{R^\epsilon}, \quad (3.1)$$

onde CM é a contenção máxima que um nó pode esperar, definida pelos autores como 4 ms, R é o alcance de transmissão e D é a distância entre os nós s e r . A escolha do expoente $\epsilon = 2$ faz com que a diferença no tempo de contenção entre os vizinhos mais distantes seja maior, e assim, diminua as colisões. Os valores de contenção são distribuídos no intervalo $[0, \text{ContençãoMáxima}]$.

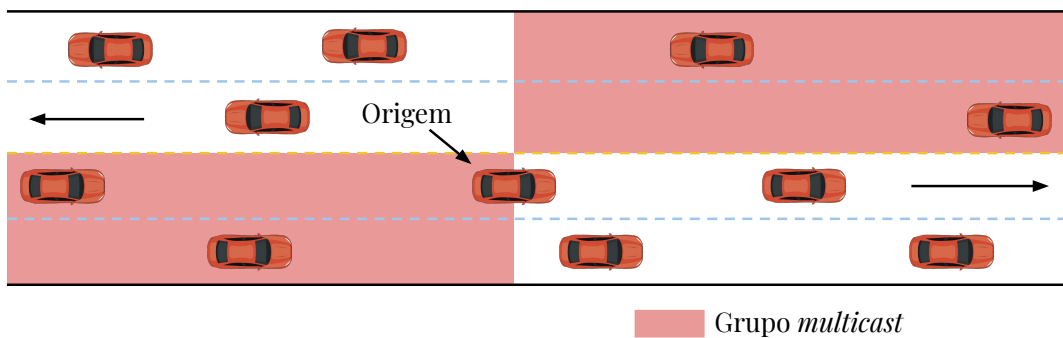


Figura 3.3: Área por onde a mensagem deve ser disseminada pelo protocolo IVG (Adaptado de [5]).

Para lidar com o problema de desconexão da rede, o IVG determina que o último nó a encaminhar a mensagem, se não encontrar outros encaminhadores, deve se tornar um retransmissor dinâmico, continuando a reenviá-la periodicamente até encontrar o próximo encaminhador. Dessa forma, a difusão continuará quando surgir novos nós e a sua cobertura será maior. Apesar disso, a forma como o retransmissor dinâmico mantém a difusão da mensagem (através de envios periódicos) aumenta a quantidade de retransmissões desnecessárias. Os autores não levaram em consideração que outros nós podem entrar na rodovia à frente do retransmissor dinâmico e não receberão a mensagem, ou o retransmissor dinâmico pode eventualmente sair da via e assim a difusão será interrompida.

O protocolo IVG foi comparado com o protocolo DDT [56] em simulações realizadas na ferramenta GloMoSim [57]. Uma rodovia de 10 km com 100 e 200 veículos foi utilizada como cenário de simulação. A avaliação foi feita com base na cobertura percentual que cada mecanismo alcançou, demonstrando que o IVG obteve o melhor desempenho, com 100% de cobertura em ambos os cenários. Nenhum outro parâmetro foi comparado.

B. DRG

O Algoritmo de *Geocast* Robusto Distribuído (do Inglês, *Distributed Robust Geocast* - DRG) [16], proposto por Joshi *et al.*, segue a mesma linha de raciocínio aplicada pelo IVG utilizando contenção baseada na distância entre os veículos, mas incorpora algumas melhorias. No DRG, o uso de retransmissores dinâmicos também é empregado para lidar com as desconexões da rede, entretanto, após uma quantidade de retransmissões sem resposta, o retransmissor passa a enviar a mensagem com um período maior, calculado pela equação

$$T = \frac{R_{tx}}{V_{max}}, \quad (3.2)$$

onde T é o período de intervalo entre os envios, R_{tx} é o alcance de transmissão do veículo e V_{max} é a velocidade máxima dos veículos na pista. O período calculado corresponde ao tempo em que um veículo levaria para percorrer o raio de transmissão até chegar ao veículo que originou a mensagem. Quanto maior o período, menor o número de retransmissões desnecessárias. Outra melhoria foi aplicada para evitar que os nós que entrem na ZdI fiquem desinformados sobre a mensagem difundida: cada nó dentro da ZdI retransmite a mensagem periodicamente se permanecer um período sem receber transmissões de outros vizinhos. Dessa forma, o algoritmo garante a persistência da mensagem ao longo do tempo. A adaptação do período do retransmissor dinâmico ajuda a diminuir o número de retransmissões desnecessárias, mas as transmissões geradas pelos outros veículos também podem ser desnecessárias se não houver novos nós na ZdI. Os autores não definiram como a informação da velocidade máxima V_{max} é conhecida pelo veículo nem por quanto tempo a mensagem deve ser retransmitida pelos nós.

A simulação do protocolo DRG foi realizada com a ferramenta JiST/SWANS [58] em dois cenários distintos: uma rodovia e uma malha de vias urbanas. Os autores realizaram uma comparação com o protocolo Inundação, avaliando a cobertura, o atraso de entrega e a carga gerada na rede. No parâmetro cobertura, ambos os mecanismos apresentaram resultado de 100% no cenário de rodovia, mas no cenário urbano somente o DRG obteve desempenho próximo de 100% enquanto o Inundação variou entre 45% e 95%. Observando o atraso de entrega no cenário de rodovia, o resultado foi semelhante para ambos, mas no cenário urbano o protocolo DRG apresentou um atraso quase 1000 vezes maior. O DRG gerou uma carga constante de mensagens no cenário de rodovia enquanto que as mensagens geradas pelo Inundação cresceram acompanhando a densidade, já no cenário urbano o número de mensagens do protocolo DRG foi 5 vezes pior que o Inundação. Em resumo, o protocolo DRG apresentou desempenho melhor que o protocolo Inundação somente para o número de transmissões no cenário de rodovia, enquanto que no cenário urbano ele alcançou uma melhor cobertura ao custo de atraso e número de transmissões

maiores.

C. Reativo auxiliado por *beacons*

Em [54], Dora *et al.* utilizaram a abordagem de envio periódico de *beacons* para que cada veículo conhecesse previamente a posição dos nós vizinhos e pudesse determinar o nó encaminhador no momento do envio da mensagem. Ao receber a mensagem, o nó que foi escolhido como encaminhador realiza a transmissão imediatamente, sem esperar qualquer tempo de contenção. A forma como o algoritmo lida com a fragmentação da rede, que gera desconexões, também utiliza os *beacons*: o último nó a transmitir a mensagem, se não encontra outro encaminhador, guarda a mensagem em *cache* até que receba a notificação de um novo vizinho que tenha entrado no seu alcance de transmissão, e então realiza o envio selecionando esse novo vizinho como encaminhador. Seguindo essa abordagem, o algoritmo pode diminuir o número de colisões e transmissões desnecessárias (ocasionadas quando mais de um veículo calcula o mesmo tempo de contenção) ao custo de aumentar a carga de mensagens geradas em virtude do envio dos *beacons*. Ele também pode diminuir o tempo de entrega das mensagens, pois não há uso de contenção na escolha dos encaminhadores.

A avaliação do protocolo proposto neste trabalho foi realizada com o uso da ferramenta NS-2 [44], construindo uma malha de vias de extensão variando entre 500 e 5000 m. Em suma, realizou-se uma comparação do próprio mecanismo com e sem o uso de *cache*, avaliando a taxa de entrega das mensagens, o atraso de entrega e a carga de mensagens gerada na rede. Os resultados encontrados mostraram que o uso de *cache* de mensagens em alguns momentos mais do que dobra a taxa de entrega dos pacotes, mas devido ao tempo em que os nós permanecem esperando pelo surgimento de novos vizinhos, o tempo total de entrega das mensagens pode ser até 10 vezes maior, o que mostra que a abordagem não é apropriada para aplicações sensíveis a atraso, que requerem o menor tempo de resposta possível, sendo mais adequada para aplicações de informação e entretenimento. Uma alternativa seria substituir o uso de cache utilizando os veículos que trafegam no sentido contrário da pista para realizar a difusão.

3.2 Proativos

Os trabalhos que serão apresentados a seguir são classificados como proativos pois realizam uma coordenação entre os nós da rede construindo previamente uma rota por onde as mensagens serão enviadas.

A. ROVER

Kihl *et al.* [6] propuseram o protocolo de Roteamento Veicular Robusto (do Inglês, *RObust VEhicular Routing* - ROVER) como uma tentativa de utilizar a abordagem proativa de criação de árvores de *multicast* para a distribuição de mensagens em uma área geográfica. O processo é ilustrado na Figura 3.4. Antes do envio da mensagem da aplicação, o nó fonte inunda a rede com a mensagem de requisição ZRREQ que é repassada por todos os nós dentro da zona de encaminhamento ZOF. Cada nó que receber a requisição, estiver dentro da zona de relevância ZOR (correspondente à ZDI) e em uma distância máxima do transmissor de 2/3 do alcance de transmissão responderá com a mensagem ZRREP. Os nós que recebem a ZRREP armazenam a identificação dos nós que a enviaram para construir a árvore de *multicast*. Após a construção da árvore, a mensagem é repassada pelos seus membros para todos os nós que estão dentro da ZOR. Passado algum tempo, a árvore de *multicast* não será mais válida para a disseminação da mensagem devido à movimentação dos veículos, pois eles podem se afastar e romper a conexão em algum ponto da árvore. Por isso, os autores estipularam que a árvore deve ser refeita após o nó de origem se locomover 25m da sua posição inicial.

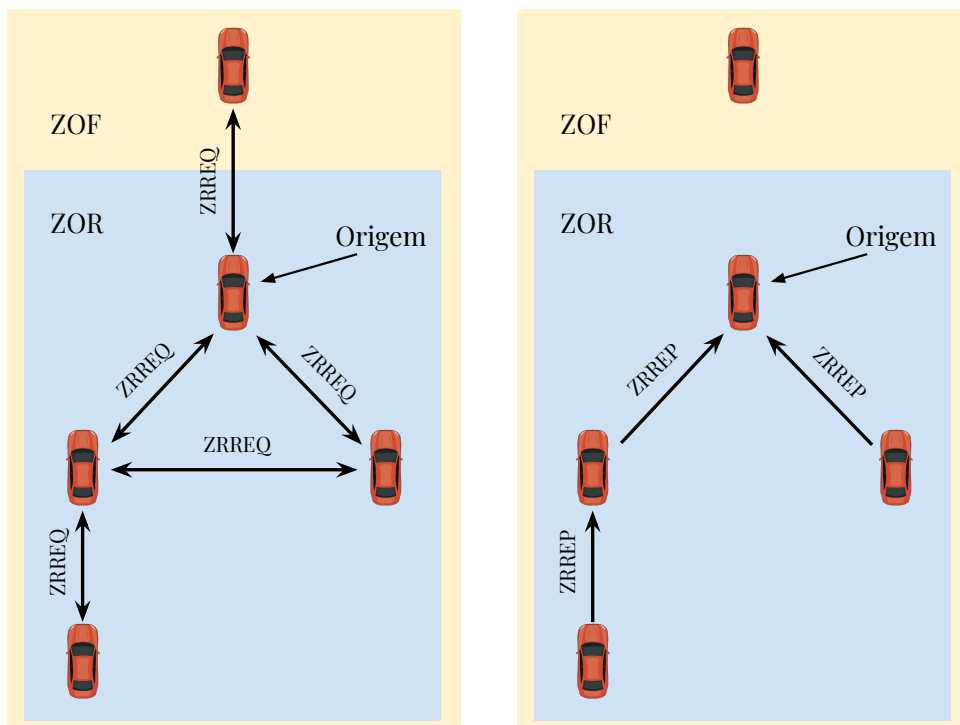


Figura 3.4: Processo de criação da árvore de *multicast* pelo protocolo ROVER (Adaptado de [6]).

Supondo que a velocidade média dos veículos em um rodovia esteja em torno de 90 km/h, e tendo em vista a restrição de refazer a árvore de *multicast* após a locomoção de

25 m, o tempo médio de reconstrução da árvore será 1 s. Esse tempo é pouco considerando que os veículos vizinhos são escolhidos dentro de $2/3$ do alcance de transmissão e (considerando um alcance de transmissão de 300 m) o vizinho teria que se distanciar no mínimo 100 m para perder a conexão. Para que esse distanciamento ocorresse em 1 s, os veículos deveriam ter 100 km/h de diferença entre suas velocidades, o que não é comum em uma rodovia. O limite de locomoção para a reconstrução da árvore de *multicast* poderia ser maior para diminuir a quantidade de mensagens enviadas, diminuindo o número de reconstruções da árvore.

Outro ponto a se considerar é que o algoritmo não identifica falhas de conexão na árvore antes do momento de renovação e também não verifica se ela conseguiu cobrir toda a ZOR, por falta de veículos ou mesmo por problemas de colisão durante a inundação da mensagem ZRREQ. Todas as mensagens que fossem enviadas em uma árvore sem conexão seriam perdidas sem que o algoritmo tivesse conhecimento disso.

Para avaliar o protocolo ROVER, os autores utilizaram a ferramenta de simulação JiST/SWANS [58] e um ambiente de rodovia de 10 km com três faixas de circulação em cada sentido. O desempenho do protocolo foi medido com base na taxa de cobertura da ZOR e no atraso de entrega das mensagens. Para a taxa de cobertura, o ROVER apresentou resultado máximo em todos os casos, já para o atraso de entrega, alterando a densidade de veículos no trânsito, o alcance de transmissão e o comprimento da ZOR, o ROVER obteve resultados em média próximos de 350 ms.

B. Mobicast

Em [7], Chen *et al.* apresentaram um protocolo de difusão *geocast* baseado no roteamento *mobicast* realizado em redes de sensores. *Mobicast* é o nome dado para o roteamento *multicast* de mensagens levando em consideração características espaço-temporais, onde uma mensagem deve ser transmitida para os veículos localizados em uma área geográfica, em um determinado instante t . A Figura 3.5 ilustra o comportamento do mecanismo. A zona de relevância ZOR tem o formato de uma elipse cujo centro é o nó de origem. A mensagem é encaminhada para os dois sentidos da via através dos veículos que estão dentro da área da elipse. Não havendo veículos suficiente para o encaminhamento, é então iniciada a fase de crescimento, onde os vizinhos determinam novas elipses, chamadas zonas de abordagem ZOA, que abrangem veículos que estão fora da ZOR. Para a construção da ZOA, cada veículo precisa conhecer os seus vizinhos, o que se dá através do envio periódico de *beacons*.

Pela forma como foi apresentada a abordagem de difusão de *mobicast*, podemos notar que não foram levadas em consideração as características do ambiente veicular, onde os veículos se locomovem em vias que são grandes em comprimento mas estreitas em largura,

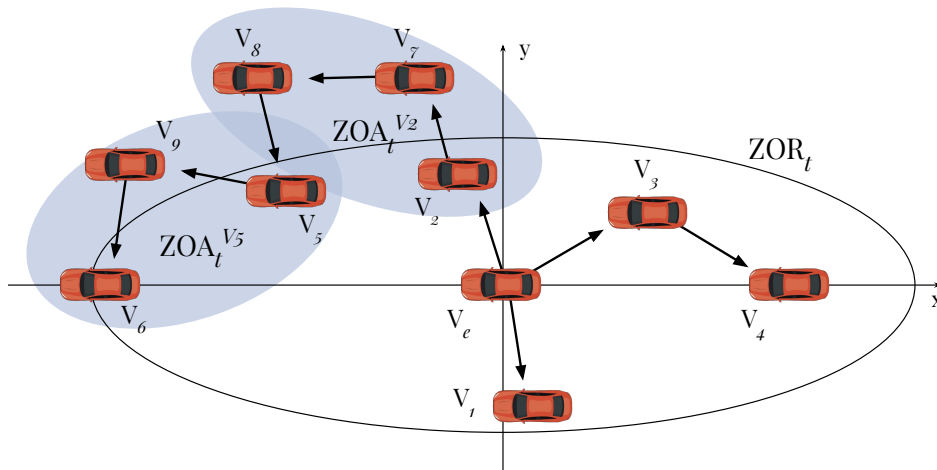


Figura 3.5: Construção da rota para a disseminação de mensagens pelo protocolo de *mobicast* (Adaptado de [7]).

e por isso a topologia da rede tende a ser uni-dimensional, principalmente em rodovias. Em outras palavras, o alcance de transmissão dos veículos cobre todas as faixas da rodovia e por isso não é possível a construção de uma ZOA paralela a uma ZOR em uma mesma via.

As simulações foram realizadas com a ferramenta NCTUns 4.0 e os autores optaram por não comparar com outros protocolos, a proposta foi avaliada com e sem o uso da ZOA. O cenário utilizado foi uma rodovia de 2 km com a quantidade de veículos variando entre 40 e 400. Analisando a taxa de cobertura, a carga de mensagens e o atraso de entrega do mecanismo podemos perceber que a abordagem tem grande sensibilidade à velocidade dos veículos e à densidade da rede, pois com velocidades acima de 70 km/h e densidades abaixo de 100 veículos/km a taxa de cobertura fica abaixo de 70%, a carga de mensagens duplica e o atraso de entrega cresce exponencialmente, mostrando que o protocolo proposto não é recomendado para ambientes de rodovia.

C. DBA-MAC

Felice *et al.* [8] propuseram o protocolo MAC Assistida por Espinha Dorsal Dinâmica (do Inglês, *Dynamic Backbone-Assisted MAC* - DBA-MAC) para realizar a difusão de mensagens *geocast* em rodovias. A ideia, como ilustra a Figura 3.6, se baseia em construir uma espinha de conexão entre alguns veículos da rede que serão os únicos transmissores das mensagens, de modo que essa espinha consiga cobrir toda a área da VANET. Se, em algum ponto, a conexão entre os membros da espinha for quebrada, outros veículos devem se candidatar a novos membros para restabelecer a conexão. Essa abordagem proativa

busca garantir a cobertura de toda a Zona de Interesse e reduzir o custo da escolha dos encaminhadores.

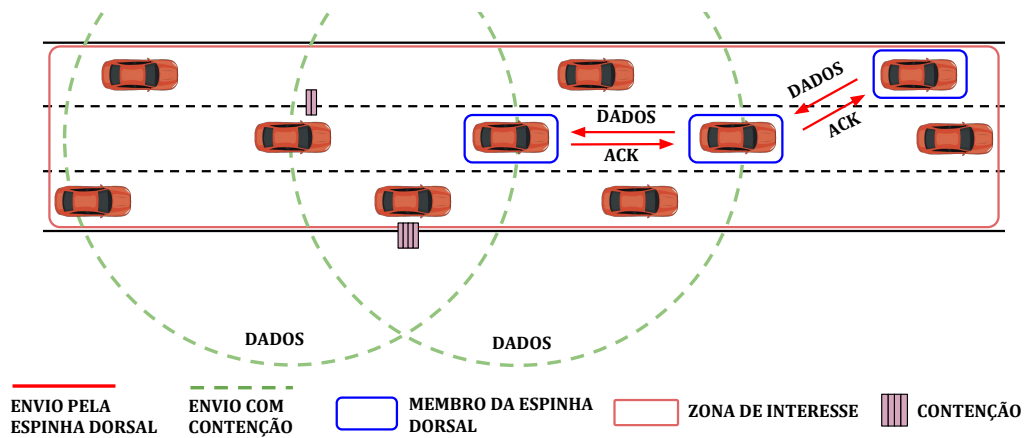


Figura 3.6: Envio de mensagens pelos membros da espinha dorsal de conexão no protocolo DBA-MAC (Adaptado de [8]).

Ao se transmitir uma mensagem, essa é repassada por todos os membros da espinha, que respondem com uma mensagem de confirmação *ACK*. Mas se em algum ponto a conexão estiver rompida, a transmissão da mensagem será realizada de modo reativo, utilizando contenção, até que a conexão seja recuperada. Os membros da espinha de transmissão devem enviar *beacons* periódicos para verificar se a conexão entre eles está ativa. O desempenho do protocolo DBA-MAC depende diretamente da constância da topologia da rede. Se houverem muitas mudanças na topologia, o mecanismo irá enviar mais mensagens de controle para renovar os membros da espinha e utilizará mais vezes o modo de transmissão reativo, que utiliza contenção. Dessa forma, o atraso será maior e a rede ficará mais congestionada.

Felice *et al.* [8] criaram um ambiente de simulação utilizando a ferramenta SUMO [40] para a criação de trilhas de mobilidade e a ferramenta NS-2 [44] para a simulação de rede. A avaliação foi realizada de forma bastante robusta, comparando o protocolo DBA-MAC com o Inundação e outro protocolo reativo baseado em distância e reproduzindo quatro diferentes aplicações: uma aplicação de segurança de tráfego, uma de informação de trânsito e outras duas de transmissão de áudio e vídeo. O cenário de simulação é composto de uma rodovia de 8 km com três faixas paralelas. Foram coletados resultados com base no atraso de entrega, taxa de cobertura, número de transmissões, dessincronização entre os pacotes (*jitter*) e qualidade de transmissão de vídeo. No cenário de aplicação de segurança de trânsito, o protocolo DBA-MAC apresentou melhor desempenho que as outras propostas comparadas, realizando cerca de 6 transmissões, em 4 ms para cobrir uma ZDI de 1 km, cuja cobertura foi em torno de 85%.

3.3 Análise Comparativa

O estudo e a comparação dos trabalhos já desenvolvidos nos permite destacar quais características diferenciam as múltiplas abordagens adotadas e o que deve ser incorporado ou evitado no desenvolvimento de uma nova proposta que trará mais eficiência à difusão de mensagens *geocast*. A Tabela 3.1 apresenta uma breve comparação entre as propostas.

Tabela 3.1: Comparação dos algoritmos de difusão *geocast*

	IVG	DRG	Reativo auxiliado por <i>beacons</i>	ROVER	Mobicast	DBA-MAC
Classificação	reativo	reativo	reativo	proativo	proativo	proativo
Escolha do encaminhador	maior distância do remetente	maior distância do remetente	maior distância do remetente	o vizinho que transmitir primeiro	menor distância do destino	equilíbrio entre distância e qualidade de conexão
<i>Beacons</i> periódicos	não	não	sim	não	sim	sim (somente os membros da espinha)
Persistente a desconexões	retransmissão periódica	retransmissão periódica	detecção de vizinhos	ausente	busca de rotas alternativas	ausente
Ferramentas de simulação	GloMoSim	JiST/SWANS STRAW	NS-2	JiST/SWANS STRAW	NCTUns 4.0	NS-2 SUMO
Modelo de propagação	desconhecido	Rayleigh fading	desconhecido	Rayleigh fading	Free-Space Rayleigh fading	Log-normal shadowing Two-Ray Ground

Primeiramente, podemos notar que o envio periódico de *beacons* foi adotado pelos pesquisadores como uma alternativa ao uso de contenção na escolha dos encaminhadores, pois diminui o atraso de entrega, as transmissões desnecessárias e as colisões, e aprimora a coordenação entre os nós. Apesar disto, é justo destacar que o uso de *beacons* implica uma carga adicional de mensagens, mas esse custo é justificado, pois o seu uso é essencial para muitas das aplicações ITS [59] visto que o compartilhamento coletivo do estado atual dos veículos os permite construir uma consciência do ambiente de trânsito ao seu redor, e por esse motivo podemos prever que será um comportamento presente em todos os veículos na rede VANET. Dadas estas justificativas, utilizaremos as informações enviadas pelos *beacons* no funcionamento do nosso protocolo.

Os algoritmos proativos apresentam um desempenho inicial inferior, pois a etapa inicial de coordenação dos nós e construção de rotas exige tempo e troca de mensagens de coordenação, mas é recompensado em seguida por um desempenho maior na difusão das mensagens quando as rotas já foram estabelecidas. Considerando isto, podemos fazer algumas observações com relação ao seu uso em VANETs. O ambiente veicular, diferente de outros ambientes de redes sem fio (como redes de sensores), possui maior dinamicidade de topologia devido à alta velocidade dos nós, o que exigirá que as rotas escolhidas sejam refeitas com maior frequência. Além disso, as aplicações de segurança de trânsito possuem

o perfil de realizar transmissões urgentes, que exigem o menor atraso possível, mas que são breves, utilizando poucas mensagens. O processo de construção de rotas poderá atrasar o envio inicial das mensagens, e depois que for feito a rota não será mais utilizada.

Neste capítulo trouxemos propostas presentes na literatura que buscaram realizar a tarefa de difusão de mensagens *geocast*. Cada proposta adotava uma abordagem distinta, e após analisarmos os pontos positivos e negativos destacamos as estratégias que surtiram melhores resultados para a eficiência das aplicações ITS. No próximo capítulo apresentaremos uma nova proposta que integra as estratégias assimiladas neste capítulo e, além disso, traz melhorias para o processo de difusão *geocast*.

Capítulo 4

Mecanismo de Encaminhamento de Mensagens *Geocast* - GEM

As aplicações ITS necessitam de mecanismos que possibilitem e coordenem a difusão de mensagens para os membros da rede VANET. Como vimos na Seção 2.4, esse processo de difusão se chama *geocast*. No Capítulo 3 apresentamos alguns trabalhos encontrados na literatura que tentam resolver os desafios da tarefa de difusão *geocast*. Observando as diversas abordagens utilizadas, identificamos as soluções mais adequadas para esses desafios. Para a tarefa de escolha dos encaminhadores, percebemos que o uso de *beacons* favorece o reconhecimento da topologia local e agiliza o processo de escolha, e em cenários de rodovia, a escolha baseada na distância máxima entre os nós proporciona maior eficiência na difusão da mensagem, sendo necessário reservar um intervalo na borda do alcance de transmissão para evitar que o encaminhador fique fora de alcance. Para aplicações de segurança do trânsito, a abordagem reativa é mais adequada por proporcionar maior agilidade na difusão de mensagens que não se repetem com frequência e por isso não reutilizam a mesma rota. Seguindo essas orientações, chegamos a uma nova solução, descomplicada e eficiente, que proporciona um meio pelo qual as aplicações podem distribuir mensagens para todos os dispositivos dentro de uma zona geográfica de uma rodovia, gerando o mínimo de mensagens e com menor atraso. Na Seção 4.1 descreveremos o funcionamento desse novo protocolo e na Seção 4.2 realizaremos uma avaliação do seu desempenho, comparando com outros protocolos semelhantes.

4.1 Funcionamento

Nossa proposta de protocolo de difusão *geocast* tem como objetivo a distribuição de mensagens de alerta sobre eventos que possam comprometer a segurança dos indivíduos no ambiente de trânsito, e recebe o nome de Protocolo de Encaminhamento de Mensagens

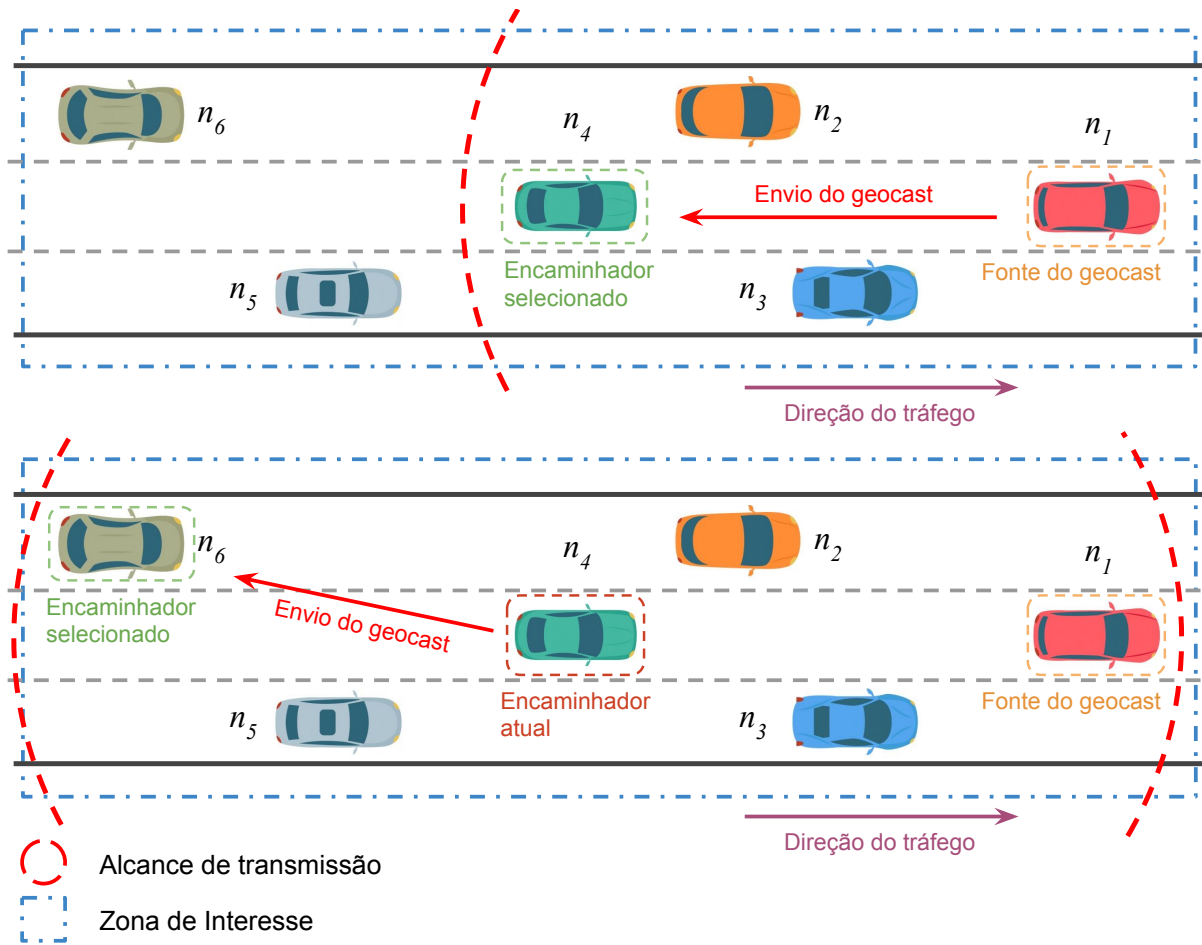


Figura 4.1: Exemplo da propagação da mensagem *geocast* dentro da Zona de Interesse no protocolo GEM.

Geocast (GEM). O GEM cumpre o seu objetivo utilizando uma abordagem reativa de seleção de nós encaminhadores que elimina o uso de contenção, através do conhecimento da vizinhança de cada nó. O processo de difusão *geocast* realizado pelo GEM se dá em quatro passos: **A. Construção da tabela de vizinhos**, **B. Escolha dos encaminhadores**, **C. Encaminhamento da mensagem** e **D. Conclusão do *geocast***. Abaixo, explicamos detalhadamente cada passo utilizando o exemplo da Figura 4.1 para ilustrar a explicação.

A. Construção da tabela de vizinhos

Como demonstrado nos capítulos anteriores, o envio periódico de *beacons* (mensagem BSM) é um elemento necessário para o funcionamento de várias aplicações de informação e segurança ITS. Da mesma forma, as informações compartilhadas através dos *beacons* serão aproveitadas para o funcionamento do protocolo GEM. Logo, cada veículo deve

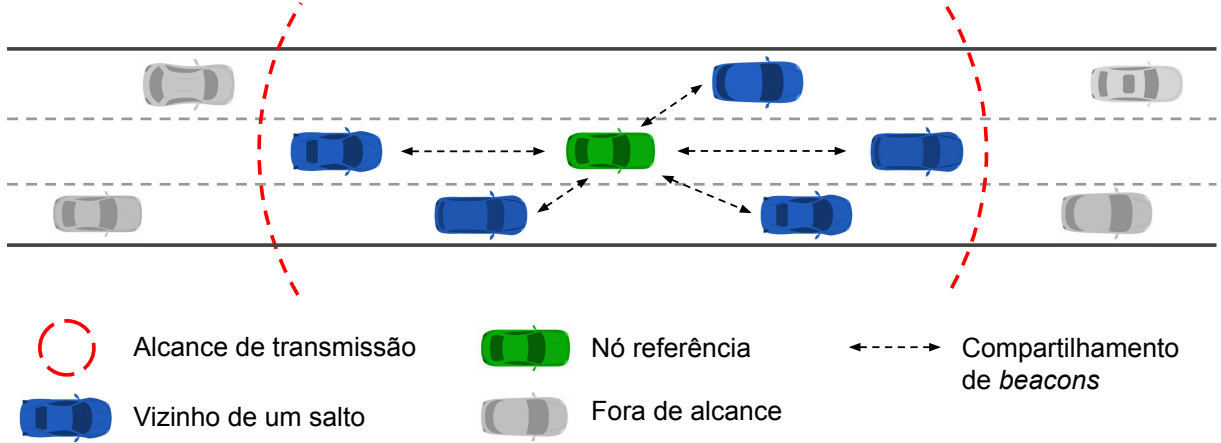


Figura 4.2: Formação da vizinhança de um veículo através do envio de *beacons*.

Tabela 4.1: Tabela de vizinhos N do nó n_1 .

Vizinho(ID)	Posição	Velocidade e Direção	Tempo de criação do <i>beacon</i>
n_2	\vec{p}_2	\vec{v}_2	t_1
n_3	\vec{p}_3	\vec{v}_3	t_2
n_4	\vec{p}_4	\vec{v}_4	t_3

enviar periodicamente, com frequência f_{beacon} , uma mensagem para todos os dispositivos que estão no seu alcance de transmissão, os quais chamamos de vizinhos de um salto (Figura 4.2), informando o seu número identificador (ID), o vetor da sua posição e o vetor da sua velocidade, cuja orientação indica a direção do movimento (assumimos que todos os veículos possuem dispositivo de GPS); enquanto isso, o veículo armazena todos os *beacons* recebidos dos seus vizinhos e constrói uma **tabela de vizinhos** N (como a Tabela 4.1). Vale ressaltar que, devido às limitações de alcance de transmissão, cada veículo só consegue se comunicar com os veículos que estão na sua vizinhança. A tabela é atualizada a cada novo *beacon* recebido, e um vizinho é apagado da tabela se não for recebido dele nenhum *beacon* antes do tempo limite T_{BLim} .

B. Escolha dos encaminhadores

No momento em que um veículo (no nosso exemplo o veículo n_1) detecta um evento em que é necessário o envio de uma mensagem, ele executa o Algoritmo 1 de criação para iniciar o processo de *geocast*. Primeiro, o nó fonte especifica a Zona de Interesse que a mensagem deve cobrir, a qual assume o formato retangular e abrange o segmento da rodovia onde os carros receberão e repassarão a mensagem, como na Figura 4.1. Depois, ele determina em qual sentido a mensagem será propagada. O *geocast* pode ser propagado no sentido

Algorithm 1 Criação do *geocast*

- **Passo 1:** O processo de *geocast* se inicia quando o veículo percebe um evento que requer o envio de uma mensagem. Se o nó é a origem do *geocast*, ele cria a mensagem m , registrando nela a ZdI e o sentido de propagação.
- **Passo 2:** Executa o Algoritmo 2 com a tabela de vizinhos N . Recebe a lista de candidatos V com o ID dos vizinhos aptos para o encaminhamento, ordenados pela preferência.
- **Passo 3:** Se a lista de candidatos V retornar vazia, então não há vizinhos aptos para serem encaminhadores. Mesmo assim, o nó transmite a mensagem m para garantir que todos os vizinhos a tenham recebido e não espera por confirmação. **Fim.**
- **Passo 4:** Se a lista de candidatos V não está vazia, escolhe os n primeiros vizinhos para formarem a lista de encaminhadores L , a qual é anexada à mensagem m que é então transmitida.
- **Passo 5:** Espera pelo tempo de contenção de confirmação $T_{ContConfirmação}$ definido na Equação 4.5 até ouvir a transmissão de um dos nós da lista de encaminhadores L para confirmar que o envio foi bem sucedido.
 - **Passo 5a:** Se receber a transmissão, então encerra o procedimento. **Fim.**
 - **Passo 5b:** Se não receber a transmissão e acabar o tempo de contenção, realiza a retransmissão da mesma mensagem repetindo os Passos 2 a 5.

do movimento do trânsito, como, por exemplo, quando uma ambulância deseja sinalizar aos carros que estão à sua frente para se afastarem, ou no sentido contrário do trânsito, como quando um carro envolvido em um acidente precisa alertar os veículos que estão se aproximando do evento. A ZdI e o sentido de propagação são anexados na mensagem m gerada.

Antes de enviar a mensagem, o nó n_1 deve ainda decidir localmente qual vizinho será o encaminhador daquela mensagem. Para fazer essa escolha, ele executa o Algoritmo 2 de ranqueamento que constrói uma **lista de candidatos** V baseada na informação da tabela de vizinhos N . Para construir a lista de candidatos V , o algoritmo realiza uma filtragem da tabela de vizinhos N selecionando aqueles que são aptos para realizar o encaminhamento. Mas antes de realizar a filtragem, é necessário calcular a previsão da posição atual do vizinho, pois devido à movimentação dos veículos, a informação do *beacon* se torna desatualizada. A previsão da posição atual do vizinho \vec{p}_v é calculada seguindo as leis da cinemática na equação

$$\vec{p}_v = p_{bcn}^{\vec{}} + (v_{bcn}^{\vec{}} \cdot t_{dec}), \quad (4.1)$$

Algorithm 2 Ranqueamento de encaminhadores

- **Passo 1:** Após receber a tabela de vizinhos N , verifica se consegue alcançar a borda da ZdI com o seu raio de transmissão, pois se o nó consegue cobrir o resto da ZdI então não é necessário escolher os próximos encaminhadores. Retorna a lista de candidatos V vazia. **Fim.**
- **Passo 2:** Se ele não consegue cobrir toda a ZdI, então itera sobre cada vizinho da tabela realizando a filtragem:
 - **Passo 2a:** A partir das informações do *beacon*, calcula a previsão da posição atual do vizinho \vec{p}_v seguindo a Equação 4.1.
 - **Passo 2b:** Verifica se o vizinho está dentro da ZdI, se ele não estiver então é descartado do cálculo.
 - **Passo 2c:** Verifica se o vizinho segue o sentido de difusão, se ele não seguir então é descartado do cálculo.
 - **Passo 2d:** Verifica se o vizinho está dentro do intervalo $\delta \cdot r_{tx}$ na borda do alcance de transmissão, se ele estiver então é descartado do cálculo.
 - **Passo 2e:** Com a previsão da posição do vizinho, calcula o Fator de Preferência seguindo a Equação 4.4.
- **Passo 3:** Retorna a lista de candidatos V com o ID dos vizinhos aptos para o encaminhamento, ordenada pelo Fator de Preferência. **Fim.**

onde \vec{p}_{bcn} é o vetor da posição do veículo vizinho no momento em que o *beacon* foi gerado, \vec{v}_{bcn} é o vetor da velocidade no mesmo instante e t_{dec} é o tempo decorrido desde a criação do *beacon* t_{bcn} até o tempo atual t_a , calculado como

$$t_{dec} = t_a - t_{bcn}. \quad (4.2)$$

A partir da previsão da posição atual do vizinho \vec{p}_v , verificamos algumas condições para determinar se o vizinho é apto para realizar a transmissão:

- Somente veículos dentro da ZdI realizam o encaminhamento.
- O vizinho deve estar localizado de forma que favoreça a propagação da mensagem, ou seja, ele deve estar à frente do veículo transmissor, se a difusão é no sentido do movimento da via, ou deve estar atrás, se a difusão é no sentido contrário do movimento da via.
- A borda da área de cobertura do nó transmissor, correspondente ao intervalo $\delta \cdot r_{tx}$, sendo r_{tx} o alcance de transmissão, é desconsiderada para diminuir as chances de que o nó escolhido para o encaminhamento não consiga receber a mensagem. Para

isto, calcula-se a distância d_v entre a posição do nó transmissor da mensagem \vec{p}_f e a posição do vizinho \vec{p}_v , pela equação $d_v = |\vec{p}_f - \vec{p}_v|$, e verifica-se a condição

$$d_v \leq (1 - \delta) \cdot r_{tx}. \quad (4.3)$$

Satisfeitas as condições, o algoritmo de ranqueamento deve calcular o **Fator de Preferência** de cada veículo, que indica o quanto o nó é favorável para realizar a transmissão, seguindo a equação

$$FP = \frac{d_v}{(1 - \delta) \cdot r_{tx}}, \quad (4.4)$$

onde os vizinhos mais distantes do nó de origem receberão maior prioridade no envio da mensagem, para que cada transmissão cubra uma área maior e, conseqüentemente, o *geocast* percorra a ZdI com menos saltos e em menos tempo. Por fim, o algoritmo de ranqueamento retorna a lista de candidatos V com todos os vizinhos aptos para a transmissão, em ordem de preferência.

A partir da lista de candidatos V o algoritmo de criação escolhe qual vizinho deverá fazer o repasse da mensagem m , que no nosso exemplo é o veículo n_4 . Para aumentar a redundância e evitar erros de transmissão, O GEM escolhe mais de um vizinho para encaminhar a mensagem, dessa forma, se o primeiro encaminhador falhar em enviar a mensagem, o segundo encaminhador irá enviá-la após um tempo de contenção, e assim por diante. Seguindo esse critério, foram escolhidos os nós n_4 e n_2 . A **lista de encaminhadores** L com o ID de todos os nós escolhidos para a retransmissão é gravada no cabeçalho da mensagem, a qual é enviada para a vizinhança. O nó n_1 , que realizou a transmissão, deve aguardar por um tempo de contenção de confirmação $T_{ContConfirmação}$ definido na equação

$$T_{ContConfirmação} = n \cdot t_c, \quad (4.5)$$

sendo n o número de nós na lista de encaminhadores L e t_c o tempo de contenção base. Ele aguarda esse tempo de contenção até ouvir a transmissão da mensagem por um dos vizinhos escolhidos, que será a confirmação implícita do envio realizado. Se, ao acabar o tempo de contenção, o nó de origem não tiver ouvido a transmissão, ele repete o processo de escolha de novos nós encaminhadores.

C. Encaminhamento da mensagem

Cada veículo dentro da ZdI que recebe a mensagem *geocast* executa o Algoritmo 3 para dar continuidade ao processo de encaminhamento. Primeiramente, o nó verifica se foi escolhido para encaminhar a mensagem. Supondo que o nó n_4 tenha recebido a mensagem, como é o primeiro nó na lista de encaminhadores L , ele terá a maior prioridade e irá

Algorithm 3 Encaminhamento do *Geocast*

- **Passo 1:** Ao receber a mensagem m , checa se seu ID está incluso na lista de encaminhadores L .
 - **Passo 1a:** Se o seu ID não está na lista não precisa encaminhar a mensagem. **Fim.**
 - **Passo 1b:** Se for o primeiro nó na lista, então imediatamente executa o Algoritmo 1 para escolher novos encaminhadores e dar continuidade ao *geocast*. **Fim.**
 - **Passo 1c:** Se não for o primeiro nó, inicia o processo de contenção esperando pelo tempo de contenção de encaminhamento $T_{ContEncaminhamento}$ definido na Equação 4.6.
- **Passo 2:** Se estiver em contenção, espera pela transmissão dos outros nós.
 - **Passo 2a:** Se receber a transmissão de um nó da lista de encaminhadores L , cancela a sua transmissão. **Fim.**
 - **Passo 2b:** Se não receber a transmissão e o tempo de contenção acabar, então está autorizado a transmitir a mensagem m . Executa o Algoritmo 1 para escolher novos encaminhadores e dar continuidade ao *geocast*. **Fim.**

transmiti-la imediatamente executando o Algoritmo 1. Todos os outros nós que estiverem na lista de encaminhadores L (por exemplo, o nó n_2) iniciam um tempo de contenção de encaminhamento $T_{ContEncaminhamento}$ definido por

$$T_{ContEncaminhamento} = x \cdot t_c, \quad (4.6)$$

sendo x a sua posição na lista de encaminhadores L , começando em 0, e t_c o tempo de contenção base. Se o nó receber a transmissão de outro nó da lista, ele cancela a sua transmissão. Entretanto, caso o primeiro nó falhe em encaminhar a mensagem, o próximo nó na lista irá transmitir ao acabar o seu tempo de contenção.

D. Conclusão do *geocast*

O processo de encaminhamento da mensagem m irá continuar até chegar a um nó que esteja na borda final da ZdI. No nosso exemplo o veículo n_6 . Esse nó, ao receber a mensagem, verifica se o seu raio de transmissão é suficiente para cobrir o fim da ZdI. Se sim, então transmite a mensagem com a lista de encaminhadores L vazia, sem escolher o próximo nó encaminhador, sinalizando o limite da ZdI e o fim do mecanismo de encaminhamento.

O protocolo GEM cobre muitos dos requisitos impostos pelas particularidades da rede VANET. Ele se adapta às mudanças constantes da topologia, estando sempre atualizado, e distribui a tarefa de repasse entre os veículos para que não haja sobrecarga de processamento e perda de pacotes. O seu desempenho será avaliado e comparado com outras propostas na próxima seção.

4.2 Avaliação da Proposta

Para avaliar a eficácia do mecanismo proposto, serão realizados testes levando em consideração diferentes características presentes no ambiente veicular. Como foi demonstrado na Seção 2.5, a simulação computacional é o método mais adequado para esta etapa do desenvolvimento. A seguir, definiremos o ambiente de simulação e as métricas utilizadas para mensurar o desempenho do protocolo GEM.

4.2.1 Ambiente de Simulação

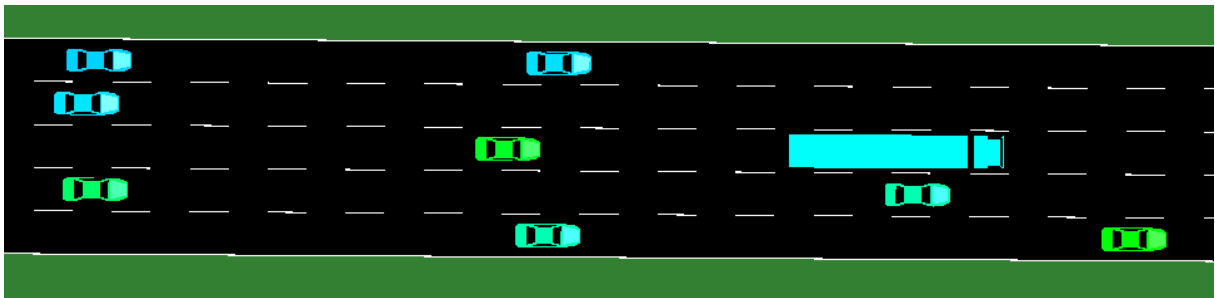


Figura 4.3: Segmento do cenário de rodovia construído para a simulação na ferramenta SUMO.

Na Seção 2.5, definimos o *framework* Veins, juntamente com as ferramentas de simulação OMNeT++ e SUMO, como o ambiente de simulação que utilizaremos para avaliar os mecanismos de difusão de mensagens *geocast*. A simulação utilizará um cenário de trânsito constituído de uma rodovia em linha reta com cinco faixas de tráfego, todas no mesmo sentido (Figura 4.3). Para criar um ambiente de trânsito realista e heterogêneo, definimos três tipos de veículos com velocidades distintas: veículo *A*, que possui velocidade máxima de 90 km/h e representa 80% do tráfego, veículo *B*, com velocidade máxima de 108 km/h e representa 15% do tráfego e veículo *C*, cuja velocidade máxima é de 130 km/h e representa 5% do tráfego gerado. Para aumentar a aleatoriedade, cada veículo, ao ser criado, recebe um valor de velocidade máxima seguindo uma distribuição normal, sendo a média como a velocidade máxima do tipo do veículo e o desvio padrão como 10%

desse valor. Os veículos serão inseridos periodicamente de modo a criar simulações com densidades de tráfego diferentes, variando entre 25, 50, 75, 100 e 125 veículos/km. Desse modo, poderemos analisar o comportamento do mecanismo em diferentes cenários.

Tabela 4.2: Parâmetros de simulação.

Cenário	Rodovia com 5 faixas	
Zona de Interesse	1 km	
Tipos de veículos	Velocidade máxima	Porcentagem
Veículo A	90 km/h	80%
Veículo B	108 km/h	15%
Veículo C	130 km/h	5%
Tempo de aquecimento	55 s	
Modelo de propagação	Interferência de Dois Raios	
Altura da antena	1,9 m	
Potência de transmissão	7 mW	
Sensibilidade do rádio	−89 dBm	
Taxa de transmissão	6 Mb/s	
Alcance de transmissão r_{tx}	395 m	
Borda do alcance de transmissão δ	0,1	
Tamanho da mensagem m	500 bytes	
Tamanho da lista de encaminhadores L	3	
Tempo de contenção base t_c	1,56 ms	
Frequência de <i>beacons</i> f_{beacon}	0,5 Hz	
Validade dos <i>beacons</i> T_{BLim}	$2 \cdot f_{beacon}$	

Para avaliar os protocolos, utilizamos uma aplicação simples que envia uma mensagem de alerta para os veículos que estiverem dentro de uma zona demarcada. No início da simulação, se transcorre um tempo de “aquecimento” (do Inglês, *warm-up time*) durante o qual o simulador irá gerar os veículos necessários para a simulação e, no caso do GEM, os veículos irão gerar os *beacons* necessários para a construção das tabelas de vizinhos. Após este período de aquecimento, um veículo irá iniciar o processo de difusão *geocast* distribuindo a mensagem de alerta ao longo de uma ZdI que cobre 1 km da rodovia. A mensagem deve ser difundida no sentido contrário da movimentação do trânsito até chegar ao fim da ZdI. A Tabela 4.2 informa os parâmetros principais usados nas simulações. Para comparar os resultados obtidos pelo protocolo GEM, outros dois protocolos de *geocast* serão simulados:

- **Inundação:** Este protocolo representa o funcionamento mais básico de um protocolo reativo, como foi descrito nos Capítulos 2 e 3. Mas a versão utilizada nesta

comparação apresenta uma mudança: ao receber uma nova mensagem, o nó calcula um tempo de contenção aleatório e transmite a mensagem quando acaba esse tempo, caso nenhum vizinho tenha transmitido antes. Isto é feito para prevenir o problema de tempestade de difusão explicado na Seção 2.4. A escolha deste protocolo para comparação com o GEM pode demonstrar as consequências do uso de um mecanismo de escolha de encaminhadores baseado na distância.

- **DR:** O Protocolo Reativo Baseado em Distância (do Inglês, *Distance-based Reactive Protocol* - DR), é outro exemplo de protocolo *geocast* reativo, semelhantes às propostas [5] e [16]. O seu funcionamento é semelhante ao Inundação, a diferença é que, ao calcular o tempo de contenção, os carros mais distantes recebem menor tempo e consequentemente maior prioridade de transmissão [55]. Dessa forma, a velocidade de cobertura do protocolo é maximizada [8]. Esse mecanismo foi escolhido por se assemelhar ao GEM utilizando abordagem reativa e escolha de encaminhadores baseada na distância. A comparação com este protocolo pode demonstrar os efeitos do uso de *beacons* e da escolha mais refinada dos encaminhadores.

Para cada combinação dos parâmetros de simulação serão realizadas 100 simulações, e os resultados apresentados representarão a média dessas simulações, de modo a reduzir os erros imprevistos dos simuladores.

4.2.2 Métricas de Avaliação

As métricas definidas a seguir serão utilizadas para mensurar e comparar a performance dos protocolos simulados. Definimos N_{sim} como o conjunto de veículos gerados na simulação, Z como o conjunto de veículos dentro da ZdI, sendo $Z \subset N_{sim}$, e $k = |Z|$ a quantidade de veículos desse conjunto.

- **M1 - Saltos para cobrir a Zona de Interesse:** Saltos são as transmissões mínimas realizadas para repassar uma mensagem entre dois pontos na rede. Sendo H_{ZdI} o número de saltos realizados pela mensagem para cobrir a ZdI, o mínimo de saltos que a mensagem precisa percorrer é dado por

$$H_{ZdI} = \left\lceil \frac{d_{ZdI}}{r_{tx}} \right\rceil, \quad (4.7)$$

onde r_{tx} é o alcance de transmissão dos nós e d_{ZdI} é a extensão da ZdI. O número de saltos é dado pelo teto do resultado da fração, pois não pode haver um número fracionário de saltos. Para uma maior eficiência do mecanismo, espera-se que a difu-

são seja realizada com o menor número de saltos possível, o que pode ser alcançado maximizando a distância de cada salto.

- **M2 - Transmissões:** Definimos T como o número de transmissões realizadas durante o processo de cobertura da ZdI, incluindo as retransmissões realizadas por falhas na comunicação. Quanto maior o número de transmissões, mais carga será gerada na rede, o que poderá acarretar o problema de tempestade de difusão. Por esse motivo, o mecanismo de difusão deve ser coordenado de forma a reduzir as transmissões desnecessárias.
- **M3 - Colisões:** Consideramos C o número de registros de colisão de mensagens realizados pelos veículos durante o processo de difusão da mensagem *geocast*. Por exemplo, se dois veículos transmitirem ao mesmo tempo e a colisão for detectada por 10 veículos, ela será registrada 10 vezes. Dessa forma, a densidade de veículos impacta diretamente no número de registros realizados. Essa é a abordagem utilizada pelo simulador OMNeT++. Colisões implicam em perda das transmissões e necessidade de retransmissão das mensagens, por isso espera-se que um protocolo eficiente busque diminuir o número de colisões ocorridas.
- **M4 - Atraso para cobrir a Zona de Interesse:** Atraso é o tempo que uma mensagem leva para percorrer a rede de um ponto até outro. Assumindo H_i , ($i > 0$), como sendo o número de saltos que uma mensagem m percorreu para alcançar o nó $n_i \in Z$, o atraso $D(n_i)$ pode ser computado como

$$D(n_i) = \sum_{j=1}^{H_i} p_j + t_j + c_j, \quad (4.8)$$

onde p_j denota o tempo de processamento da mensagem pelo transmissor, t_j é o tempo de transmissão (incluindo contenção, se houver) e c_j é o tempo de processamento da mensagem pelo receptor. Sabendo que o nó que origina a mensagem está no início da ZdI e supondo que haja um nó n_k no fim da ZdI, calculamos $D(n_k)$ como o atraso total para cobrir a ZdI. Quanto menor o atraso na distribuição das mensagens, melhor será o desempenho da aplicação, por isso o mecanismo deve buscar o menor atraso possível, diminuindo o número de saltos e o tempo de contenção.

- **M5 - Cobertura:** A cobertura do protocolo, definida como P , é a porcentagem de veículos do conjunto Z que efetivamente receberam a mensagem m durante o processo de difusão *geocast*. O objetivo de um protocolo *geocast* é atingir todos os veículos dentro de uma área geográfica, por isso, quanto maior for a cobertura do mecanismo, melhor será o seu desempenho.

A partir das métricas que foram definidas e comparando com as outras abordagens que serão simuladas, poderemos inferir o desempenho alcançado pelo protocolo GEM, proposto neste trabalho, e concluir se a abordagem utilizada contribui para a eficiência da tarefa de difusão de mensagens *geocast*.

4.2.3 Resultados

Nesta seção, apresentaremos e discutiremos os resultados apurados nas simulações. Dentre os valores obtidos, observamos que alguns casos apresentaram resultados extremamente discrepantes da maioria das simulações. Esses resultados, embora sejam poucos, são importantes para se descobrir possíveis falhas na programação do algoritmo que não são facilmente perceptíveis. Mas na análise estatística dos resultados, esses valores extremos podem dificultar a observação do desempenho geral do algoritmo, pois influenciam diretamente na média calculada, e por isso devem ser retirados. Utilizamos a técnica de Amplitude Interquartil (AIQ) para realizar a filtragem dos resultados, como descrito em [60].

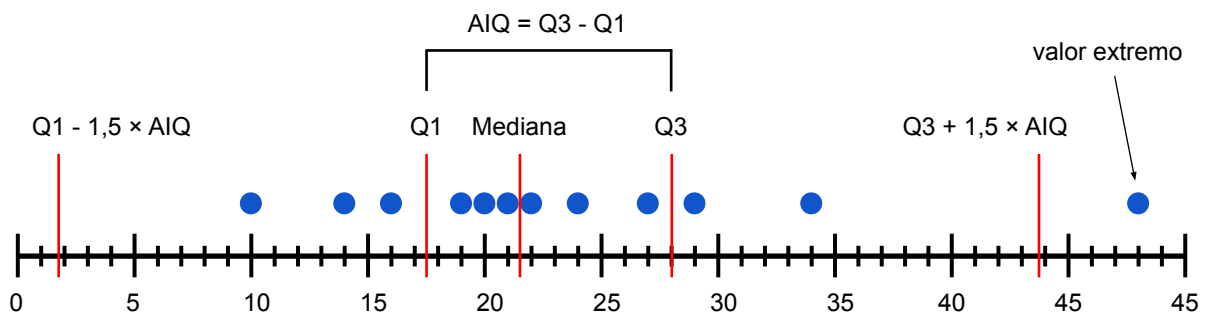


Figura 4.4: Identificação de valores extremos através da técnica de amplitude interquartil.

Primeiro, calcula-se os três quartis, que são medidas que dividem o conjunto de dados em quatro partes iguais. O primeiro quartil (Q_1 ou quartil inferior) delimita 25% do conjunto de dados, o segundo quartil (Q_2 ou mediana) delimita 50% e é o centro do conjunto, e o terceiro quartil (Q_3 ou quartil superior) delimita 75% dos valores do conjunto. Depois, calcula-se a amplitude interquartil como $Q_3 - Q_1$. Por último, calculamos a borda interna inferior como $Q_1 - 1,5 \cdot AIQ$ e a borda interna superior como $Q_3 + 1,5 \cdot AIQ$. Os valores extremos são aqueles que estão abaixo da borda interna inferior ou acima da borda interna superior, como demonstrado na Figura 4.4.

Nos gráficos que serão apresentados, os valores representam a média aritmética das 100 simulações realizadas para cada cenário. Também está representado, na forma de

uma reta, o intervalo de confiança com nível de confiança de 95%, o que indica que há 95% de probabilidade do valor real estar dentro do intervalo calculado.

Saltos para cobrir a Zona de Interesse

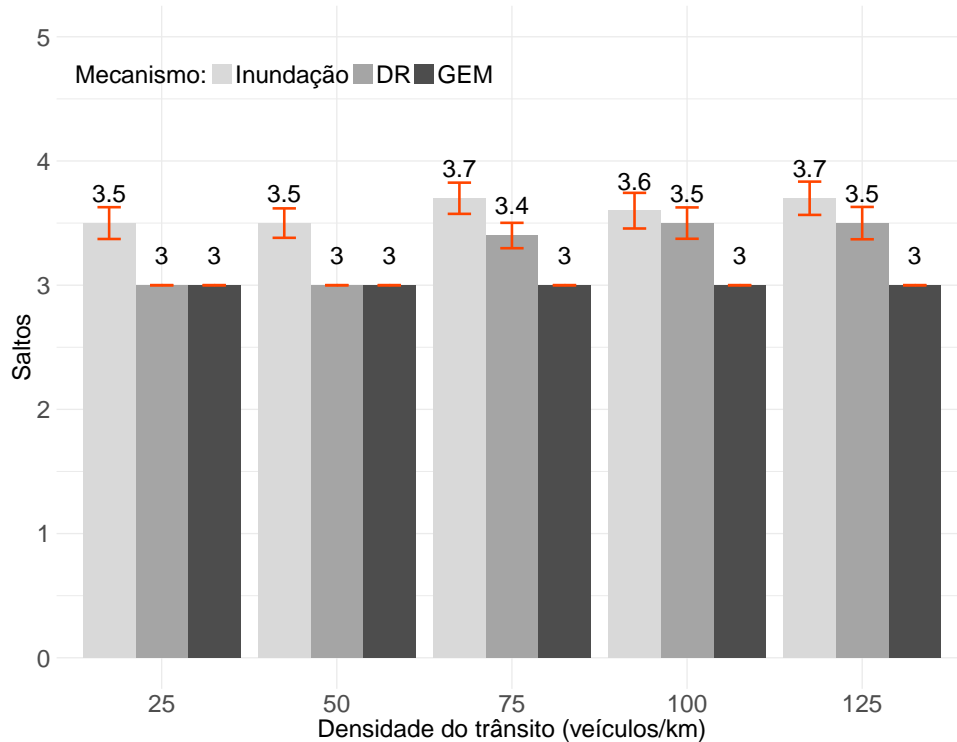


Figura 4.5: Gráfico dos saltos realizados para cobrir a ZdI de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.

A Figura 4.5 mostra o número médio de saltos realizados para cobrir a ZdI em cada densidade de veículos. Utilizando a Equação 4.7, com o alcance de transmissão de 395 m e a ZdI de 1000 m, podemos prever que seriam necessários no mínimo 3 saltos para cobrir toda a Zona de Interesse. Pode-se notar que todos os protocolos simulados se aproximaram do previsto, embora somente o protocolo GEM manteve a média na previsão em todas as densidades.

Podemos justificar esse resultado observando a abordagem de escolha do nó encaminhador de cada mecanismo. No Inundação, cada vizinho seleciona um tempo de contenção aleatório, possibilitando que tanto os veículos mais próximos quanto os mais distantes da fonte possam ganhar o direito de transmitir primeiro, o que faria com que o salto tivesse menor rendimento de cobertura, e assim, mais saltos seriam necessários para percorrer a ZdI. Essa característica fez com que o protocolo Inundação ficasse próximo da média de 3,5 saltos. O protocolo DR apresentou a média de 3 saltos nas densidades mais baixas, pois

os veículos mais distantes recebem prioridade de transmissão, maximizando a cobertura do salto. Mas com o aumento da densidade, a média subiu para 3,5, pois como os veículos estão mais próximos uns dos outros, os tempos de contenção podem ser semelhantes, o que irá gerar colisão nas mensagens, e a transmissão será feita pelos veículos mais próximos da fonte, levando ao mesmo problema do Inundação. No GEM, os encaminhadores selecionados são sempre os mais distantes, independente da densidade, o que maximiza a cobertura de cada salto e reduz a quantidade de saltos necessários para cobrir a ZdI. Essa abordagem gerou o melhor resultado, mantendo o GEM com 3 saltos.

Transmissões

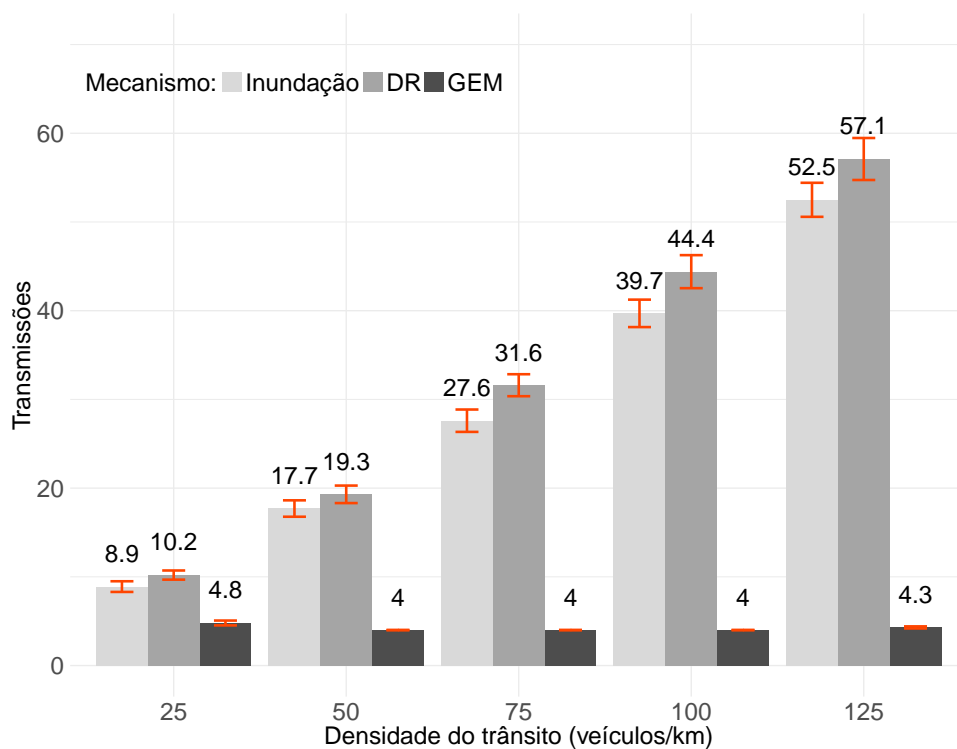


Figura 4.6: Gráfico das transmissões realizadas durante a difusão *geocast* de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.

A Figura 4.6 apresenta a quantidade de transmissões realizadas durante o processo de difusão da mensagem *geocast*. Consideramos que, no momento da difusão, os nós do protocolo GEM já possuem a informação de seus vizinhos, por isso, as transmissões de *beacons* não são consideradas no resultado final. Sabendo-se que são necessários no mínimo 3 saltos para cobrir a ZdI, é esperado que o número ideal de transmissões esteja em torno do mesmo valor, supondo que não haja colisões nas transmissões realizadas.

Nossa proposta, o GEM, foi o único protocolo a permanecer próximo do valor esperado, realizando em média 4 transmissões para todas as densidades de trânsito. Por outro lado, o Inundação e o DR sofrem um impacto no número de transmissões à medida que aumenta a densidade de veículos no trânsito. Os dois apresentaram crescimento semelhante, partindo de 9 transmissões em 25 veículos/km até 55 transmissões em 125 veículos/km, valor 13 vezes maior que o observado no protocolo GEM. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de ambos utilizarem contenção no processo de escolha do encaminhador, o que permite que mais de um veículo envie a mensagem caso os tempos de espera sejam semelhantes, ou no caso de não perceber a confirmação implícita da mensagem. Dessa forma, quanto mais veículos no trânsito, maior é a chance de ocorrerem transmissões desnecessárias.

Colisões

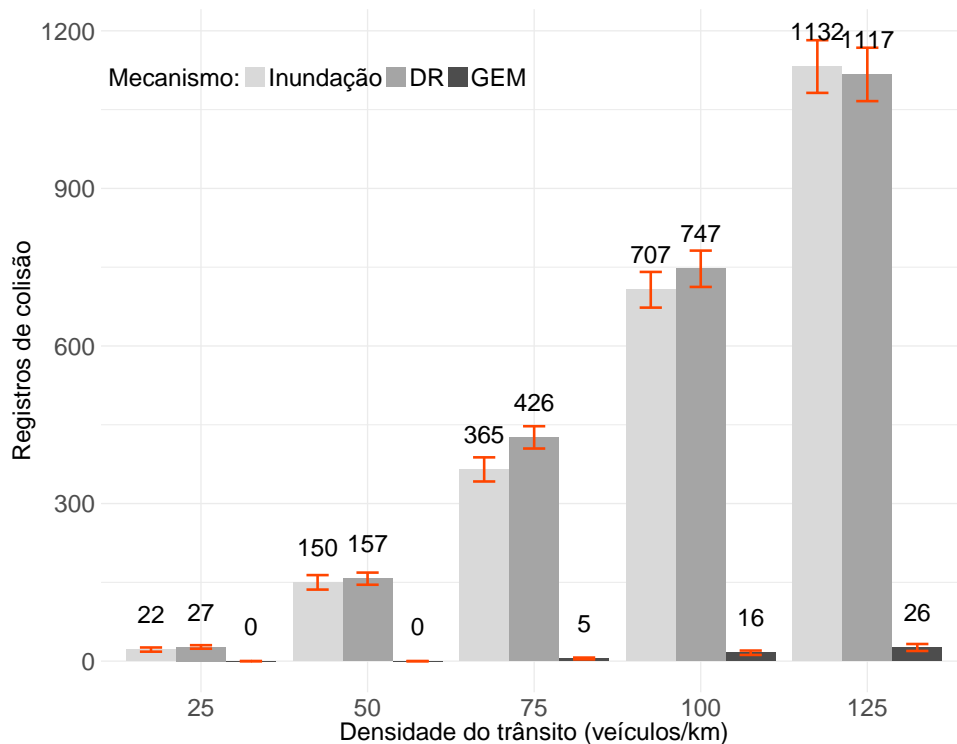


Figura 4.7: Gráfico do número de registros de colisão realizados pelos veículos de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.

A Figura 4.7 apresenta o número de registros de colisão em cada cenário de simulação. Como o protocolo GEM também realiza o envio de *beacons*, podem ocorrer colisões entre mensagens do mecanismo, entre *beacons* ou entre ambos. Para evitar que as colisões entre *beacons* influenciassem no resultado, os registro de colisão só foram coletados durante o período de difusão da mensagem. O comportamento esperado é que o número de

colisões acompanhe o crescimento do número de transmissões e o aumento da densidade do trânsito. Esse mesmo comportamento pode ser observado no gráfico.

A discrepância observada na quantidade de transmissões entre o protocolo GEM e os protocolos Inundação e DR refletiu significativamente na quantidade de registros de colisão observados. Enquanto o GEM não gerou nenhuma colisão nas densidades mais baixas e subiu até 26 registros de colisão em média nas densidades mais altas, os outros dois mecanismos subiram drasticamente de 22 até 1132 registros de colisão, demonstrando que não possuem bom desempenho em cenários de alta densidade, como em engarrafamentos. No geral, o resultado dos protocolos Inundação e DR foi quase 50 vezes maior que o apresentado pelo GEM, e para todas as simulações do GEM, 60% não apresentaram nenhuma colisão.

Atraso para cobrir a Zona de Interesse

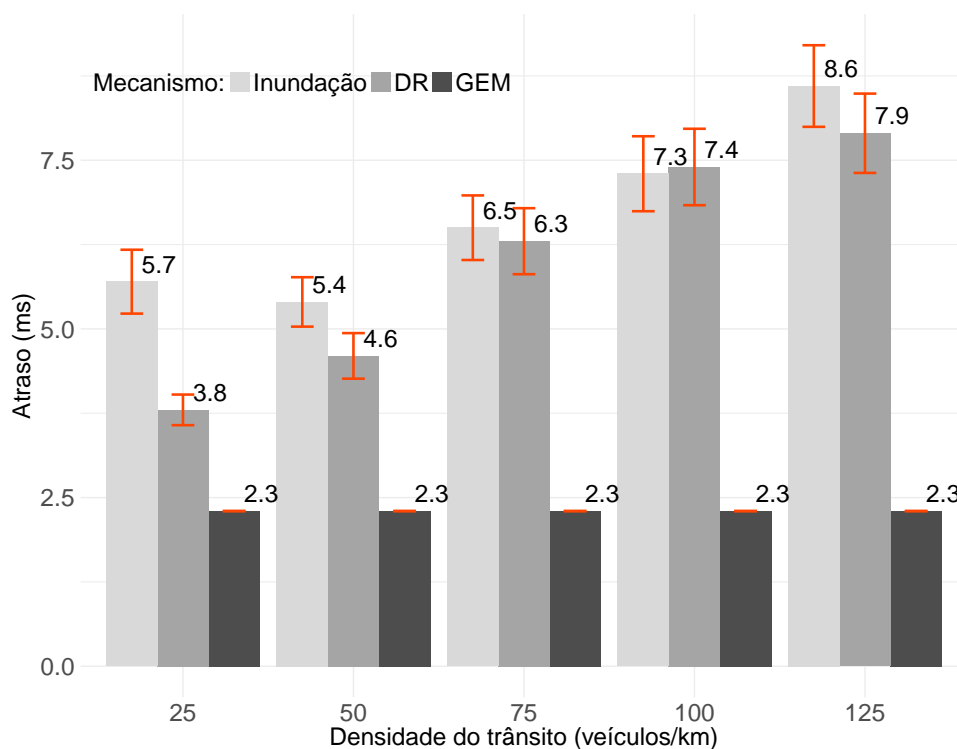


Figura 4.8: Gráfico do atraso para cobrir a ZdI de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.

Na Figura 4.8, temos o atraso gerado por cada mecanismo durante a difusão da mensagem até chegar ao fim da Zona de Interesse, em todas as densidades de trânsito. Como explicado na Métrica M4, a quantidade de saltos impacta diretamente o atraso gasto

para a mensagem percorrer toda a ZdI, mas também outros fatores como colisões de transmissão ou desconexões da rede exercem grande influência sobre esse valor.

Na análise dos resultados anteriores, vimos que os protocolos Inundação e DR apresentaram as maiores taxas de saltos, transmissões e colisões, o que impactou diretamente no atraso gasto para que a mensagem percorresse todo o comprimento da ZdI. O protocolo Inundação levou em média 5,7 ms com a densidade de 25 veículos/km e subiu até 8,6 ms com 125 veículos/km, o protocolo DR iniciou em 3,8 ms e subiu até 7,9 ms na maior densidade, já o GEM permaneceu com 2,3 ms em todas as densidades, mostrando ser mais robusto e resistente às mudanças de densidade que podem ocorrer com frequência no trânsito. Outra observação pode ser feita analisando o desvio padrão de cada protocolo. Enquanto o protocolo GEM foi mais preciso, com o desvio padrão médio de 0,0037 ms, os protocolos Inundação e DR apresentaram uma grande dispersão nos resultados, com o desvio padrão médio de 2,53 e 2,25 ms respectivamente, o que mostra instabilidade no comportamento dos protocolos, a qual se torna pior com o aumento da densidade do trânsito.

Cobertura

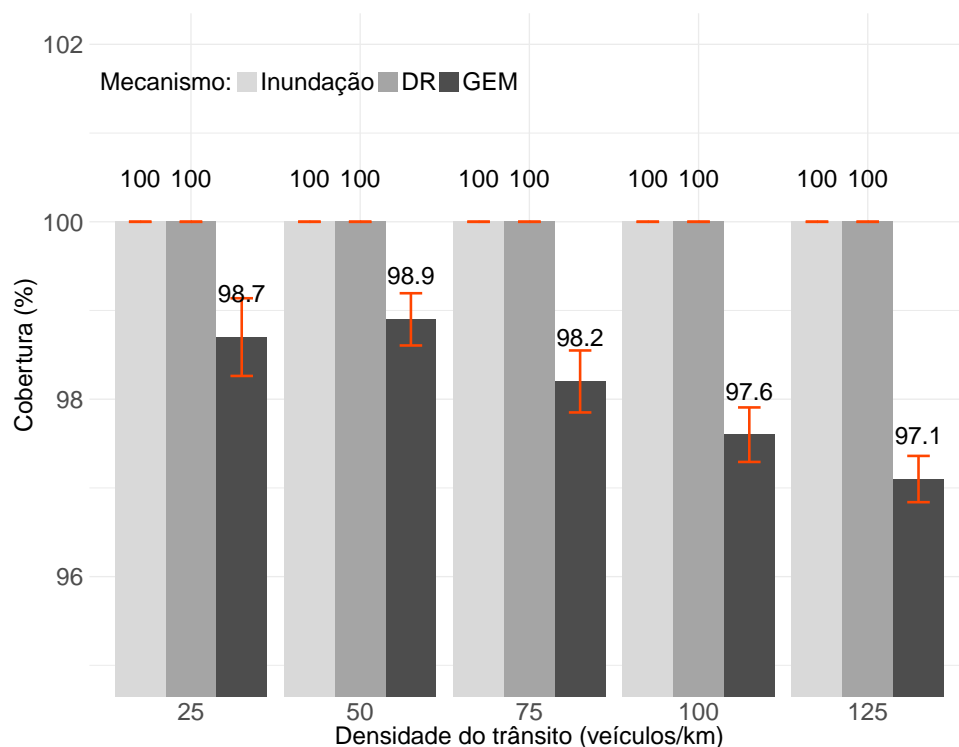


Figura 4.9: Gráfico da cobertura da ZdI de acordo com a densidade do trânsito, comparando os protocolos Inundação, DR e GEM.

A cobertura da ZdI é uma das métricas mais importantes, pois se trata da porcentagem de veículos que receberam a mensagem transmitida e, supondo que essa mensagem possa carregar informações sobre um evento crítico, se algum veículo não recebê-la poderá provocar um acidente. Sabendo disso, espera-se que a taxa de cobertura esteja o mais próximo possível de 100%.

Observando a Figura 4.9, notamos que pela primeira vez o protocolo GEM apresentou um desempenho inferior aos seus concorrentes. Sua cobertura variou de 98,7% até 97,1%, o que significa que nos cenários mais densos até 3 veículos poderiam deixar de receber a mensagem, em uma seção de 1 km da via, enquanto que os protocolos Inundação e DR alcançaram 100% de cobertura em todas as densidades de trânsito. Esse resultado pode ser justificado pelo fato de que o GEM minimiza o quantitativo de mensagens enviadas, enquanto que os outros mecanismos realizam muitos envios desnecessários, mas que eventualmente cobrem os veículos que não receberam a mensagem. Os motivos para ocorrer essa falha de cobertura do protocolo GEM e as possíveis soluções serão abordados no próximo capítulo.

Neste capítulo, apresentamos uma proposta de protocolo de difusão *geocast*, chamado Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast (GEM), cujo objetivo é distribuir mensagens de alerta entre os veículos para melhorar as condições de segurança no trânsito, evitando possíveis acidentes. Em seguida, realizamos uma análise comparativa entre o protocolo GEM e os protocolos Inundação e DR, avaliando métricas como: quantidade de saltos, número de transmissões e colisões, atraso na difusão da mensagem e cobertura da Zona de Interesse. No geral, concluímos que nossa proposta obteve melhor desempenho que as outras abordagens comparadas. No próximo capítulo, abordaremos uma característica da propagação de sinal no ambiente veicular que pode gerar lacunas na cobertura da difusão de mensagens.

Capítulo 5

GEM-C

No capítulo anterior apresentamos a proposta do Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast desenvolvido para realizar a difusão de mensagens entre veículos no sistema de trânsito, de forma eficiente, diminuindo o número de transmissões e o atraso de entrega. Comparado com dois protocolos reativos frequentemente encontrados na literatura, o GEM obteve o melhor desempenho e demonstrou ser uma solução promissora para a tarefa de difusão *geocast* em redes VANET. O único parâmetro em que o GEM não sobressaiu foi a cobertura da Zona de Interesse, pois, ao contrário dos outros mecanismos, ele não foi capaz de alcançar todos os veículos.

O objetivo deste capítulo é encontrar a causa da falha de cobertura do protocolo GEM e desenvolver uma solução que melhore o seu desempenho. A Seção 5.1 abordará o problema de interrupção da conexão e a Seção 5.2 apresentará alguns trabalhos que buscam resolver esse problema. Nossa solução desenvolvida para o protocolo GEM, chamada GEM-C, será descrita na Seção 5.3 e os resultados dessa solução serão apresentados na Seção 5.4.

5.1 Área de Interrupção da Conexão

Como vimos na Seção 2.5.2, a propagação de sinal no ambiente veicular sofre a ação da propagação multicaminho, onde a onda refletida no solo causa interferência na onda transmitida diretamente. Essa interferência por vezes será construtiva ou destrutiva. Também vimos que o modelo que melhor demonstra esse efeito é o modelo de Interferência de Dois Raios (TRI). Na Figura 5.1 está representada a propagação de um sinal emitido com potência de 50 mW. A área verde indica o alcance de transmissão onde os veículos conseguem compreender a mensagem transmitida e a área vermelha indica onde o sinal não tem potência suficiente para que o veículo receba a mensagem. O que determina o limite para que uma mensagem possa ser compreendida pelo receptor é a sensibilidade do rádio utilizado. Estabelecemos o **limite da sensibilidade** como -89 dBm, ilustrado na

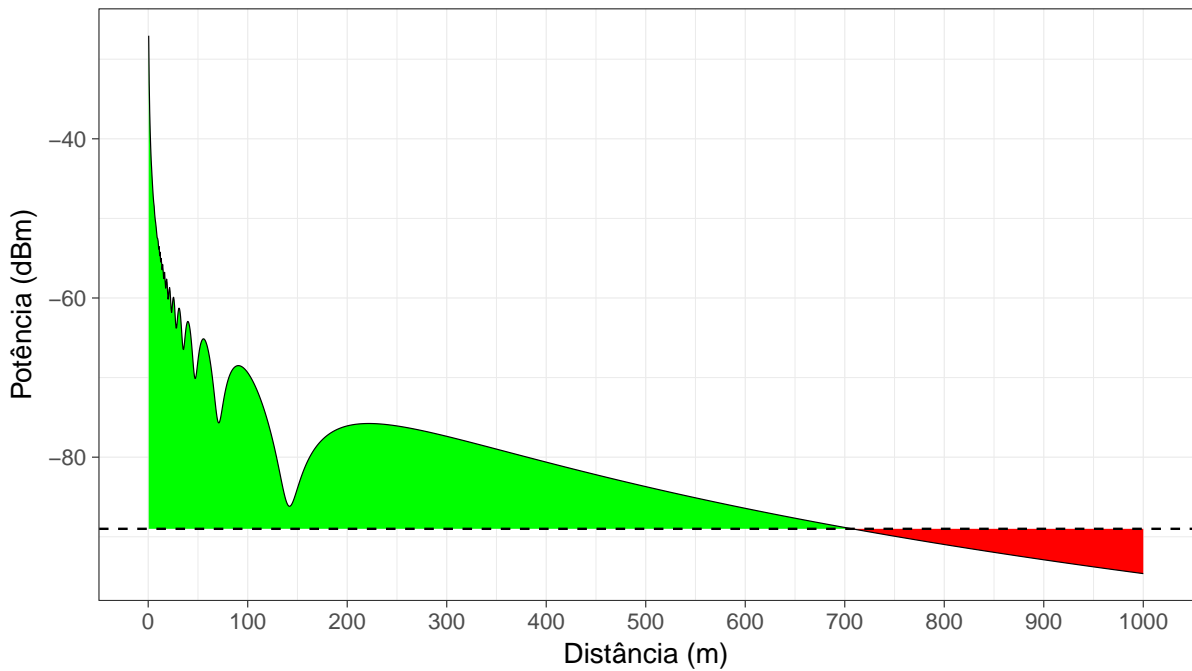


Figura 5.1: Modelo TRI para a propagação de um sinal de 50 mW com antenas de recepção e transmissão a 1,9 m de altura.

imagem como uma linha tracejada. As antenas de transmissão e recepção estão a uma altura de 1,9 m.

A interferência da propagação multicaminho, quando é destrutiva, gera pontos de depressão na potência de propagação do sinal (como aquele próximo de 150 m na Figura 5.1). Aparentemente, esses pontos de depressão não influenciam na recepção da mensagem pelos veículos dentro do alcance de transmissão, mas se diminuirmos a potência de transmissão para 7 mW, de modo a obter um alcance de transmissão de 395 m (como na Figura 5.2), aparecerá dentro da região de conexão uma área entre os pontos 129 m e 160 m onde a potência do sinal estará abaixo do limite de sensibilidade. Os veículos que estiverem dentro dessa área de interrupção não receberão a mensagem transmitida, mesmo estando dentro do alcance de transmissão [61] [9].

Essa característica do ambiente veicular pode explicar o fato de o protocolo GEM não alcançar 100% de cobertura mesmo cobrindo toda a Zona de Interesse. Com um alcance de transmissão de 395 m, são necessários 3 saltos para cobrir uma ZDI de 1000 m. Sendo assim, haverá três áreas de interrupção de 31 m, totalizando 93 m de área sem cobertura do protocolo, ou seja, 9,3% da ZDI. Se os veículos estiverem uniformemente espaçados no cenário, podemos considerar que 9,3% não receberão a mensagem transmitida. Mas esse valor pode ser menor supondo que há a chance de um veículo dentro da área de interrupção receber a mensagem quando esta for enviada pelo próximo encaminhador.

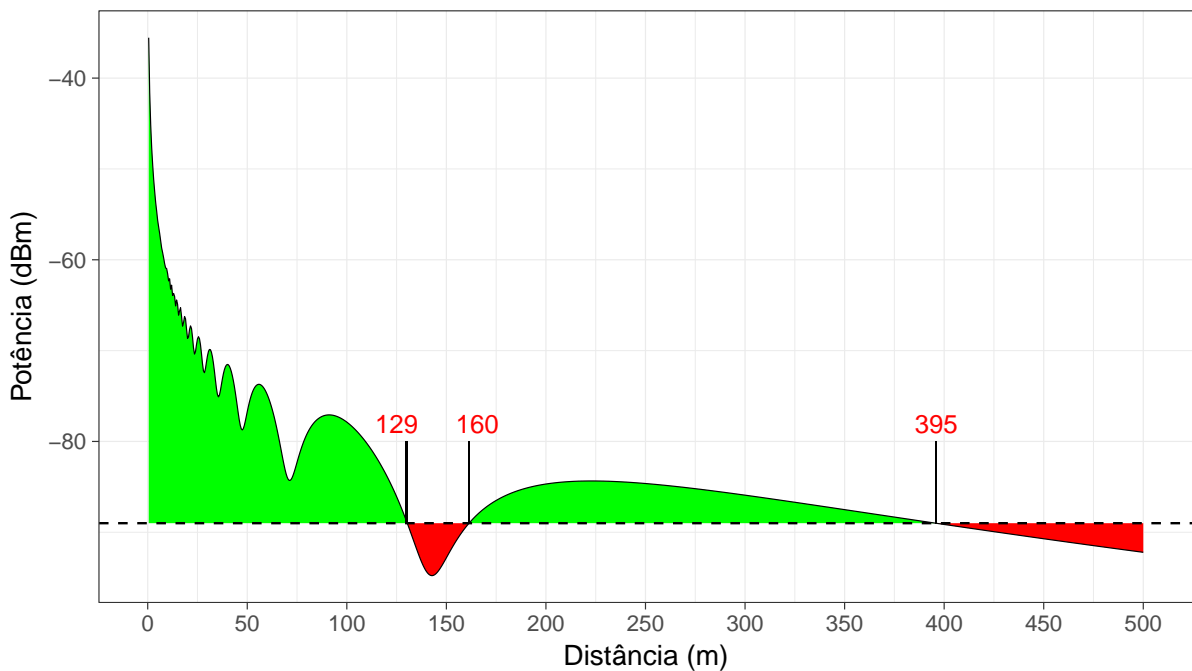


Figura 5.2: Propagação de um sinal de 7 mW destacando a área de interrupção da comunicação entre as distâncias 129 e 160 m e o alcance de transmissão de 395 m.

Dessa forma, os quase 3% de veículos que não foram cobertos pelo protocolo GEM, como vimos na Seção 4.2.3, poderão ser cobertos se for aplicada uma solução que cancele o efeito das áreas de interrupção.

5.2 Abordagens da Literatura

Em trabalhos encontrados na literatura, é comum os autores lidarem com o problema da interferência multicaminho através da técnica de diversidade de antena, como em [61] e [9]. A diversidade de antena, ou diversidade espacial, consiste em modificar o posicionamento das antenas de transmissão e recepção de modo a anular a interferência destrutiva. Essa técnica possui fundamento, pois como vimos na Seção 2.5.2, nas equações 2.4 e 2.5, a interferência entre a onda transmitida diretamente e a onda refletida é causada pela diferença de fase entre as duas ondas, que depende diretamente da altura das antenas e da distância entre elas.

Sangho Oh *et al.* [61] analisaram a influência que a diversidade espacial da antena de um veículo pode exercer sobre a potência recebida, através de medidas realizadas em um experimento real. Eles instalaram cinco antenas no teto de um veículo, variando a sua posição horizontal, e uma antena dentro do veículo, variando assim 40 cm na sua posição vertical. A partir dos resultados obtidos, foi possível observar que a diversidade horizontal

das antenas não gerou diferença significativa na potência recebida, o que pode ser justificado pelo fato de os veículos estarem em movimento, anulando a mudança horizontal.

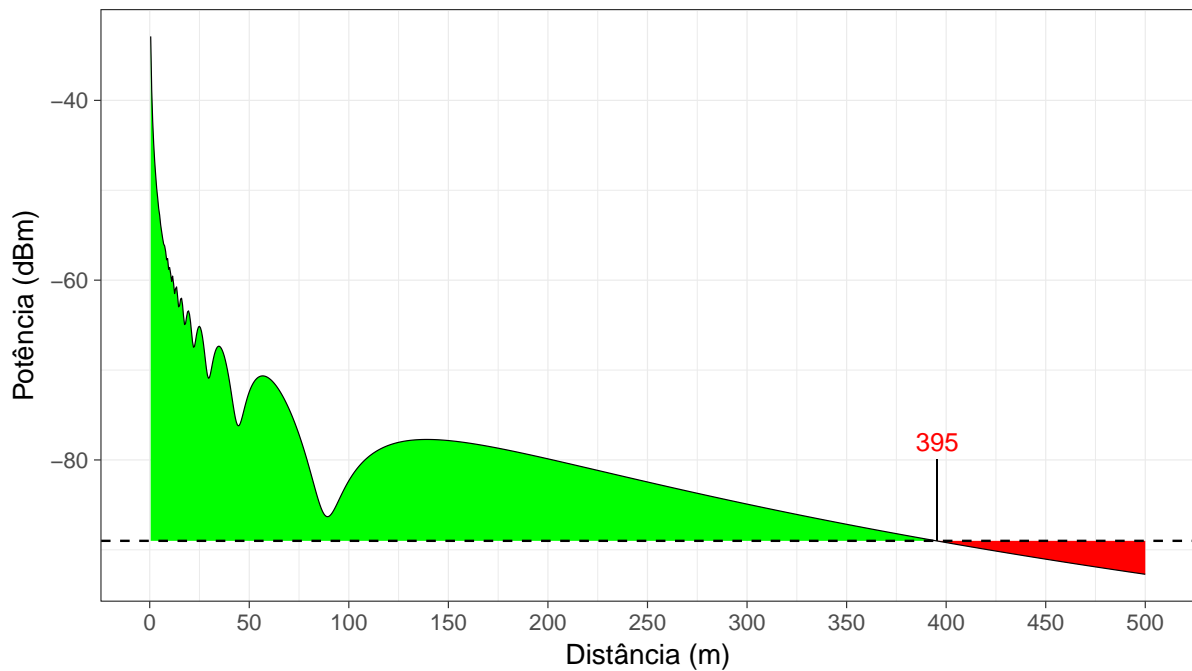


Figura 5.3: Propagação de um sinal de 13,2 mW com o alcance de transmissão de 395 m, mas sem área de interrupção da comunicação.

Já a diversidade vertical da antena colocada dentro do veículo gerou melhores resultados na potência recebida, principalmente por atenuar o efeito das áreas de interrupção. Podemos notar essa diferença na Figura 5.3 que apresenta o modelo TRI com a altura das antenas em 1,5 m e a potência de transmissão corrigida para 13,2 mW, para se obter o mesmo alcance de transmissão apresentado na Figura 5.2, onde as antenas estavam à altura de 1,9 m. Através da variação de 40 cm na altura da antena, seria possível, teoricamente, eliminar a área de interrupção.

Karlsson *et al.* [9] trataram de forma diferente a abordagem de diversidade de antena. Eles instalaram duas antenas no retrovisor de um caminhão com uma distância vertical entre as duas de 63 cm e combinaram o sinal recebido pelas antenas de forma a sempre utilizar aquele com maior potência. Na Figura 5.4, temos o resultado obtido, onde $A1$ indica o sinal recebido pela antena com 2,76 m de altura e $A2$ o sinal recebido pela antena com 2,13 m de altura. Como podemos notar, onde o sinal recebido por uma antena apresentava uma depressão, na outra antena ele chegava com potência maior. Dessa forma, após combinar os dois sinais, a área de interrupção é compensada.

Na literatura encontramos poucos trabalhos que tratam do problema de interferência da propagação multicaminho em redes veiculares. Embora esse problema já tenha sido

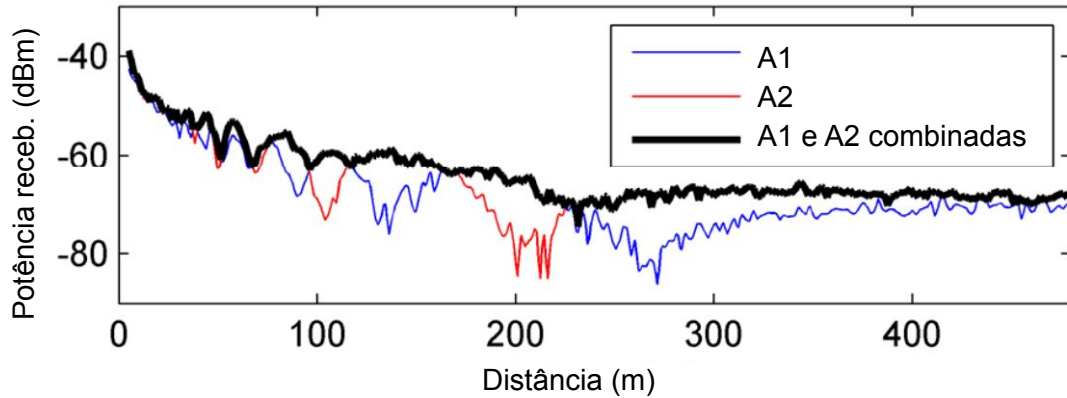


Figura 5.4: Combinação do sinal de duas antenas com separação vertical. A antena *A1* está a 2,76 m de altura e a antena *A2* está a 2,13 m de altura (Adaptado de [9]).

abordado em outras áreas de aplicação, o desafio agora é adaptar as soluções encontradas levando em consideração as características próprias do ambiente veicular.

5.3 Escolha de Encaminhadores com Cobertura da Área de Interrupção

No desenvolvimento de uma solução para o problema das áreas de interrupção da conexão em redes VANET, optamos por empregar um procedimento que utiliza a informação da vizinhança do nó para escolher encaminhadores que garantam a cobertura da área de interrupção. A solução se baseia no fato de que, ao transmitir a mensagem, essa se propaga em todas as direções. Dessa forma, se um veículo não recebeu uma mensagem transmitida por outro veículo, porque estava dentro da área de interrupção, ele poderá recebê-la quando o próximo veículo escolhido como encaminhador transmitir a mensagem. Mas, para isso, é necessário garantir que o veículo não estará também dentro da área de interrupção do próximo encaminhador.

Utilizando o exemplo da Seção 5.1, podemos supor alguns casos onde vizinhos em diversas distâncias são escolhidos para realizar a transmissão da mensagem. Os resultados de cada escolha foram ilustrados na Figura 5.5, considerando que todos os veículos estão transmitindo com a mesma potência e possuem a mesma sensibilidade de rádio. Observe que o veículo que realiza o primeiro envio da mensagem tem sua propagação de sinal em cor verde e está sempre na posição 0 e o vizinho que transmite o segundo salto da mensagem tem a propagação em cor azul e é identificado pela etiqueta “Encaminhador”; a região vermelha indica a área de interrupção onde os veículos não receberam a mensagem. A propagação da mensagem no meio sem fio sempre se dá em todas as direções, mas para

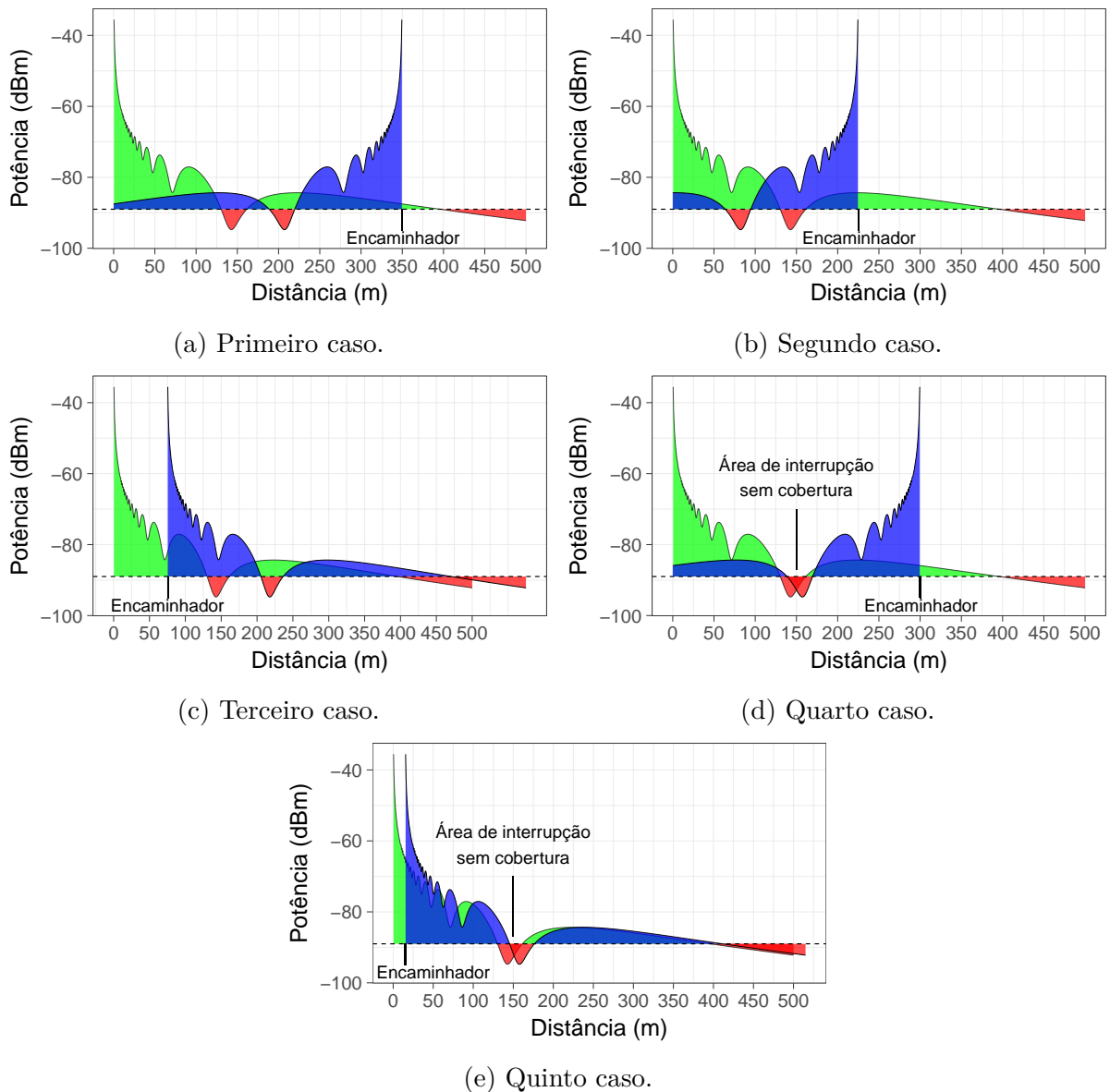


Figura 5.5: Casos possíveis de escolhas de encaminhadores que podem ou não cobrir os nós que estão na área de interrupção. O primeiro, segundo e terceiro caso realizam a cobertura, o quarto e quinto caso não.

simplicar, representamos a propagação em um meio unidimensional, pois a estrutura de uma rodovia, em larga escala, sugere também uma forma unidimensional. Representamos somente a propagação que se direciona para a cobertura da área de interrupção.

No primeiro, segundo e terceiro caso, o encaminhador selecionado realiza a transmissão da mensagem, e o seu sinal (área azul) cobre a área de interrupção do envio anterior, mesmo se estiver atrás da área de interrupção, como no terceiro caso. Já no quarto e quinto caso, a cobertura não é totalmente realizada pelo encaminhador, pois a sua área de interrupção faz interseção com a área de interrupção do nó de origem, e qualquer veículo

que esteja dentro dessa interseção não receberá a mensagem. Dessa forma, podemos supor que há duas zonas onde o vizinho não deve ser escolhido para o encaminhamento, uma mais próxima do nó que origina a mensagem e outra após a área de interrupção. Fora dessas zonas, qualquer vizinho proverá cobertura para a área de interrupção.

Levando em consideração essas informações, concluímos que o mecanismo de escolha de encaminhadores será mais eficiente se souber identificar em quais zonas os encaminhadores devem ser escolhidos. Por esse motivo, precisamos determinar um método para encontrar as zonas de encaminhamento.

5.3.1 Delimitação das Zonas de Encaminhamento

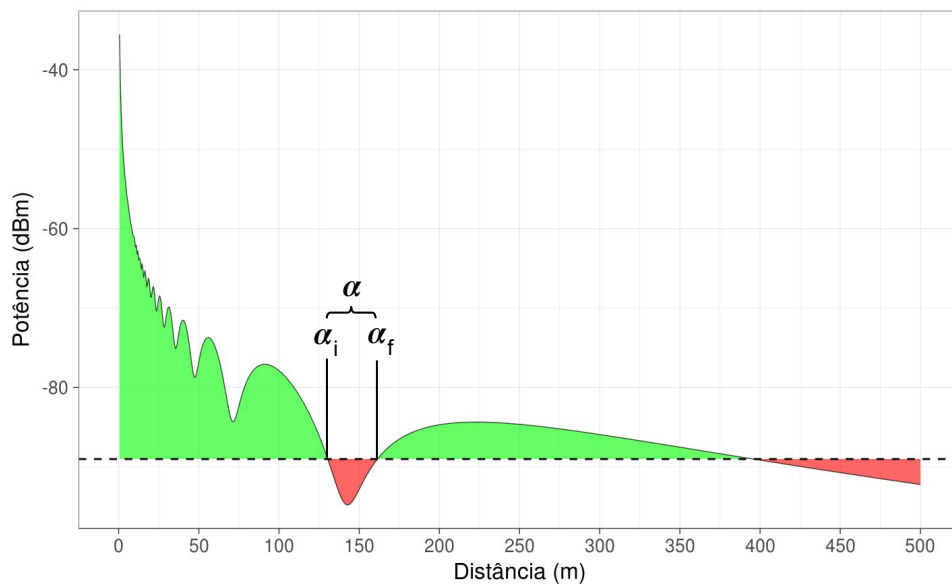


Figura 5.6: Demarcação da área de interrupção.

Para se delimitar as zonas de onde devem ser escolhidos os vizinhos para o encaminhamento, primeiramente, precisamos calcular a posição e o comprimento da área de interrupção. Utilizando o modelo de propagação, conforme a ideia apresentada na Seção 5.1, definimos

$$\alpha = [\alpha_i, \alpha_f], \quad (5.1)$$

sendo α o intervalo que delimita a área de interrupção e α_i e α_f os pontos inicial e final desse intervalo, como demarcado na Figura 5.6.

Sabemos que, se um vizinho estivesse o mais próximo possível do nó inicial, as suas áreas de interrupção estariam em interseção. Portanto, partindo do ponto 0, o vizinho mais próximo que não faria interseção estaria à distância equivalente ao comprimento da

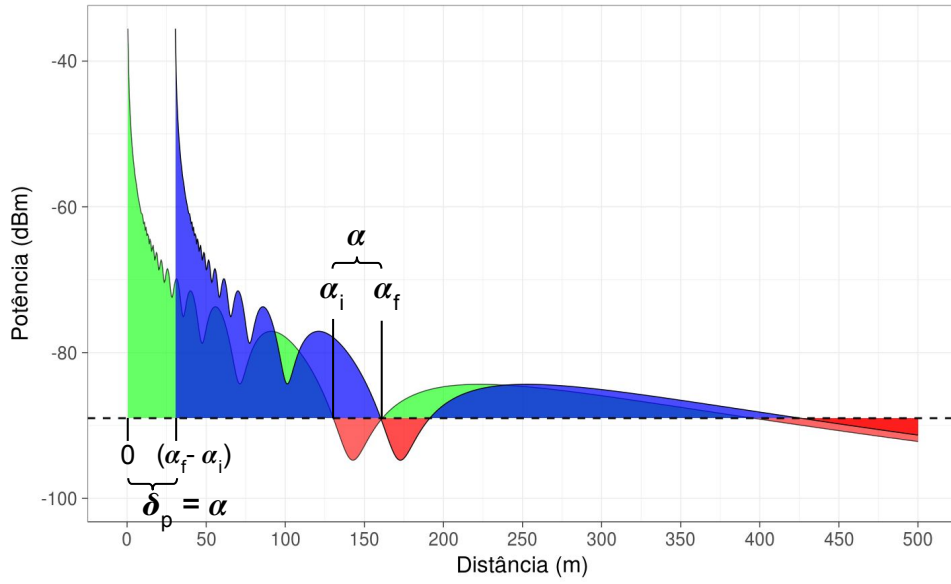


Figura 5.7: Demarcação da primeira zona δ_p .

área de interrupção, como mostra a Figura 5.7. Por isso, podemos definir a primeira zona não apropriada para o encaminhamento como

$$\delta_p = [\delta_{pi}, \delta_{pf}], \quad (5.2)$$

sendo

$$\begin{aligned} \delta_{pi} &= 0, \\ \delta_{pf} &= \alpha_f - \alpha_i, \end{aligned} \quad (5.3)$$

onde δ_{pi} denota o início dessa zona e δ_{pf} o final.

A partir daí, todos os vizinhos podem cobrir os veículos desconectados, até que as áreas de interrupção se encontrem novamente, como na Figura 5.8, onde o vizinho encaminhador está à distância equivalente ao dobro do início da área de interrupção. A partir desse ponto, as duas áreas de interrupção estarão em interseção até que o vizinho esteja a uma distância onde o fim da sua área de interrupção ultrapasse o fim da área de interrupção do nó inicial, como na Figura 5.9. Dessa forma, podemos definir a segunda zona não apropriada para o encaminhamento como

$$\delta_s = [\delta_{si}, \delta_{sf}], \quad (5.4)$$

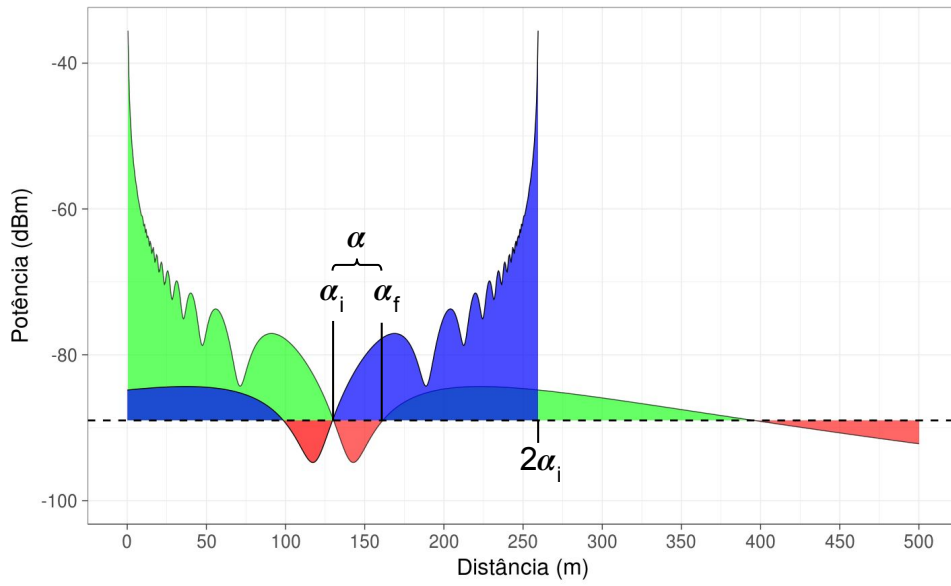


Figura 5.8: As áreas de interrupção se interseccionam novamente quando o vizinho está à distância igual a $2\alpha_i$.

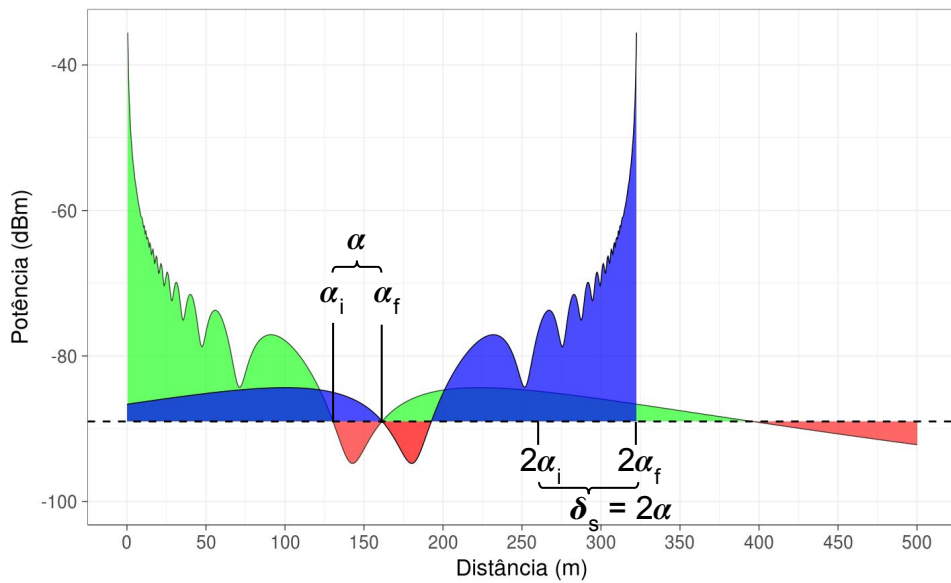


Figura 5.9: Termina a interseção entre as área de interrupção no ponto $2\alpha_f$. A segunda zona que não é propícia para a escolha de encaminhadores, definida como δ_s , fica entre os pontos $2\alpha_i$ e $2\alpha_f$.

sendo

$$\begin{aligned} \delta_{si} &= 2\alpha_i, \\ \delta_{sf} &= 2\alpha_f, \end{aligned} \tag{5.5}$$

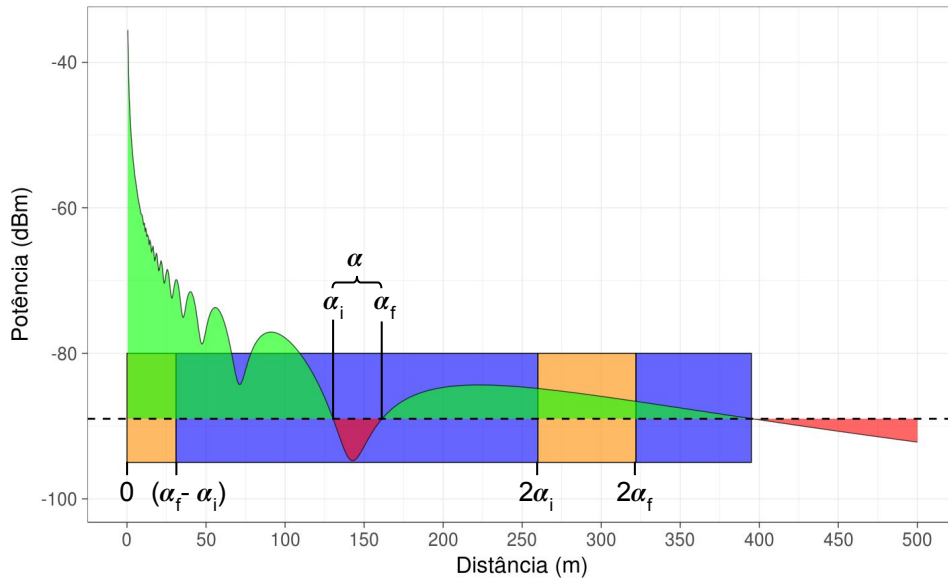


Figura 5.10: Demarcação das zonas de escolha dos encaminhadores para prover cobertura para a área de interrupção. Os vizinhos escolhidos nas zonas azuis proveem cobertura, os escolhidos nas zonas laranjas não proveem.

onde δ_{si} indica o início da segunda zona e δ_{sf} indica o final. Reunindo essas informações na Figura 5.10, delimitamos as zonas que não são propícias para o encaminhamento com a cor laranja e as zonas de encaminhamento com a cor azul.

Para saber se um vizinho, localizado à distância V_n , poderá prover cobertura para a área de interrupção, devemos verificar se ele atende à expressão

$$(\delta_{pf} < V_n \wedge V_n < \delta_{si}) \vee \delta_{sf} < V_n, \quad (5.6)$$

ou seja, ele deve estar após a posição δ_{pf} e antes da posição δ_{si} , ou após a posição δ_{sf} . Se o resultado for verdadeiro, então o nó pertence ao conjunto dos vizinhos que proveem cobertura para a área de interrupção, se o resultado for falso, então ele pertence ao conjunto dos vizinhos que não proveem cobertura para a área de interrupção.

5.3.2 Adaptação do GEM

Agora que definimos uma forma de escolher os vizinhos encaminhadores, o próximo passo é modificar o Algoritmo 2 de ranqueamento para levar em consideração a cobertura da área de interrupção da conexão, gerando assim o Algoritmo 4. No Passo 2f, ele verifica se os candidatos a serem encaminhadores cobrem ou não a área de interrupção e os divide em duas listas, uma para os que cobrem e outra para os que não cobrem. Depois, no Passo 3, ele ordena as listas pelo Fator de Preferência e as concatena, colocando os nós

Algorithm 4 Ranqueamento de encaminhadores com cobertura da área de interrupção

- **Passo 1:** Após receber a tabela de vizinhos N , verifica se consegue alcançar a borda da Zdl com o seu raio de transmissão, pois se o nó consegue cobrir o resto da Zdl então não é necessário escolher os próximos encaminhadores. Retorna a lista de candidatos V vazia. **Fim.**
- **Passo 2:** Se ele não consegue cobrir toda a Zdl, então itera sobre cada vizinho da tabela realizando a filtragem:
 - **Passo 2a:** A partir das informações do *beacon*, calcula a previsão da posição atual do vizinho seguindo a Equação 4.1.
 - **Passo 2b:** Verifica se o vizinho está dentro da Zdl, se ele não estiver então é descartado do cálculo.
 - **Passo 2c:** Verifica se o vizinho segue o sentido de difusão, se ele não seguir então é descartado do cálculo.
 - **Passo 2d:** Verifica se o vizinho está dentro do intervalo $\delta \cdot r_{tx}$ na borda do alcance de transmissão, se ele estiver então é descartado do cálculo.
 - **Passo 2e:** Com a previsão da posição do vizinho, calcula o Fator de Preferência seguindo a Equação 4.4.
 - **Passo 2f:** Verifica se o vizinho cobre a área de interrupção a partir da Equação 5.6. Se sim, então adiciona-o na lista de candidatos com cobertura, senão adiciona-o na lista de candidatos sem cobertura.
- **Passo 3:** Ordena as listas de candidatos com cobertura e sem cobertura pelo Fator de Preferência e concatena as duas, de forma que os candidatos que proveem cobertura fiquem no início da lista. A lista resultante da concatenação é chamada lista de candidatos V e é retornada pelo algoritmo. **Fim.**

que proveem cobertura no início, de modo que eles recebam prioridade no momento da escolha dos encaminhadores.

Com essas modificações, chegamos à adaptação do protocolo GEM, chamada GEM-C pois realiza a cobertura da área de interrupção, e esperamos corrigir o problema de cobertura do protocolo GEM durante a difusão de mensagens *geocast*. Os resultados serão avaliados na próxima seção.

5.4 Avaliação da Melhoria

Após a definição do protocolo GEM-C, repetiremos as simulações realizadas no Capítulo 4. O objetivo é verificar quais impactos essa mudança gerou no desempenho do mecanismo e se houve melhora na cobertura dos nós dentro da Zona de Interesse, que foi o objetivo

principal da adaptação. Para mais informações sobre as métricas utilizadas, os ambientes de simulação e o tratamento dos dados consulte a Seção 4.2.

5.4.1 Resultados

É possível que a adaptação do mecanismo de escolha de encaminhadores levando em consideração a cobertura da área de interrupção da conexão gere impacto na distância média dos saltos, pois em situações onde os veículos mais distantes estiverem dentro da zona que não provê cobertura, serão escolhidos encaminhadores mais próximos. A Figura 5.11 apresenta as distâncias médias de salto para os protocolos GEM e GEM-C. Como esperado, ao se realizar a cobertura da área de interrupção, ocorreu uma redução na distância de salto por volta de 4%, chegando a 10% na menor densidade de veículos.

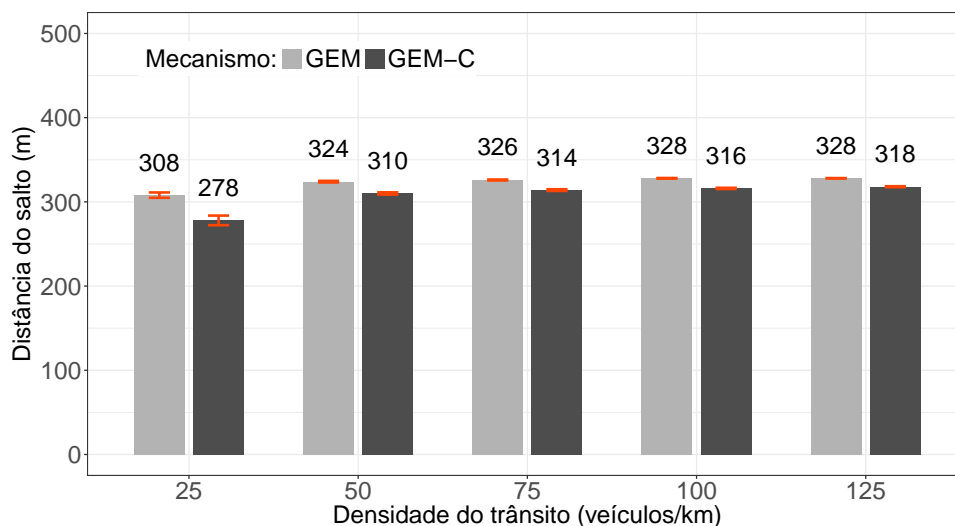
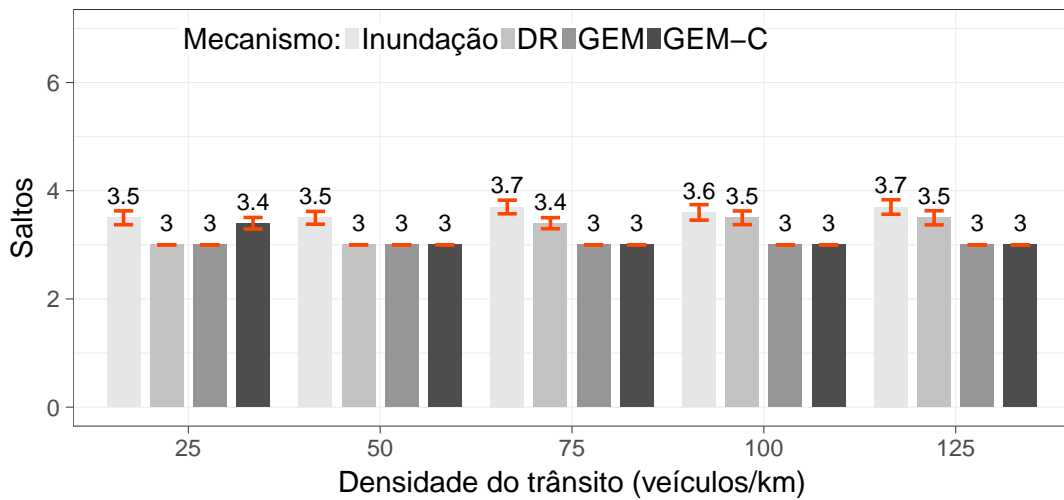
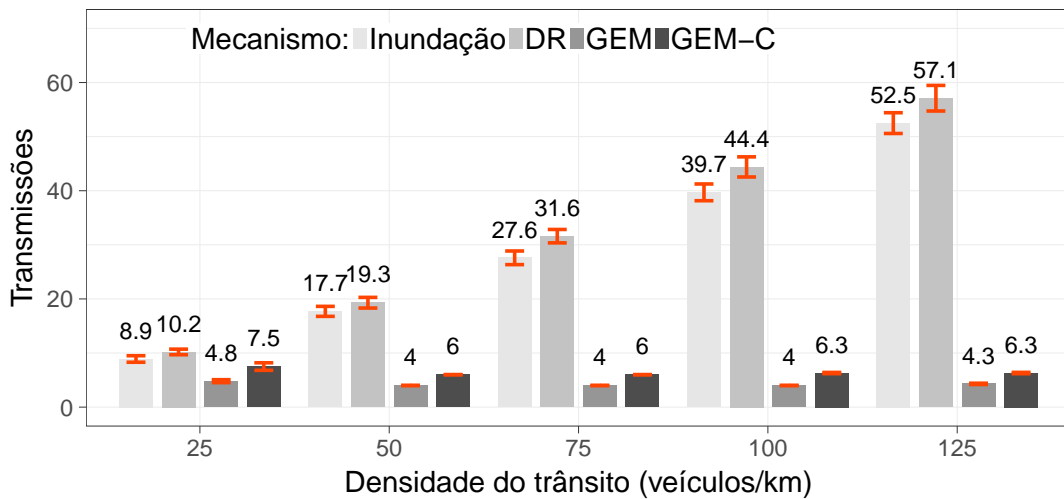


Figura 5.11: Gráfico da distância média dos saltos realizados pela mensagem com cobertura (GEM-C) e sem cobertura (GEM) da área de interrupção, de acordo com a densidade do trânsito.

Comparando as métricas definidas no Capítulo 4, podemos observar nas Figuras 5.12 e 5.13 a diferença entre o protocolo GEM com e sem cobertura da área de interrupção. Na quantidade de saltos para cobrir a ZdI (Figura 5.12a), o resultado foi idêntico em ambos os casos, com exceção do cenário de 25 veículos/km onde o GEM-C subiu para 3,4 saltos em média. O número de transmissões realizadas (Figura 5.12b) sofreu um aumento em todos os cenários de aproximadamente 50%. Os registros de colisão sofreram um aumento médio de 25% em todos os cenários (Figura 5.13a). Com relação ao atraso gasto para cobrir a ZdI (Figura 5.13b), semelhante ao número de saltos, a única mudança se deu no cenário de 25 veículos/km, passando de 2,3 para 2,5 ms. Por último, alcançamos 100% de cobertura em todos os cenários (Figura 5.13c) após a adaptação do protocolo. No geral,



(a) Saltos para cobrir a ZDI.

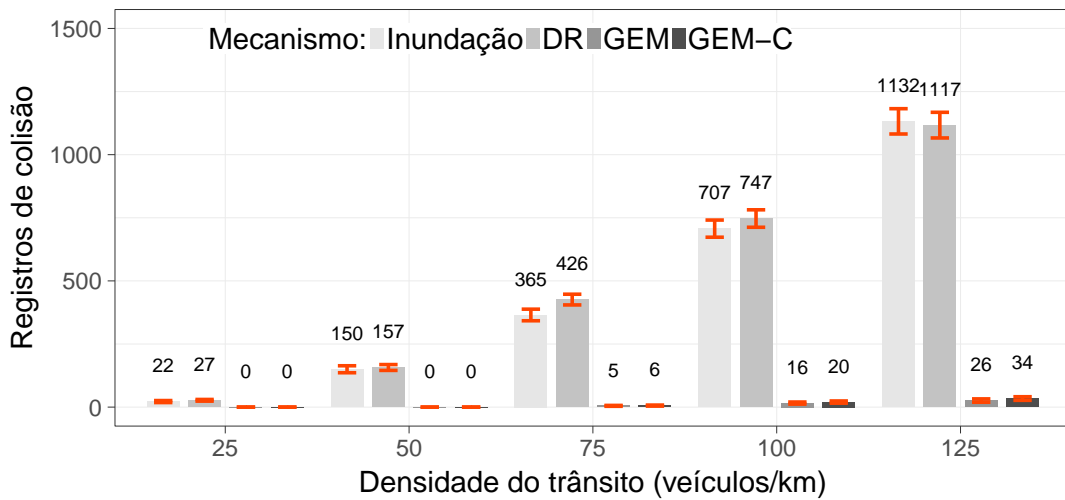


(b) Transmissões da mensagem durante a difusão.

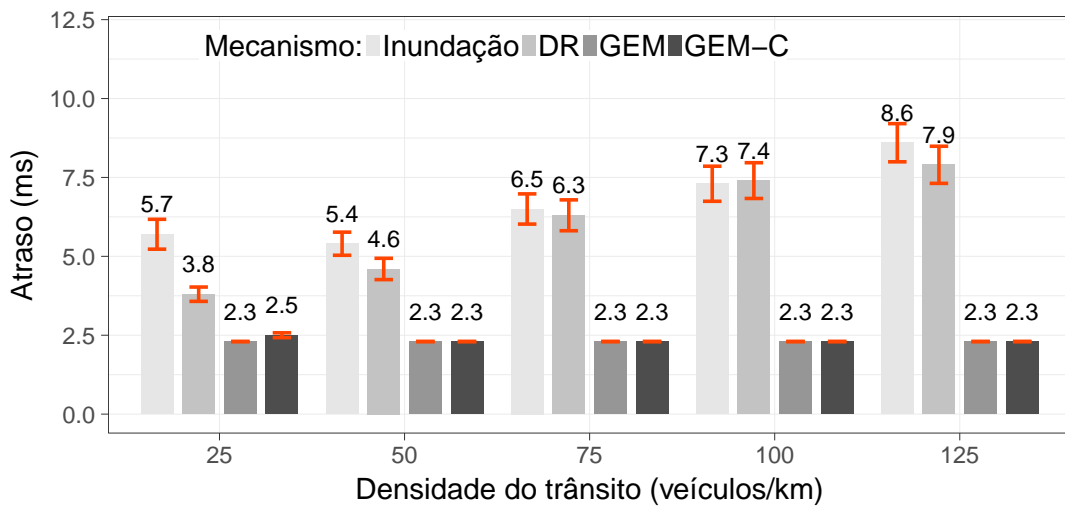
Figura 5.12: Gráficos com os resultados de saltos e transmissões, comparando os protocolos GEM e GEM-C.

o cenário que mais apresentou mudanças foi o de 25 veículos/km, devido ao fato de os veículos estarem mais afastados e assim se tornar mais difícil encontrar um vizinho que esteja além da zona sem cobertura.

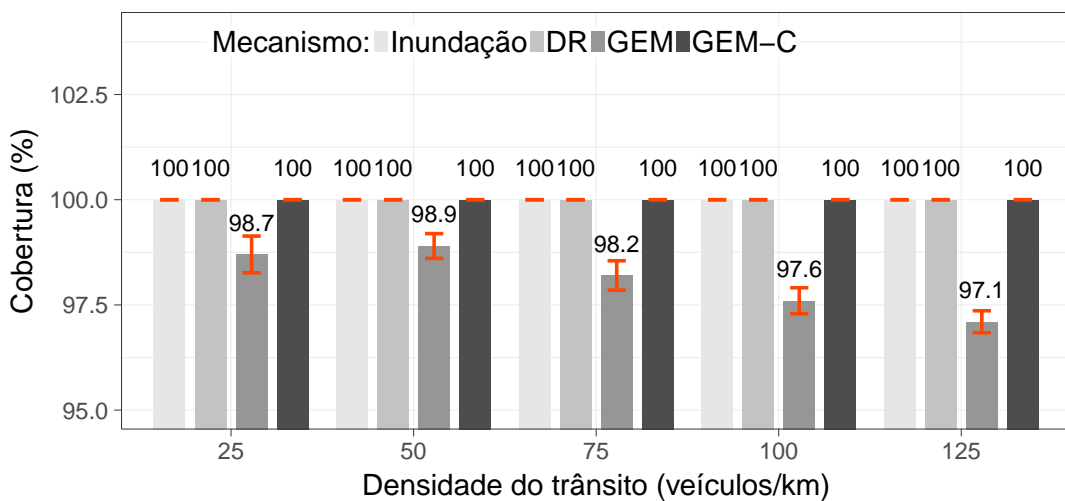
Devemos assumir que a adaptação do protocolo GEM gerou alguns impactos negativos na sua performance, mas a diferença desses impactos é mínima quando comparada com os resultados dos protocolos Inundação e DR. Além disso, a cobertura do mecanismo foi elevada para 100%, alcançando assim o objetivo principal da mudança. Desse modo, podemos considerar que a adaptação GEM-C foi bem sucedida.



(a) Registros de colisão durante a difusão.



(b) Atraso para cobrir a ZdI.



(c) Cobertura dos veículos na ZdI.

Figura 5.13: Gráficos com os resultados de colisões, atraso e cobertura, comparando os protocolos GEM e GEM-C.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Aprendemos, ao longo deste trabalho, que os Sistemas de Transporte Inteligentes (do Inglês, *Intelligent Transportation System* - ITS) surgiram como uma esperança de solução para o ambiente caótico de trânsito em que vivemos. Eles possibilitam a combinação de diversas tecnologias na construção de um sistema de transporte mais seguro e confortável para os usuários, mais econômico e rentável para o país e ecologicamente mais amigável. Vimos também que uma das tecnologias essenciais para o desenvolvimento do ITS é a Rede *Ad hoc* Veicular (do Inglês, *Vehicular Ad hoc Network* - VANET), uma estrutura de rede computacional onde veículos com conexão Wi-Fi podem se comunicar, possibilitando o desenvolvimento de aplicações que melhorem a forma como nos comportamos no trânsito.

De modo mais específico, estudamos os protocolos utilizados pelas aplicações de segurança de trânsito para a difusão de mensagens de alerta entre os veículos. Para proteger as pessoas de eventuais riscos no trânsito, esses mecanismos realizam a propagação de mensagens dentro de uma área geográfica, através da rede VANET, fornecendo informações sobre algum evento ocorrido. Este processo de difusão é chamado de *geocast*.

Apresentamos no Capítulo 3 seis trabalhos relacionados que buscaram realizar a tarefa de difusão *geocast* através de abordagens distintas e destacamos quais pontos poderiam ser melhorados. Dentre eles, podemos citar o protocolo DRG que utiliza a abordagem reativa na difusão *geocast* e contenção para a escolha dos encaminhadores. A partir desse trabalho e outros semelhantes, notamos que o uso de contenção gera maior atraso na entrega das mensagens e uma quantidade maior de transmissões, sendo que o envio periódico de *beacons* poderia ser uma alternativa mais eficiente. O protocolo ROVER proposto em [6], e outros trabalhos semelhantes, nos demonstraram que a abordagem proativa de construção de rotas gera muito atraso e pode não ser viável para aplicações de segurança de trânsito em um ambiente de topologia bastante volátil.

Após reunir este conhecimento, introduzimos no Capítulo 4 a proposta do Protocolo de Encaminhamento de Mensagens Geocast (GEM), um protocolo reativo de difusão *geocast*

que utiliza o envio de *beacons* para realizar a escolha dos vizinhos encaminhadores de forma robusta. Realizamos a simulação computacional do GEM em diversos cenários de trânsito e comparamos os resultados com duas propostas semelhantes: o protocolo Inundação e o Protocolo Reativo Baseado em Distância (do Inglês, *Distance-based Reactive Protocol* - DR) [55] [8], de modo a avaliar o desempenho alcançado por nossa proposta. A partir dos resultados obtidos, identificamos que algumas melhorias poderiam ser feitas para aumentar a cobertura do protocolo GEM. Sendo assim, propomos no Capítulo 5 uma adaptação para que o nosso mecanismo pudesse cobrir as áreas de interrupção da conexão, uma característica pouco abordada em outros trabalhos.

6.1 Conclusões Acerca dos Resultados

Os resultados obtidos a partir das simulações computacionais foram apresentados nos Capítulos 4 e 5. Podemos também considerar os resultados publicados anteriormente em [62]. Em suma, podemos observar que o protocolo GEM superou os outros protocolos comparados em todos os aspectos avaliados e alcançou também 100% de cobertura dos veículos. O seu desempenho foi satisfatório, pois revelou que a proposta é propícia para ser utilizada em aplicações de segurança de trânsito. Entre os resultados apresentados, damos destaque para a quantidade de transmissões 13 vezes menor e a quantidade de colisões 43 vezes menor que as apresentadas pelos outros mecanismos, na densidade de tráfego mais alta.

Outro ponto que deve ser observado é a estabilidade apresentada pelo protocolo GEM mesmo com a mudança na densidade do tráfego. Enquanto nos protocolos Inundação e DR os valores de transmissão, colisão e atraso cresceram proporcionais ao aumento na densidade do trânsito, no protocolo GEM estes mesmos parâmetros permaneceram estáveis. Esse resultado se deve ao uso dos *beacons* em substituição ao uso de contenção como método de escolha dos encaminhadores. A escolha baseada na informação dos *beacons* compartilhados é precisa e evita a desorganização entre os nós que pode gerar transmissões desnecessárias e aumentar o número de colisões.

Essa estabilidade demonstra que a nossa proposta possui escalabilidade para operar em cenários com alta densidade de trânsito, sem sofrer perdas no seu desempenho e nem comprometer outras aplicações em execução na rede; como também para operar em cenários de baixa densidade, onde a disponibilidade de nós encaminhadores é menor e podem ocorrer desconexões temporárias.

6.2 Trabalhos Futuros

No funcionamento do protocolo GEM, utilizamos informações compartilhadas através do envio periódico de *beacons* para construir uma visão da vizinhança de cada veículo. Sabemos que com o aumento da densidade do trânsito também aumenta a quantidade de *beacons* enviados e, conseqüentemente, a carga gerada na rede. Mas esse problema pode ser contornado utilizando técnicas de envio adaptativo de *beacons* que realizam a previsão da posição de cada veículo e modificam a frequência de envio de acordo com a exatidão da previsão. Investigaremos o uso dessas técnicas para melhorar a escolha dos nós encaminhadores no protocolo GEM e diminuir a sobrecarga na rede.

Outra modificação necessária para a nossa proposta é implementar uma técnica eficiente para lidar com as desconexões temporárias da rede. Algumas técnicas envolvem: reenvio periódico das mensagens, armazenamento temporário em memória *cache*, uso de infraestrutura de rede ou ainda encaminhamento através do fluxo contrário de veículos. Essa medida é importante para garantir o funcionamento do protocolo mesmo em cenários com pouca densidade de veículos, como em rodovias e estradas rurais.

Por fim, para verificar a aplicabilidade do protocolo GEM, realizaremos a simulação computacional em cenários mais complexos, como: cruzamentos, curvas, semáforos e cenários urbanos, e também competindo pelo uso da rede VANET com outras aplicações que consomem o canal, criando assim um cenário que mais se aproxima daquele o qual o ambiente de trânsito atual irá se tornar.

Referências

- [1] *What cause traffic jams? the physics behind you need to know.* <https://www.smartmotorist.com/traffic-jams>, acesso em 2019-09-30. ix, 2
- [2] IEEE: *Ieee guide for wireless access in vehicular environments (wave) - architecture.* IEEE Std 1609.0-2013, páginas 1–78, March 2014. ix, 5, 6, 8, 10, 11
- [3] *Ieee standard for wireless access in vehicular environments (wave) – multi-channel operation.* IEEE Std 1609.4-2016 (Revision of IEEE Std 1609.4-2010), páginas 1–94, March 2016. ix, 11
- [4] *Veins documentation.* <https://veins.car2x.org/documentation/>, acesso em 2019-09-30. ix, 22
- [5] Bachir, A. e A. Benslimane: *A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast.* Em *The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring.*, volume 4, páginas 2456–2460 vol.4, April 2003. ix, 3, 27, 28, 29, 47
- [6] Kihl, Maria, Mihail Sichitiu, Ted Ekeroth e Michael Rozenberg: *Reliable geographical multicast routing in vehicular ad-hoc networks.* páginas 315–325, janeiro 2007. x, 3, 27, 32, 70
- [7] Chen, Y., Y. Lin e S. Lee: *A mobicast routing protocol in vehicular ad-hoc networks.* Em *GLOBECOM 2009 - 2009 IEEE Global Telecommunications Conference*, páginas 1–6, Nov 2009. x, 3, 27, 33, 34
- [8] Felice, Marco, Luca Bedogni e Luciano Bononi: *Group communication on highways: An evaluation study of geocast protocols and applications.* *Ad Hoc Networks*, 11:818–832, maio 2013. x, 3, 16, 27, 34, 35, 47, 71
- [9] Karlsson, K., J. Carlsson, M. Olbäck, T. Vukusic, R. Whiton, S. Wickström, G. Ledfelt e J. Rogö: *Utilizing two-ray interference in vehicle-to-vehicle communications.* Em *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014)*, páginas 2544–2547, April 2014. x, 57, 58, 59, 60
- [10] International, SAE: *Dedicated short range communications (dsrc) message set dictionary j2735.* páginas 1–267, Novembro 2016. xii, 8, 9
- [11] *Quanto tempo os brasileiros gastam no trânsito por ano?* <https://www.itransport.com.br/quanto-tempo-os-brasileiros-gastam-no-transito-por-ano/>, acesso em 2019-09-30. 1

- [12] *Brasil perde r\$ 267 bilhões por ano com congestionamentos.* <https://g1.globo.com/globonews/noticia/2018/08/07/brasil-perde-r-267-bi-por-ano-com-congestionamentos.ghtml>, acesso em 2019-09-30. 1
- [13] Infraestrutura, Ministério da: *Anuário estatístico de segurança rodoviária 2010 - 2017*, 2017. 1
- [14] Infraestrutura, Ministério da: *Anuário estatístico de transportes 2010 - 2018*, 2018. 1
- [15] *Motor vehicle safety data.* <https://www.bts.gov/content/motor-vehicle-safety-data>, acesso em 2019-09-30. 1
- [16] Joshi, Harshvardhan, Mihail Sichitiu e Maria Kihl: *Distributed robust geocast multicast routing for inter-vehicle communication.* Proceedings of WEIRD Workshop on WiMax, Wireless and Mobility, maio 2007. 3, 27, 30, 47
- [17] Auer, Ashley, Shelley Feese e Stephen Lockwood: *History of Intelligent Transportation Systems.* U.S. Department of Transportation (USDOT), 2016. 5, 7
- [18] Devangavi, A. D. e R. Gupta: *Routing protocols in vanet — a survey.* Em *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)*, páginas 163–167, Aug 2017. 5, 6, 14, 15, 16
- [19] Singh, S. e S. Agrawal: *Vanet routing protocols: Issues and challenges.* Em *2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences (RAECS)*, páginas 1–5, March 2014. 6, 12
- [20] Allal, S. e S. Boudjit: *Geocast routing protocols for vanets: Survey and guidelines.* Em *2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, páginas 323–328, July 2012. 6, 14
- [21] Booyesen, M. J., S. Zeadally e G. . van Rooyen: *Survey of media access control protocols for vehicular ad hoc networks.* IET Communications, 5(11):1619–1631, July 2011, ISSN 1751-8628. 6, 13
- [22] *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.* IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012), páginas 1–3534, Dec 2016. 7, 11, 12
- [23] *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.* IEEE Std 802.11p-2010 (Amendment to IEEE Std 802.11-2007 as amended by IEEE Std 802.11k-2008, IEEE Std 802.11r-2008, IEEE Std 802.11y-2008, IEEE Std 802.11n-2009, and IEEE Std 802.11w-2009), páginas 1–51, July 2010. 7

- [24] International, SAE: *Dedicated short range communication (dsrc) systems engineering process guidance for sae j2945/x documents and common design conceptsTM j2945_201712*. páginas 1 – 81, Dezembro 2017. 8
- [25] Uzcategui, R. A., A. J. De Sucre e G. Acosta-Marum: *Wave: A tutorial*. IEEE Communications Magazine, 47(5):126–133, May 2009, ISSN 0163-6804. 8
- [26] Transportation (US DOT), U.S. Department of: *International collaboration on its research*. https://www.its.dot.gov/research_areas/international_research_progress.htm, acesso em 2019-09-30. 8
- [27] Kurose, James e Keith Ross: *Computer Networking: A Top-Down Approach*. Pearson, 7^a edição, 2017. 8, 10, 12, 14, 16, 23
- [28] *Ieee standard for wireless access in vehicular environments (wave)– over-the-air electronic payment data exchange protocol for intelligent transportation systems (its)*. IEEE Std 1609.11-2010, páginas 1–62, Jan 2011. 9
- [29] Schmidt, R. K., T. Leinmuller, E. Schoch, F. Kargl e G. Schafer: *Exploration of adaptive beaconing for efficient intervehicle safety communication*. IEEE Network, 24(1):14–19, Jan 2010, ISSN 0890-8044. 9
- [30] Administration, National Highway Traffic Safety: *Vehicle safety communications project task 3 final report*. IEEE Network, Março 2005. 9
- [31] Saha, S., U. Roy e D. Sinha: *Aodv routing protocol modification with dqueue(dqaodv) for vanet in city scenarios*. Em *2014 International Conference on High Performance Computing and Applications (ICHPCA)*, páginas 1–6, Dec 2014. 10
- [32] *Ieee standard for wireless access in vehicular environments (wave) – networking services*. IEEE Std 1609.3-2016 (Revision of IEEE Std 1609.3-2010), páginas 1–160, April 2016. 10
- [33] *Connected vehicle applications*. https://www.its.dot.gov/pilots/cv_pilot_apps.htm, acesso em 2019-09-30. 12
- [34] Zhang, S. e V. Cahill: *Reservation protocol: Towards collision-free transmission in vehicular ad-hoc networks (poster)*. Em *2011 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, páginas 268–275, Nov 2011. 13, 15
- [35] Casteigts, Arnaud, Amiya Nayak e Ivan Stojmenović: *Communication protocols for vehicular ad hoc networks*. Wireless Communications and Mobile Computing, 11:567 – 582, maio 2011. 14, 15, 27
- [36] Spaho, E., L. Barolli, G. Mino, F. Xhafa e V. Kolici: *Vanet simulators: A survey on mobility and routing protocols*. Em *2011 International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications*, páginas 1–10, Oct 2011. 14, 15, 18, 19, 21

- [37] Yassein, M. B., O. Khaoua e S. Papanastasiou: *Performance evaluation of flooding in manets in the presence of multi-broadcast traffic*. Em *11th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'05)*, volume 2, páginas 505–509, July 2005. 15, 27
- [38] *Connected vehicle pilot deployment program*. <https://www.its.dot.gov/pilots/index.htm>, acesso em 2019-09-30. 17
- [39] Ben Mussa, S. A., M. Manaf, K. Z. Ghafoor e Z. 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)*, páginas 1–8, Oct 2015. 17, 18, 20, 21
- [40] Lopez, Pablo Alvarez, Michael Behrisch, Laura Bieker-Walz, Jakob Erdmann, Yun Pang Flötteröd, Robert Hilbrich, Leonhard Lücken, Johannes Rummel, Peter Wagner e Evamarie Wießner: *Microscopic traffic simulation using sumo*. Em *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 2018. <https://elib.dlr.de/124092/>. 19, 20, 21, 35
- [41] *Quadstone paramics*. <http://www.paramics-online.com/index.php>, acesso em 2019-09-30. 19
- [42] *Transims*. <https://code.google.com/archive/p/transims/>, acesso em 2019-09-30. 19
- [43] *Ptv vissim*. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>, acesso em 2019-09-30. 19
- [44] *Ns-2 network simulator*. http://nslam.sourceforge.net/wiki/index.php/Main_Page, acesso em 2019-09-30. 20, 31, 35
- [45] *Ns-3 network simulator*. <https://www.nslam.org/>, acesso em 2019-09-30. 20
- [46] *Omnet++ website*. <https://omnetpp.org/>, acesso em 2019-09-30. 20, 21
- [47] Mangharam, R., D. Weller, R. Rajkumar, P. Mudalige e F. Bai: *Groovenet: A hybrid simulator for vehicle-to-vehicle networks*. Em *2006 Third Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking Services*, páginas 1–8, July 2006. 21
- [48] Piorkowski, Michal, Maxim Raya, Ada Lugo, Panos Papadimitratos, Matthias Grossglauser e Jean Pierre Hubaux: *Trans: Realistic joint traffic and network simulator for vanets*. ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review, 12, janeiro 2008. 21
- [49] Sommer, Christoph, Reinhard German e Falko Dressler: *Bidirectionally Coupled Network and Road Traffic Simulation for Improved IVC Analysis*. IEEE Transactions on Mobile Computing, 10(1):3–15, January 2011. 21

- [50] Wegener, Axel, Michal Piorkowski, Maxim Raya, Horst Hellbrück, Stefan Fischer e Jean Pierre Hubaux: *Traci: An interface for coupling road traffic and network simulators*, abril 2008. 22
- [51] Sommer, Christoph, Stefan Joerer e Falko Dressler: *On the Applicability of Two-Ray Path Loss Models for Vehicular Network Simulation*. Em *4th IEEE Vehicular Networking Conference (VNC 2012)*, páginas 64–69, Seoul, Korea, November 2012. IEEE. 23, 24, 25
- [52] Karedal, J., N. Czink, A. Paier, F. Tufvesson e A. F. Molisch: *Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 60(1):323–328, Jan 2011, ISSN 0018-9545. 25
- [53] Kunisch, J. e J. Pamp: *Wideband car-to-car radio channel measurements and model at 5.9 ghz*. Em *2008 IEEE 68th Vehicular Technology Conference*, páginas 1–5, Sep. 2008. 25
- [54] Dora, D. P., S. Kumar e O. Kaiwartya: *Efficient dynamic caching for geocast routing in vanets*. Em *2015 2nd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, páginas 979–983, Feb 2015. 27, 31
- [55] Palazzi, C. E., M. Rocchetti e S. Ferretti: *An intervehicular communication architecture for safety and entertainment*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 11(1):90–99, March 2010, ISSN 1524-9050. 27, 47, 71
- [56] Min-Te Sun, Wu-Chi Feng, Ten-Hwang Lai, K. Yamada, H. Okada e K. Fujimura: *Gps-based message broadcast for adaptive inter-vehicle communications*. Em *Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No.00CH37152)*, volume 6, páginas 2685–2692 vol.6, Sep. 2000. 29
- [57] Bajaj, Lokesh, Mineo Takai, Rajat Ahuja, Ken Tang, Rajive Bagrodia e Mario Gerla: *Glomosim: A scalable network simulation environment*. Relatório Técnico. 29
- [58] Barr, R., Z.J. Haas e R. van Renesse: *Scalable wireless ad hoc network simulation*. Em *Handbook on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad hoc Wireless, and Peer-to-Peer Networks*, páginas 297–311. CRC Press, 2005. 30, 33
- [59] Transportation (US DOT), U.S. Department of: *Vehicle based data and availability*. https://www.its.dot.gov/itspac/october2012/PDF/data_availability.pdf, acesso em 2019-09-30. 36
- [60] Mann, Prem S: *Introdução à Estatística*. LTC, 8ª edição, 2015. 49
- [61] Oh, S., S. Kaul e M. Gruteser: *Exploiting vertical diversity in vehicular channel environments*. Em *2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, páginas 958–962, Sep. 2009. 57, 58

- [62] Lima, T. A., P. V. G. Farias, M. F. Caetano e J. L. Bordim: *A fast message-delivery mechanism to support broadcast in vehicular ad hoc networks*. Em *2018 Sixth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)*, páginas 113–119, Nov 2018. 71