

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA PAULA ALVES TORRES

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS DSRC E LORA EM UM SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MÓVEL VEICULAR. ANÁLISE DE CASO: CENTRO POLITÉCNICO - JARDIM DAS AMÉRICAS

CURITIBA

2019

ANA PAULA ALVES TORRES

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS TECNOLOGIAS DSRC E LORA EM UM
SISTEMA DE COMUNICAÇÃO MÓVEL VEICULAR: ANÁLISE DE CASO: CENTRO
POLITÉCNICO - JARDIM DAS AMÉRICAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Telecomunicações, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Horácio Tertuliano Filho

Coorientador: Prof. Dr. César Augusto Dartora

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

T693a

Torres, Ana Paula Alves

Avaliação de desempenho das tecnologias DSRC e LORA em um sistema de comunicação móvel veicular. Análise de caso: Centro Politécnico -Jardim das Américas [recurso eletrônico] /Ana Paula Alves Torres. – Curitiba, 2019.

Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Horácio Tertuliano Filho. Coorientador: César Augusto Dartora.

1. Algoritmos genéticos. 2. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários. 3. Sistemas de comunicação móvel. I. Universidade Federal do Paraná. II. Tertuliano Filho, Horácio. III. Dartora, César Augusto. IV. Título.

CDD: 519.625

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
ELÉTRICA - 40001016043P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANA PAULA ALVES TORRES** intitulada: **Avaliação de Desempenho das Tecnologias DSRC e LORA em um Sistema de Comunicação Móvel Veicular. Análise de Caso: Centro Politécnico – Jardim das Américas**, sob orientação da Prof. Dr. HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 30 de agosto de 2019.

Dr. HORACIO TERTULIANO DOS SANTOS FILHO

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA)

EVELIO MARTÍN GARCÍA FERNÁNDEZ

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao meu orientador Prof. Dr. Horácio Tertuliano Filho pela orientação e incentivo a ingressar nesta caminhada. Ao meu Coorientador Prof. Dr. César Augusto Dartora pelo apoio e contribuições.

Aos colegas Theoma, Rafael, Raiff, Marisa e Silas pela prontidão e ensinamentos, com um agradecimento especial ao Claudio que teve papel fundamental no sucesso desta dissertação.

Ao Laboratório de Magnetismo, Medidas e Instrumentação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPR pela contribuição na obtenção dos resultados e a todos os funcionários do departamento.

A minha mãe Maria pelo apoio nos momentos de difíceis e por sempre me incentivar a fazer o meu melhor.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

A comunicação veicular é um fato, um caminho sem volta. Espera-se que os novos veículos, num futuro muito próximo, sejam mais eficientes e mais conectados entre si e com o mundo ao seu redor, constituindo a comunicação de veículo com veículo (V2V) e veículo com a infraestrutura (V2I). Os desafios tecnológicos, porém, são imensos, podendo exigir a troca de informações em altíssima velocidade, confiabilidade e baixíssimo tempo de latência das redes em determinadas aplicações. Algumas tecnologias já estão em estágios satisfatórios de desenvolvimento, mas nenhuma ainda se tornou a solução definitiva. Para diversas aplicações, a DSRC (*Dedicated Short Range Communications*) operando na frequência de 5,9 GHz surge como sendo uma solução para a comunicação veicular. Porém ela tem grandes limitações devido a seu baixo alcance e penetração mesmo ao se empregar as unidades de beira de estrada (RSU) que auxiliam a comunicação entre veículos. Uma tecnologia, com possibilidades de minimizar estas limitações é a LoRa (*Long Range*) a qual tem maior nível de espalhamento do sinal e maior facilidade de penetração em obstáculos por operar em frequências inferiores a 1 GHz podendo ser viável em aplicações que demandem menos caracteres na transmissão de mensagens e para situações onde não seja necessário o envio frequente de pacotes. O objetivo geral deste trabalho é o de avaliar a comunicação entre veículos utilizando a tecnologia LoRa e, também avaliar o canal de comunicação LoRa e DSRC em um mesmo cenário. Os resultados foram obtidos e se avaliou a potência recebida e a taxa de recepção do sinal através de simulações para ambas tecnologias sendo desenvolvido um algoritmo genético para determinar a posição das RSUs. Também, foram realizados testes de campo para o LoRa, em comunicações V2I e V2V além de um teste sem movimento analisando-se a potência do sinal, taxa de recebimento e relação sinal-ruído em função da distância entre o receptor e transmissor para distintos fatores de espalhamento (SF7 e SF12). Com a simulação do canal foi verificada a maior taxa de recepção do sinal acima do limiar para o LoRa, especialmente em situações de obstrução por edificações e o baixo alcance do DSRC com perda total do sinal a 500 metros. Com os testes de campo avaliando o LoRa foi constatado o maior alcance de recepção desta tecnologia com recebimentos de pacotes a mais de 1 km (SF12), percebeu-se também a influência da velocidade (efeito *Doppler*) e a diferença na taxa de recepção entre os SFs com o SF12 sendo mais sensível ao efeito da velocidade, porém mantendo um alcance maior em relação ao SF7.

Palavras-chave: Algoritmos genéticos. Comunicação veicular. DSRC. LoRa. V2I. V2V.

ABSTRACT

Vehicle communication is a fact, a way of no return. New vehicles in the very near future are expected to be more efficient and more connected to each other and to the world around them, constituting the vehicle-to-vehicle communication (V2V) and vehicle-to-infrastructure communication (V2I). The technological challenges, however, are immense and may require the exchange of information at very high speeds, reliability and very low latency in certain applications. Some technologies are already in satisfactory stages of development, but none have yet become the definitive solution. For various applications, Dedicated Short Range Communications (DSRC) at the 5.9 GHz frequency emerges as a solution for vehicular communication. However, it has major limitations due to its low range and penetration even when employing roadside units (RSU) that aid communication between vehicles. A technology that can minimize these limitations is LoRa (Long Range) which has a higher spreading signal and easier obstacle penetration by operating at frequencies below 1 GHz, being viable in applications with fewer transmitted characters in messages and for situations where frequent packet sending is not required. The aim of this dissertation is to evaluate the communication between vehicles using LoRa technology and assess the V2I communication channel in both LoRa and DSRC in the same scenario. The results were obtained, and the received power and the signal reception rate were evaluated through simulations for both technologies. A genetic algorithm was developed to determine the position of the RSUs. Also, field tests were performed for LoRa in V2I and V2V communications as well as a motionless test; signal strength, reception rate and signal to noise ratio as a function of the distance between receiver and transmitter for different spreading factors (SF7 and SF12) were analyzed. With the channel simulation, highest signal reception rates above the threshold were verified with LoRa especially in building obstruction scenarios and the DSRC's low communication range with total signal loss at 500 meters. From the LoRa field tests evaluation, it was found that the longest reception range of this technology is over 1 km (SF12), it was also noticed the influence of the speed (Doppler effect) and the difference in the reception rate between SFs with SF12 being more sensitive to the effect of velocity, but maintaining a longer range compared to SF7.

Key words: Genetic algorithms. Vehicular communication. DSRC. LoRa. V2I. V2V.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA TRANSMISSÃO	16
FIGURA 2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO MULTIPERCURSO.....	20
FIGURA 3 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO EFEITO DOPPLER.....	21
FIGURA 4 – ARQUITETURA DA COMUNICAÇÃO VEICULAR.....	22
FIGURA 5 – FAIXA DE FREQUÊNCIA PARA APLICAÇÕES DSRC	23
FIGURA 6 – ESTRUTURA DO PACOTE LORA	25
FIGURA 7 – DESCRIÇÃO DA ELIPSE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO GEMV2	26
FIGURA 8 – EXPERIMENTO MODELAGEM FOLHAGEM COM OBSTÁCULO	28
FIGURA 9 – TERMINOLOGIA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS	32
FIGURA 10 – FUNCIONAMENTO DOS AGS	33
FIGURA 11 – EXEMPLO DE SELEÇÃO POR TORNEIO	36
FIGURA 12 – ÁREA SELECIONADA NO WEBSITE OPENSTREETMAP	40
FIGURA 13 – (a) SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO EM TEMPO IGUAL A T1. (b) SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO EM TEMPO IGUAL A T2. (c) SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO EM TEMPO IGUAL A T3.....	41
FIGURA 14 – LOCALIZAÇÕES DAS 50 RSUS INICIAIS.....	42
FIGURA 15 – LOCALIZAÇÕES DAS 9 RSUS FINAIS	44
FIGURA 16 – SEQUÊNCIA DE PROCEDIMENTOS.....	45
FIGURA 17 – PLACA HELTEC ESP32 LORA	46
FIGURA 18 – ANTENA STEELBRAS AP39000	46
FIGURA 19 – EQUIPAMENTO DE TESTES.....	47
FIGURA 20 – ANTENA POSICIONADA NO TETO DO VEÍCULO	48
FIGURA 21 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA TESTES SEM VELOCIDADE	48
FIGURA 22 – FLUXOGRAMA DA SIMULAÇÃO DSRC	50
FIGURA 23 – FLUXOGRAMA DO TESTE DE CAMPO LORA.....	51
FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DA COLETA DE DADOS VEÍCULO COM BASE FIXA	52
FIGURA 25 – MAPA DE COBERTURA DOS PONTOS COM DOIS VEÍCULOS PARADOS	56
FIGURA 26 – MAPA DOS PACOTES RECEBIDOS - V2I.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – EFEITOS NO CANAL DE PROPAGAÇÃO	18
GRÁFICO 2 – MODULAÇÃO LORA	24
GRÁFICO 3 – GRÁFICO DA PERDA ATRAVÉS DE FOLHAGEM	28
GRÁFICO 4 – EXEMPLO DE SELEÇÃO POR ROLETA	35
GRÁFICO 5 – POTÊNCIA RECEBIDA SIMULADA V2I	53
GRÁFICO 6 – TAXA DE RECEPÇÃO SIMULADA V2I	55
GRÁFICO 7 – POTÊNCIA DO SINAL COM DOIS VEÍCULOS PARADOS	57
GRÁFICO 8 – RELAÇÃO SINAL-RUÍDO COM DOIS VEÍCULOS PARADOS	58
GRÁFICO 9 – POTÊNCIA DO SINAL - V2I.....	60
GRÁFICO 10 – TAXA DE RECEPÇÃO V2I	61
GRÁFICO 11 – RELAÇÃO SINAL-RUÍDO V2I.....	62
GRÁFICO 12 – POTÊNCIA DO SINAL V2V	63
GRÁFICO 13 – TAXA DE RECEPÇÃO V2V	64
GRÁFICO 14 – RELAÇÃO SINAL-RUÍDO V2V	65

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÃO DO PADRÃO IEEE 802.11P	23
TABELA 2 – PARÂMETROS LORA.....	24
TABELA 3 – DESVIOS PADRÕES V2V.....	30
TABELA 4 – DESVIOS PADRÕES V2I.....	30
TABELA 5 – EXEMPLO DE INDIVÍDUOS - SELEÇÃO ROLETA.....	35
TABELA 6 – PESOS DO ALGORITMO GENÉTICO	43
TABELA 7 – LOCALIZAÇÃO DAS 9 RSUS	44
TABELA 8 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.....	45
TABELA 9 – PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO LORA	47
TABELA 10 – LOCALIZAÇÃO DOS 8 PONTOS.....	49
TABELA 11 – SINAL ACIMA DO LIMAR V2I SIMULADO	54
TABELA 12 – LEGENDA DO MAPA DE COBERTURA COM DOIS VEÍCULOS PARADOS	57
TABELA 13 – PORCENTAGEM DE PACOTES RECEBIDOS V2I - LORA.....	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	PRINCIPIOS DA PROPAGAÇÃO.....	16
2.1.1	Mecanismos de propagação.....	17
2.1.1.1	Reflexão	17
2.1.1.2	Difração.....	17
2.1.1.3	Espalhamento/Dispersão	17
2.1.2	Efeitos no canal de propagação	18
2.1.2.1	Perda de percurso	18
2.1.2.2	Sombreamento.....	19
2.1.2.3	Pequena escala.....	19
2.1.2.3.1	Propagação por multipercurso.....	19
2.1.2.3.2	Efeito Doppler.....	20
2.2	COMUNICAÇÃO VEICULAR	22
2.2.1	Tecnologia DSRC.....	22
2.2.2	Tecnologia LoRa	23
2.2.3	Modelo de propagação eficiente baseado em geometria para comunicação V2V (GEMV ²)	25
2.2.3.1	Modelo grande escala	27
2.2.3.1.1	Modelo para comunicações com visada direta	27
2.2.3.1.2	Modelo para comunicação obstruída por veículos.....	27
2.2.3.1.3	Modelo para comunicação através de folhagem.....	28
2.2.3.1.4	Modelo para comunicação obstruída por construções.....	29
2.2.3.2	Modelo de pequena escala	29
2.3	ALGORITMO GENÉTICO	31
2.3.1	Terminologia	31
2.3.2	Funcionamento.....	33
2.4	TRABALHOS RELACIONADOS	37
3	METODOLOGIA	39
3.1	SIMULAÇÃO	39

3.2	TESTES DE CAMPO	45
3.3	FLUXOGRAMA	49
3.3.1	Fluxograma da simulação	50
3.3.2	Fluxograma do teste de campo	51
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	SIMULAÇÃO	53
4.1.1	Resultados e análise das simulações V2I.....	53
4.1.1.1	Taxa de recepção.....	54
4.2	TESTE DE CAMPO - LORA.....	55
4.2.1	Resultados e análises dos testes com ambos os veículos parados.....	55
4.2.1.1	Potência do sinal recebido	57
4.2.1.2	Relação Sinal-Ruído do sinal recebido.....	58
4.2.2	Resultados e análise dos testes V2I	59
4.2.2.1	Mapas de cobertura	59
4.2.2.2	Potência recebida.....	60
4.2.2.3	Taxa de recepção.....	61
4.2.2.4	Relação sinal/ruído.....	62
4.2.3	Resultados e análise dos testes V2V	63
4.2.3.1	Potência recebida.....	63
4.2.3.2	Taxa de recepção.....	64
4.2.3.3	Relação Sinal/Ruído (SNR).....	65
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	66
5.1	TRABALHOS FUTUROS	67
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Através da comunicação veicular, espera-se que os novos veículos sejam mais eficientes e mais conectados entre si constituindo o que se chama de comunicação de veículo com veículo, do inglês *Vehicle to Vehicle* (V2V) e também com a infraestrutura do inglês *Vehicle to infra-structure* (V2I), tal junção também é conhecida em inglês como *Vehicle-to-everything* (V2X) (JIANG *et al.*, 2006; KAIWARTYA *et al.*, 2016; MOUSTAFA; ZHANG, 2019; OLARIU ; WEIGLE, 2017). Ou seja, o que se deseja é que os veículos compartilhem diferentes tipos de informações que podem propiciar uma variedade de aplicações, tais como: segurança, eficiência do tráfego e conforto/entretenimento (OMAR; LU; ZHUANG, 2016; ZHANG *et al.*, 2013).

Atualmente, as tecnologias celulares e a comunicação dedicada de curto alcance também conhecida do inglês *Dedicated Short Range Communications* (DSRC) são os dois principais meios para serviços de dados veiculares. Com base em uma previsão de dados móveis da Cisco, o número de dispositivos móveis interconectados será superior a 11,6 bilhões até 2021, e os dados móveis globais excederão 49 exabytes por mês ao mesmo tempo sendo que já em 2016 o tráfego foi de 7,2 exabytes por mês. Deixando claro que simplesmente utilizar as redes celulares para o acesso de comunicações veiculares só pode piorar o problema de sobrecarga existente, degradando ainda mais o desempenho para os usuários (CISCO, 2016) .

A tecnologia de comunicação dedicada de curto alcance, foi a escolhida pela Comissão Federal de Comunicações dos Estados Unidos (FCC) para a comunicação veicular, sendo inclusive regulamentada para este fim em locais como a América do Norte, Europa e Japão. No entanto, esta tecnologia tem limitações no que diz respeito ao alcance, como o próprio nome sugere, além da possível inviabilidade da troca de informações entre veículos pois o sinal tem dificuldade de atravessar obstáculos como prédios e até mesmo outros veículos devido a frequência de operação que é de 5,9 GHz. Para se contornar estes problemas existem unidades de beira de estrada, do inglês *Roadside unit* (RSU) que posicionados ao longo das vias permitem que a informação chegue ao destino.

A efetividade do sistema V2I depende muito do posicionamento adequado dos RSUs, o correto posicionamento de cada RSUs torna a modelagem do sistema fundamental para se reduzir custos, mas principalmente evitar pontos cegos que

podem causar acidentes, este correto posicionamento pode ser tornar muito complexo pois deve-se levar em consideração a *layout* das ruas, a elevação do terreno, a densidade do tráfego, a presença ou não de veículos pesados como caminhões e ônibus, assim como árvores e vegetação, assim os algoritmos genéticos podem ser empregados para auxiliar a escolha destas localizações, porém o alcance mesmo com a utilização destes dispositivos ainda é restrito (GOZALVEZ; SEPULCRE; BAUZA, 2012).

Uma tecnologia, com possibilidades de minimizar as limitações de baixo alcance e pouca penetração sem a necessidade de utilização de RSUs é a tecnologia LoRa (*Long Range*), desenvolvida especificamente para cobertura de grandes áreas e por utilizar frequência inferior a 1 GHz é capaz de se propagar por obstáculos com mais facilidade apresentando menores perdas devido a propagação em espaço livre (LORA ALLIANCE, 2015).

O LoRa foi desenvolvido pela Cycleo de Grenoble, França, e adquirido pela Semtech em 2012, um membro fundador da LoRa Alliance. É uma tecnologia de comunicação sem fio, de longo alcance e baixo consumo de energia com aplicações em diversas áreas como agricultura, em áreas hospitalares, cidades inteligentes e na logística de negócios.

Existem diversas pesquisas avaliando a tecnologia com comunicações entre uma base fixa e um receptor móvel (AUGUSTIN *et al.*, 2016; PASCAL *et al.*, 2017; PETÄJÄJÄRVI *et al.*, 2017; LINKA *et al.*, 2018), porém a comunicação entre dois veículos tem sido pouco explorada (HERRERA-TAPIA *et al.*, 2017).

Os trabalhos sobre desempenho da tecnologia LoRa citados acima não avaliam a comunicação entre dois veículos em movimento, avaliando somente a comunicação entre um veículo e uma base muitas vezes posicionada no teto de edifícios podendo inviabilizar em muitos lugares a sua instalação devido ao tipo de construções no local.

Neste contexto o presente trabalho pretende avaliar a tecnologia LoRa com foco na comunicação veicular ao realizar testes de campo posicionando as bases ao longo da via além de realizar testes com tanto o transmissor como o receptor em movimento, analisando as métricas de desempenho de taxa de recepção, a potência do sinal recebido e a relação sinal-ruído em função de diferentes fatores de espalhamento e distâncias. Este trabalho também avalia o canal de comunicação tanto da tecnologia LoRa como o da tecnologia DSRC através de simulações,

analisando a potência recebida e a taxa de recebimento do sinal além de determinar o melhor posicionamento das RSUs dentro da área escolhida utilizando algoritmos genéticos.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é o de avaliar a comunicação entre veículos utilizando a tecnologia LoRa e DSRC. Para isso, tem-se os objetivos específicos que são:

- Caracterizar as tecnologias LoRa e DSRC;
- Utilizar algoritmos genéticos para determinar a localização das RSUs;
- Simular e analisar o canal de comunicação (V2V e V2I) para a tecnologia DSRC e LoRa;
- Adaptar equipamentos LoRa para comunicação veicular;
- Realizar testes de campo com a tecnologia LoRa com diferentes parâmetros;
- Avaliar o desempenho da tecnologia;

Pretende-se também com este trabalho avaliar a tecnologia LoRa em cenários onde o par comunicante está parado em diferentes pontos da área escolhida, bem como avaliar o canal de comunicação LoRa e DSRC com diferentes tipos de obstáculos em um mesmo cenário.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 apresentou uma visão geral da comunicação veicular bem como a definição dos objetivos a serem alcançados.

No capítulo 2 será abordado os fundamentos teóricos da propagação, da comunicação veicular e dos algoritmos genéticos além de ser apresentado o estado da arte.

No capítulo 3 é descrita a metodologia empregada neste trabalho, tanto para as simulações como para os testes de campo realizados.

O capítulo 4 traz os resultados obtidos em cada etapa, com estes divididos em resultados do canal de propagação simulado e testes de campo realizados.

Finaliza-se esta dissertação com as conclusões sobre os resultados obtidos e possíveis trabalhos futuros.

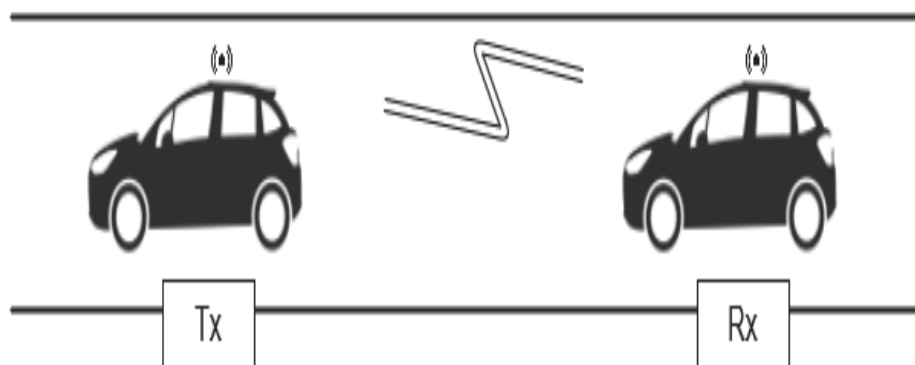
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos gerais de propagação do sinal principalmente sob a óptica de comunicações móveis, a comunicação veicular, a tecnologia DSRC, o simulador de comunicação veicular, a tecnologia LoRa, uma breve introdução aos algoritmos genéticos e os trabalhos relacionados.

2.1 PRINCIPIOS DA PROPAGAÇÃO

O principal objetivo na transmissão de um sinal é entregar a informação com a máxima fidelidade e é caracterizada pela geração no transmissor (Tx) de um sinal elétrico representando a informação desejada que irá se propagar no meio de transmissão e o receptor (Rx) que irá recuperar a informação do sinal elétrico transmitido (FIGURA 1). Quando o meio de propagação utilizado é o aéreo utilizam-se ondas eletromagnéticas para o envio dos sinais, estas ondas transmitidas podem chegar ao receptor por diferentes mecanismos de propagação, como reflexão, difração e espalhamento.

FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA TRANSMISSÃO



FONTE: A autora (2019).

Entre transmissor e receptor há vários fatores que podem afetar a propagação do sinal fazendo ele seja recebido degradado e ocorram erros na informação recebida, como a atenuação do sinal que ocorre principalmente pelo aumento da distância relativa entre transmissor e receptor e as características do meio como, por exemplo, o tipo de relevo, padrão de urbanização, obstáculos, variações climáticas e

atmosféricas. Pode ocorrer ainda distorção por atraso, principalmente quando há mobilidade relativa entre transmissor e receptor, chamado de efeito Doppler ou devido a multipercursos. (RAO, 2007).

2.1.1 Mecanismos de propagação

Um sinal se propaga em um meio urbano basicamente, de acordo com 3 mecanismos: reflexão, difração e/ou espalhamento (RAPPAPORT, 2010).

2.1.1.1 Reflexão

A reflexão ocorre quando o sinal se choca com uma superfície suficientemente grande em relação ao seu comprimento de onda, este choque pode ser com a superfície do solo, de obstáculos ou até de camadas atmosféricas. Existem dois tipos de reflexão a regular e a irregular ou difusa. A reflexão regular acontece em superfícies lisas, onde a onda incidente é refletida com o mesmo ângulo, já a reflexão irregular ou difusa acontece em superfícies rugosas, onde a onda incidente é refletida em diversas direções diferentes.

2.1.1.2 Difração

A difração é a aparente flexão da onda na borda de um obstáculo. Ela acontece quando um obstáculo como prédios, morros e vegetações com dimensões maiores que o comprimento de onda boqueiam o sinal entre a antena transmissora e receptora e de acordo como o princípio de Huygens, salienta que cada ponto localizado na frente de onda pode ser considerado como uma nova fonte para a geração de uma nova frente de onda e assim sucessivamente permitindo ao sinal ser recebido pelo receptor.

2.1.1.3 Espalhamento/Dispersão

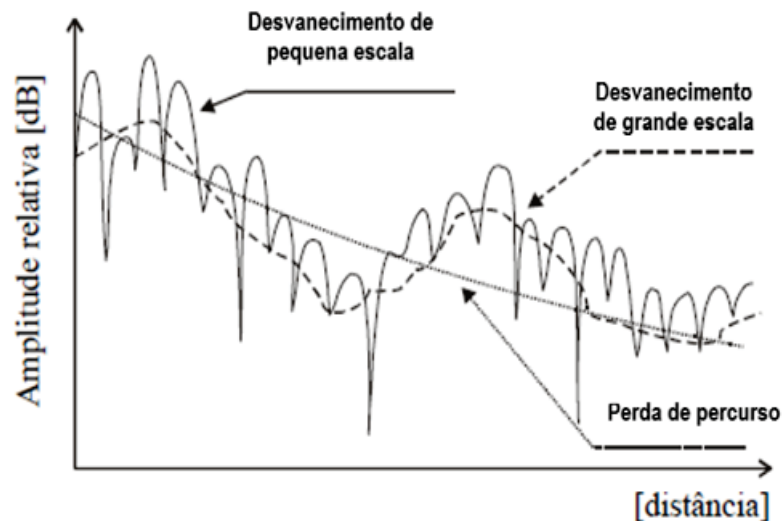
No espalhamento ou dispersão a energia da onda eletromagnética é difundida em múltiplas direções, ocorrendo quando esta incide em um obstáculo rugoso com

dimensões semelhantes ao comprimento de onda como postes de iluminação e árvores.

2.1.2 Efeitos no canal de propagação

Segundo Yacoub (1993) a qualidade do sinal recebido é afetada pela combinação de três efeitos principais: perdas de propagação ou de percurso, desvanecimento de grande escala ou sombreamento e desvanecimento de pequena escala. Os efeitos podem ser observados no GRÁFICO 1.

GRÁFICO 1 – EFEITOS NO CANAL DE PROPAGAÇÃO



FONTE: Adaptado de Rolim *et al.* (2002).

2.1.2.1 Perda de percurso

A perda de percurso pode ser definida como um decréscimo suave e lento da intensidade do sinal causada pela distância entre o transmissor e receptor, crescendo com a distância d , na forma d^n , onde n é o coeficiente ou expoente de perda de percurso. Este coeficiente varia de acordo com o ambiente normalmente situado na faixa entre 2 e 5. No espaço livre o expoente tem o valor 2, os valores maiores indicam a presença de edificações e relevo, em comunicações veiculares o expoente varia em torno do 2 podendo ser inclusive menor.

2.1.2.2 Sombreamento

O desvanecimento em larga escala acontece em médias e grandes distâncias se comparadas ao comprimento de onda. É também conhecido como sombreamento pois ocorre quando existem obstáculos naturais como relevo e vegetação ou artificiais como edificações entre o transmissor e receptor causando zonas de sombra onde o receptor recebe o sinal essencialmente por difração e espalhamento.

As variações do sinal recebido na região de sombra seguem a função densidade de probabilidade (FDP) log-normal que para o nível de sinal em dB é dada por:

$$FDP(p) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(p-\bar{p})^2}{2\sigma_L^2}} \quad (1)$$

onde: p é a potência máxima da envoltória do sinal recebido, \bar{p} é o valor médio e σ_L é o desvio padrão.

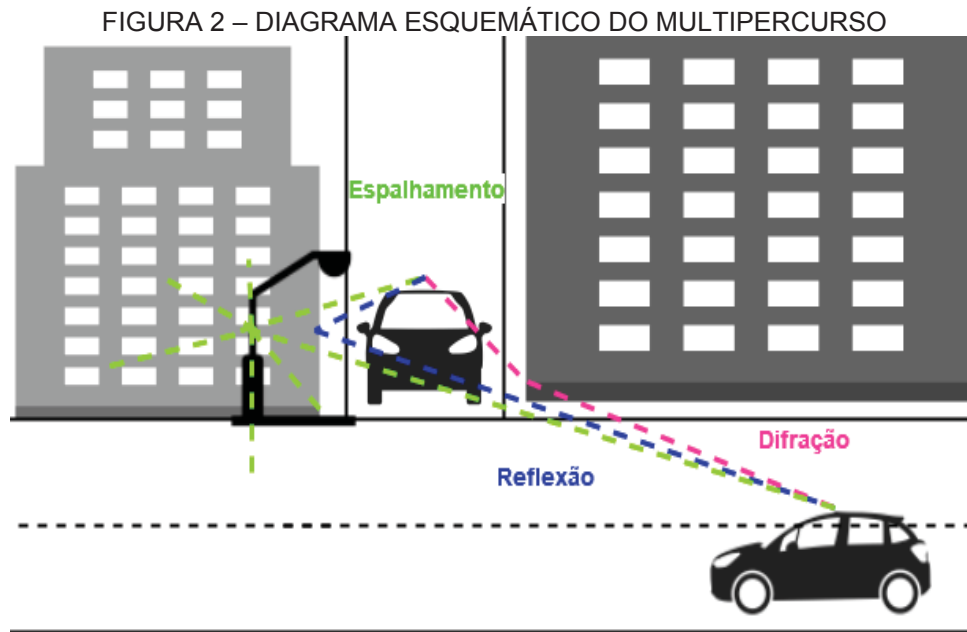
2.1.2.3 Pequena escala

Na pequena escala as variações do sinal ocorrem de forma rápida, na ordem de segundos ou em distâncias pequenas, variando de meio a três comprimentos de onda. Em pequenas distâncias podem ser desprezados os efeitos da perda de percurso e do sombreamento. O desvanecimento em pequena escala é influenciado por diversos fatores destacando-se a propagação multipercurso e o deslocamento Doppler, apresentadas nos próximos itens (RAPPAPORT, 2010).

2.1.2.3.1 Propagação por multipercurso

Em ambientes urbanos o sinal de comunicação móvel recebido chega em múltiplas versões do sinal transmitido. Isto é devido a existência de uma grande quantidade de obstáculos entre o transmissor e o receptor fazendo com que o sinal se propague por diferentes mecanismos percorrendo caminhos distintos. Este tipo de propagação por diversos caminhos é chamado de propagação por multipercurso e os sinais que se propagam deste modo chegam defasados entre si, devido a diferentes ângulos de chegada e tempos de propagação, interferindo na intensidade do sinal construtivamente ou destrutivamente.

Os desvanecimentos profundos devidos ao multipercurso ocorrem em aproximadamente meio comprimento de onda e são da ordem de algumas dezenas de decibéis. A FIGURA 2 ilustra os multipercursos que chegam em um receptor móvel a partir dos 3 principais mecanismos propagação.



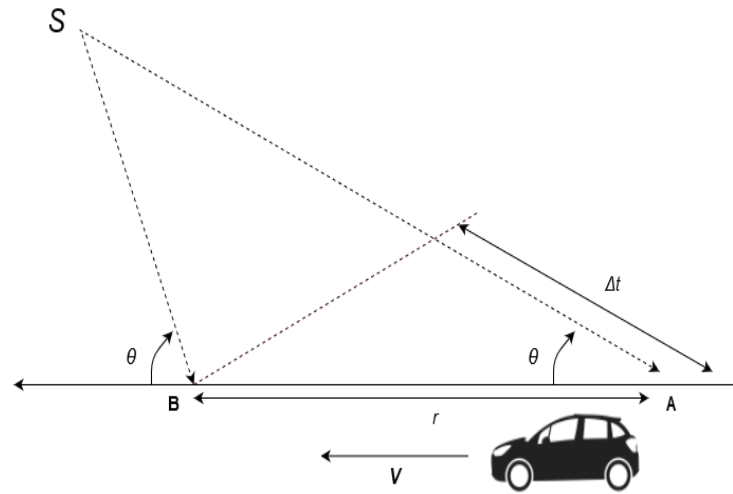
FONTE: A autora (2019).

2.1.2.3.2 Efeito Doppler

O efeito *Doppler* é a aparente mudança da frequência do sinal transmitido percebida pelo receptor quando transmissor e receptor apresentam movimento relativo.

Considerando-se um móvel movendo à velocidade constante V ao longo de um percurso de comprimento d entre dois pontos A e B enquanto recebe sinal de uma fonte remota S conforme FIGURA 3, a diferença percorrida pela onda vinda da fonte S até o móvel nos pontos A e B é expressa por: $\Delta l = d \cos \theta = V \Delta t \cos \theta$, sendo Δt o tempo que o móvel gasta para se deslocar de A até B e θ assume-se como sendo o mesmo em ambos os pontos.

FIGURA 3 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO EFEITO DOPPLER



FONTE: Adaptado de Rappaport (2002).

A mudança de fase ($\Delta\phi$) no sinal recebido devido a diferença do comprimento dos caminhos entre os pontos A e B é (RAPPAPORT, 2010):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi V\Delta t}{\lambda} \cdot \cos\theta \quad (2)$$

A aparente mudança de frequência ou efeito Doppler é dada por (RAPPAPORT, 2010):

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{dt} = \frac{V}{\lambda} \cos\theta \quad (3)$$

Analisando a equação (3) percebe-se que o efeito Doppler é positivo, ou seja, a frequência recebida aparente aumenta se o receptor se desloca em direção ao transmissor e negativo quando o receptor se afasta do transmissor, ou seja, a frequência recebida aparentemente diminui.

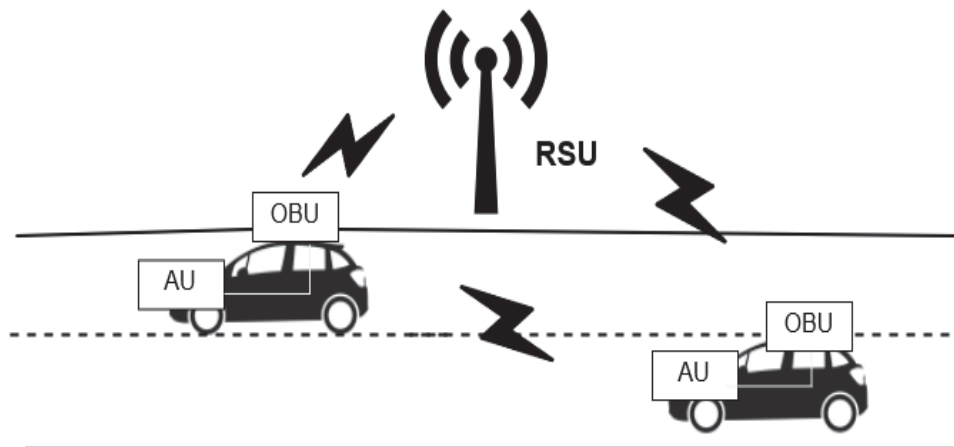
Quando se trata de comunicações sem fio, esse efeito pode dificultar a recepção correta do sinal quando combinado a propagação multipercurso (YACOUB, 1993).

2.2 COMUNICAÇÃO VEICULAR

A comunicação veicular é caracterizada pela topologia dinâmica, devido à alta mobilidade do transmissor e/ou receptor e pela transmissão omnidirecional com baixo alcance (LI; WANG, 2007).

Esta comunicação possui como componentes principais a *Roadside unit* (RSU) que é fixada ao longo do trajeto onde os veículos passam sendo equipada com um dispositivo de rede dedicado a comunicação, a *On board unit* (OBU) que se localiza dentro do veículo e é utilizada para a troca de informações com a RSU e com outras OBUs e a *application unit* (AU) que também se encontra dentro do veículo e executa as aplicações utilizando a capacidade de comunicação do OBU. A FIGURA 4 mostra estes componentes interagindo (AL-SULTAN *et al.*, 2014).

FIGURA 4 – ARQUITETURA DA COMUNICAÇÃO VEICULAR



FONTE: A autora (2019).

As tecnologias de acesso sem fio que podem ser empregadas para a comunicação veicular são: o sistema celular, WLAN/Wi-Fi, o padrão 802.11p além de poder se utilizar uma combinação entre elas.

2.2.1 Tecnologia DSRC

O padrão 802.11p, define as camadas físicas e MAC, sendo a base da *Dedicated Short Range Communications* (DSRC). Nos Estados Unidos, a *U.S Federal Communication Commission* (FCC) alocou em 1999, uma faixa de 75 MHz do espectro de frequência para serem usados em comunicações veiculares com a finalidade de

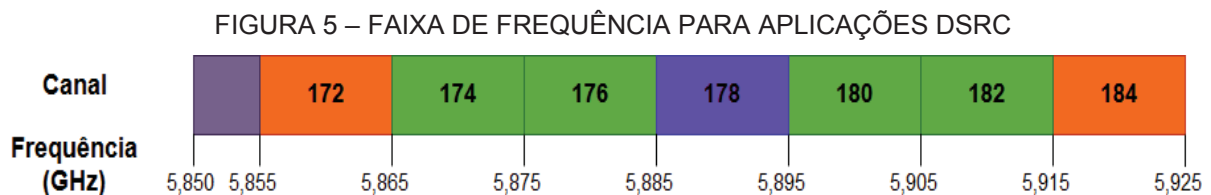
melhorar a segurança e fluxo no trânsito. A TABELA 1 traz informações a respeito das especificações imposta pelo padrão IEEE 802.11p.

TABELA 1 – ESPECIFICAÇÃO DO PADRÃO IEEE 802.11P

Especificação	Valores
Frequência de Operação	5,9 GHz
Faixa de Operação (Estados Unidos)	5,850 - 5,925 GHz
Largura de Banda	75 MHz
Quantidade de Canais	7
Largura do canal	10 MHz
Potência Máx. Transmissão	33 dBm (2 W)

FONTE: A autora (2019).

Para melhor visualização o espectro de frequência é apresentado na FIGURA 5.



FONTE: A autora (2019).

Os canais 172 e 184 são de segurança, reservados para emergências, preservação da vida e segurança pública, o canal 178 é para controle, os 4 restantes são para serviços. Os 5 MHz iniciais não podem ser usados pois estão reservados para a possível extensão da banda.

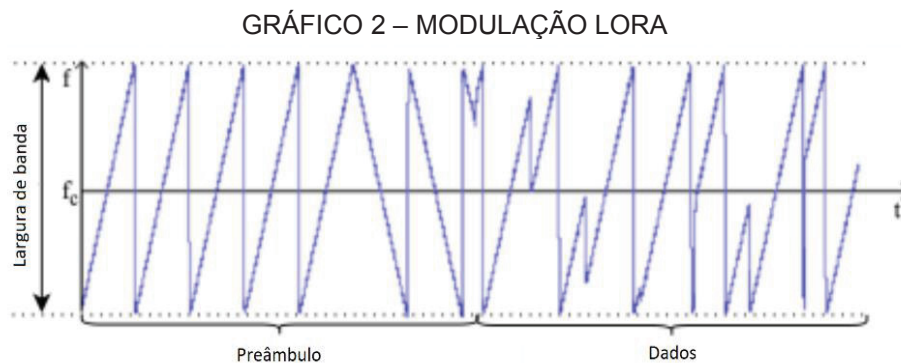
Tem baixo tempo de latência (μ s) e devido a largura de banda do canal há a possibilidade de transmissão a uma taxa de até 27 Mbps. (XIAO; ROSDAHL, 2002)

2.2.2 Tecnologia LoRa

A tecnologia LoRa é propriedade da empresa Semtech e utiliza uma técnica de espalhamento espectral com suporte à correção de erros, desenvolvida para operar na banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) em frequências abaixo de 1

GHz, sendo definidas pela *International Telecommunication Union* (ITU), no Brasil a frequência definida é de 915 MHz.

A modulação utilizada foi inicialmente desenvolvida para a utilização em radares, modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Os sinais *chirps* são rampas, o deslocamento dessas rampas transporta a informação, não sofrendo variação em amplitude e cobrindo toda a banda (GRÁFICO 2) (AUGUSTIN *et al.*, 2016).



FONTE: Adaptado de Augustin *et al.*, (2016).

A tecnologia LoRa pode ser configurada ao se modificar os parâmetros de Fator de espalhamento (SF), Taxa de código (CR) e Largura de banda (BW). As informações dos parâmetros do LoRa estão descritas na TABELA 2.

TABELA 2 – PARÂMETROS LORA

Parâmetro	Valor
Frequência	137 MHz a 1020 MHz
Largura da banda (BW)	125 kHz, 250 kHz, 500 kHz
Fator de espalhamento (SF)	7 a 12
Taxa de código (CR)	4/5, 4/6, 4/7 e 4/8
Tamanho do pacote	Variável

FONTE: A autora (2019).

Cada parâmetros tem influência em um aspecto da comunicação:

- O Fator de espalhamento pode ter os valores de 7 a 12 com trocas entre robustez e taxa de transmissão onde com valor 12 tem-se a maior robustez e com valor 7 a maior taxa de transmissão;

- A taxa de código é utilizada para se configurar a correção de erros, sendo que quando maior o seu valor maior será a probabilidade de recuperação das transmissões corrompidas, porém cresce também o tempo necessário para o recebimento da mensagem enviada, ela pode assumir os valores de 4/5 a 4/8;
- A largura de banda quando maior a BW maior será a taxa de transmissão podendo chegar a 27 Kbps, porém fica mais suscetível a erros.

A estrutura do pacote é composta por 4 partes (FIGURA 6):

FIGURA 6 – ESTRUTURA DO PACOTE LORA

Preâmbulo	Cabeçalho (opcional) 20 bits	Dados P bytes	CRC (opcional) 16 bits
-----------	------------------------------------	------------------	------------------------------

FONTE: A autora (2019).

- Preâmbulo - utilizado para detecção do início da mensagem e sincronização;
- Cabeçalho - contém informações sobre a taxa de codificação, o número de bytes no pacote e se está sendo utilizada a correção a erros;
- Dados;
- CRC (*Cyclic Redundancy Check*) - utilizado para verificação de erros.

2.2.3 Modelo de propagação eficiente baseado em geometria para comunicação V2V (GEMV²)

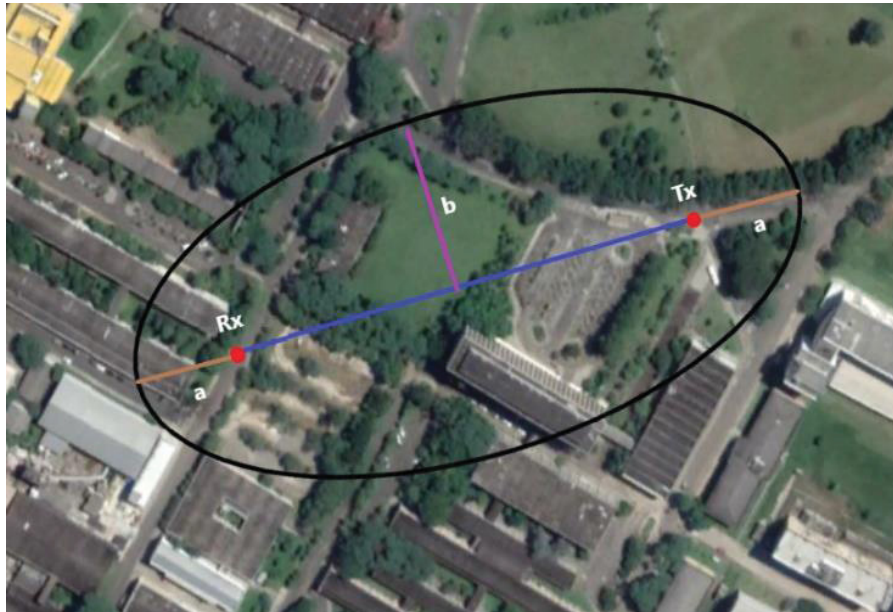
O GEMV² que é uma abreviação de *Geometry-based Efficient propagation Model for V2V communication* em tradução livre modelo eficiente de propagação baseado geometricamente para comunicação V2V é um modelo feito em MATLAB com código aberto capaz de simular o canal de comunicação em comunicações V2V e V2I.

Para ambas as comunicações os tipos de enlace são divididos em: enlaces que tem o caminho entre as antenas de transmissão e recepção visualmente desobstruído (LOS), enlaces cuja linha de visada é obstruída por veículos, enlaces onde a obstrução é devida a vegetação e enlaces nos quais a linha de visada é obstruída por construções, *Line of sight* (LOS), *Non-LOS due to vehicles* (NLOS_v),

Non-LOS due to foliage (NLOSf) e *Non-LOS due to buildings* (NLOSb) respectivamente.

As variações de sinal são determinadas dentro de uma elipse como mostra a FIGURA 7.

FIGURA 7 – DESCRIÇÃO DA ELIPSE DO MODELO DE PROPAGAÇÃO GEMV2



FONTE: A autora (2019).

Onde $a = \frac{r-d}{2}$ e $b = \frac{\sqrt{r^2-d^2}}{2}$ sendo r a distância máxima de comunicação em metros e d a distância em metros entre o transmissor (Tx) e receptor (Rx).

São empregados diferentes modelos de propagação para variações de sinal de grande e pequena escala tanto em V2V como em V2I, assim como cada tipo de enlace tem o seu próprio modelo de propagação.

As variações de sinal são divididas em:

- Variação de sinal de grande escala: perda de percurso e desvanecimento em larga escala;
- Variação de sinal de pequena escala: difrações, reflexões, espalhamento, efeito Doppler.

A variação de sinal de grande escala é calculada de modo determinístico e a de pequena escala de forma estocástica pelo desvio padrão.

2.2.3.1 Modelo grande escala

Os modelos de grande escala são divididos pelos tipos de obstruções presentes entre o transmissor e receptor.

2.2.3.1.1 Modelo para comunicações com visada direta

Para enlaces com visada direta é usualmente utilizado o modelo de dois raios definido pela expressão (RAPPAPORT, 2010):

$$|E_{TOT}| = \frac{E_0 d_0}{d_{LOS}} \cos\left(\omega_c \left(-\left(\frac{d_{LOS}}{c}\right)\right)\right) + R_{ground} \frac{E_0 d_0}{d_{ground}} \cos\left(\omega_c \left(\frac{d_{LOS}}{c} - \left(\frac{d_{ground}}{c}\right)\right)\right) \quad (4)$$

Sendo

E_0 – Intensidade do campo elétrico em espaço livre [V/m];

d_0 – Distância de referência [m];

d_{LOS} – Distância percorrida pela onda direta [m];

d_{ground} – Distância percorrida pela onda refletida [m];

ω_c – Frequência da portadora [rad./s];

c – Velocidade da luz [m/s²];

R_{ground} - coeficiente de reflexão da terra.

2.2.3.1.2 Modelo para comunicação obstruída por veículos

Para obstruções por veículos o modelo usado é o gume de faca, onde a atenuação A é calcula sendo (BOBAN *et al.*, 2011):

$$A = \begin{cases} 6,9 + 20 \log_{10} \left[\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right], & v > 0,7 \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

com $v = \sqrt{2}H/rf$;

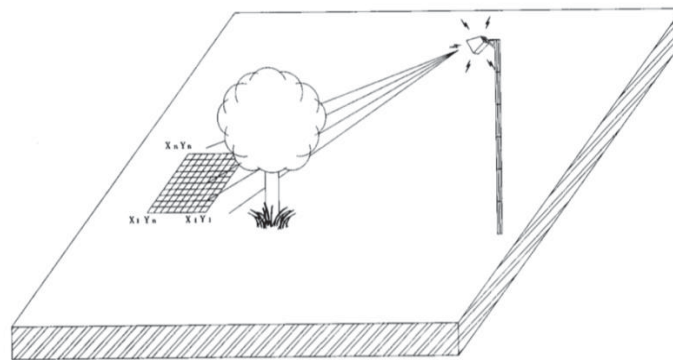
H - Diferença de altura entre as antenas de transmissão e recepção [m] ;

rf - Raio da elipsoide de Fresnel [m].

2.2.3.1.3 Modelo para comunicação através de folhagem

Para transmissão que atravessa folhagem, usa-se o modelo do espaço livre acrescentando a atenuação MEL. Esta atenuação foi obtida através do experimento realizado, onde foi posicionada uma antena transmissora direcional à 15 metros de altura e o receptor foi posicionado no chão a uma distância que permitia visada direta dos dois lados da árvore como mostra a FIGURA 8 (BENZAIR; SMITH; NORBURY, 1991).

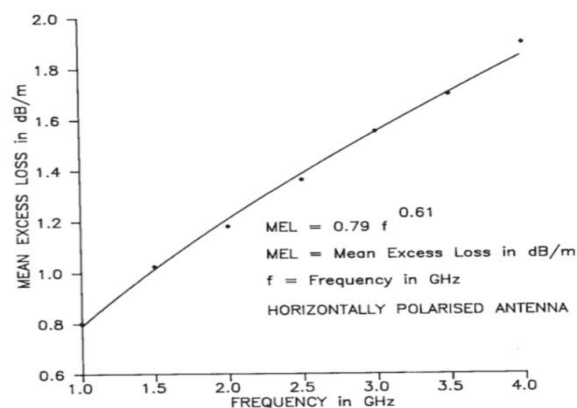
FIGURA 8 – EXPERIMENTO MODELAGEM FOLHAGEM COM OBSTÁCULO



FONTE: Benzair, Smith and Norbury (1991).

Estes testes foram reproduzidos em dois períodos, na primavera/verão (folhagem densa) e no outono/inverno (folhagem esparsa) em 7 frequências entre 1 e 4 GHz, sendo gerada para cada frequência a média da perda em dB/m como mostra o GRÁFICO 3.

GRÁFICO 3 – GRÁFICO DA PERDA ATRAVÉS DE FOLHAGEM



FONTE: Benzair, Smith and Norbury (1991).

A partir do GRÁFICO 3 foi possível determinar a equação da curva conforme abaixo:

$$\text{MEL} = 0,79f^{0,61} \quad (6)$$

onde

MEL - Excesso médio de perda por metro de transmissão através de árvores;

f - frequência [GHz].

2.2.3.1.4 Modelo para comunicação obstruída por construções

Quando a linha de visada é obstruída por construções o modelo utilizado é o *log-distance path loss PL* (em decibéis) para a distância d (RAPPAPORT, 2010):

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (7)$$

onde

γ - Expoente perda de percurso [sem unidade] representa a razão com que a perda aumenta com a distância do transmissor ao receptor;

d_0 - Distância de referência [m];

$PL(d_0)$ - Perda no caminho em relação a distância d_0 [dB].

Para este modelo a energia recebida $Pr_{PL}(d)$ em decibéis a uma distância d é dada por (RAPPAPORT, 2010):

$$Pr_{PL}(d) = Pt - PL(d) \quad (8)$$

onde

Pt - Potência transmitida [dBm];

$PL(d)$ - Perda de percurso em relação à distância d [dB].

2.2.3.2 Modelo de pequena escala

Neste modelo os três tipos de enlaces são descritos em relação a variação de sinal em pequena escala da mesma forma com a distribuição normal com média zero

$N(0, \sigma)$. Onde o desvio σ em decibéis para o para de comunicação i, σ_i é calculado como (BOBAN; BARROS; TONGUZ, 2014):

$$\sigma_i = \sigma_{min} + \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \left(\sqrt{\frac{NV_i}{NV_{max}}} + \sqrt{\frac{AS_i}{AS_{max}}} \right) \quad (9)$$

onde:

σ_{min} - Desvio mínimo para i tipos de enlace [dB];

σ_{max} - Desvio máximo para i tipos de enlace [dB];

NV_i - Número de veículos por unidade de área na elipse;

NV_{max} - Número máximo de veículos por unidade de área;

AS_i - Área de objetos estáticos por unidade de área na elipse [m];

AS_{max} - Área de objetos estáticos por unidade de área na elipse [m].

As TABELAS 3 e 4 abaixo apresentam os valores dos desvios padrão obtidos por BOBAN, BARROS e TONGUZ (2014) para cada tipo de enlace representando as atenuações por difração e reflexão.

TABELA 3 – DESVIOS PADRÕES V2V

Desvio padrão (dB)	LOS	NLOSv	NLOSf	NLOSb
σ_{min}	3,3	3,8	3,8	0
σ_{max}	5,2	5,3	5,3	0

FONTE: Boban *et al.* (2011).

TABELA 4 – DESVIOS PADRÕES V2I

Desvio padrão (dB)	LOS	NLOSv	NLOSf	NLOSb
$\sigma_{médio}$	2,1793	2,6080	2,4004	3,3017
σ_{min}	0,7648	0,9621	1,1558	1,8694
σ_{max}	6,9032	5,6743	5,2553	7,3640

FONTE: Boban *et al.* (2014).

2.3 ALGORITMO GENÉTICO

Os algoritmos genéticos (AGs) são algoritmos heurísticos de busca que se baseiam na genética e seleção natural para tentar solucionar um problema, eles podem não encontrar a solução ótima para o problema ou a mesma solução toda vez que são executados, porém sempre fornecem uma solução (GOLDBERG, 1989; LINDEN, 2008).

Os AGs foram desenvolvidos nas décadas de 60 e 70 com pesquisas na Universidade de Michigan por John Holland, seus alunos e seus colegas tendo como objetivo resumir e explicar o sistema adaptativo de processos naturais e desenvolver sistemas artificiais que utilizassem os mecanismos dos sistemas naturais (GOLDBERG, 1989).

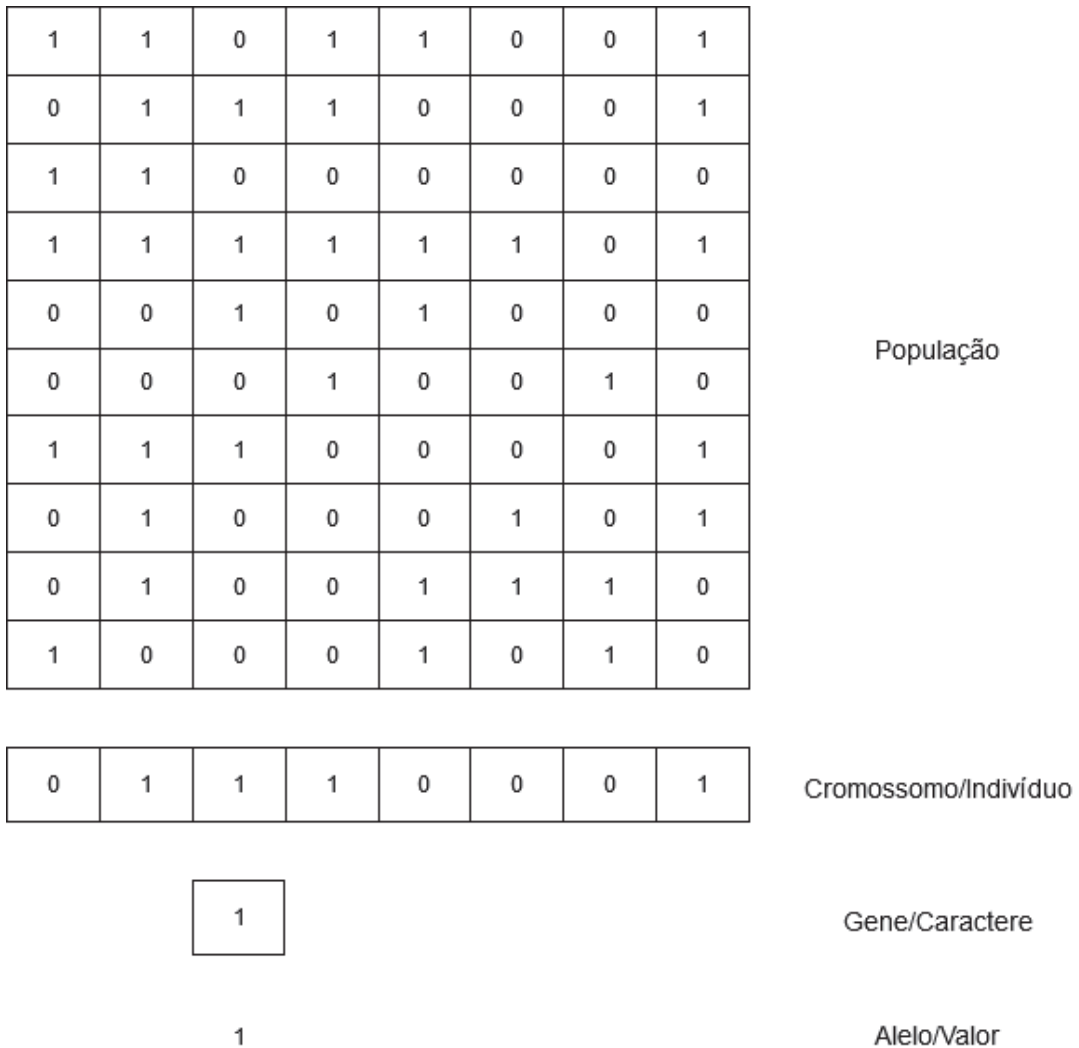
Em 1975 Holland publicou "*Adaptation in Natural and Artificial Systems*", em tradução livre Adaptação em sistemas naturais e artificiais, e em 1983, David Goldberg, aluno de Holland, obteve sucesso ao empregar algoritmos genéticos em uma aplicação industrial (POZO *et al.*, 2011).

Atualmente os AGs são empregados em muitas áreas como: medicina, aeronáutica, engenharia, segurança e negócios com diversos tipos de aplicações: reconhecimento facial, processamento de imagens, roteamento de pacotes em redes de computadores, simulação de sistemas imunológicos, extração de regras para *data mining* e composição musical (COLEY, 1999; FIDELIS; LOPES; FREITAS, 2000; HORNER; GOLDBERG, 1991; ZHENGYING; BINGXIN; ERDUN, 2001).

2.3.1 Terminologia

Os termos empregados em algoritmos genéticos derivam dos empregados na biologia e os principais são: população, cromossomo, gene e alelo, mostradas na FIGURA 9.

FIGURA 9 – TERMINOLOGIA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS



FONTE: A autora (2019).

A seguir é apresentada uma breve descrição de cada termo.

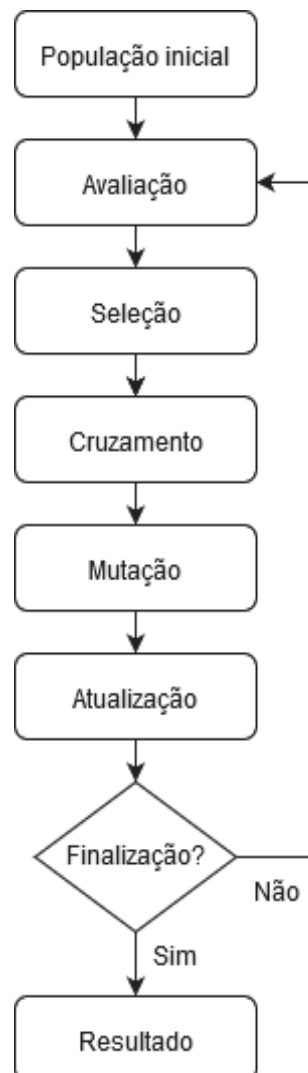
- **População** - conjunto de possíveis soluções para o problema.
- **Cromossomo** - *string* que representa uma das possíveis soluções para o problema, também é conhecido como indivíduo
- **Gene** - caractere que representa um elemento do indivíduo, podendo ser binário, inteiro ou real, sendo o binário o mais comumente utilizado.
- **Alelo** – os valores que o gene pode assumir são os alelos, no caso binário 0 ou 1.

2.3.2 Funcionamento

Devido a sua origem o funcionamento dos algoritmos genéticos é muito parecido com a da evolução onde a cada geração os indivíduos mais aptos sobrevivam e os menos aptos tendam a desaparecer. Para isso ocorrer primeiramente é selecionada uma população inicial onde os indivíduos mais aptos são avaliados e selecionados e através de cruzamentos e mutações geram a próxima geração, esta sofre o mesmo processo e assim sucessivamente até ser atingido o critério de parada (COX, 2005; POZO *et al.*, 2011)

A FIGURA 10 apresenta o fluxograma do funcionamento básico dos Algoritmos genéticos.

FIGURA 10 – FUNCIONAMENTO DOS AGS



FONTE: Adaptado de Holland (1975).

População inicial

A população inicial, que é a primeira geração é geralmente formada de modo aleatório, porém pode ser também gerada utilizando algum métrica conhecida do problema, e é a partir dela que os passos do primeiro ciclo são aplicados (COLEY, 1999)

Avaliação

A avaliação ocorre através de uma função objetivo e é aplicada a cada cromossomo de cada indivíduo da população. A função objetivo, também chamada de função aptidão ou função de adequação é uma parte importante do algoritmo genético pois é através dela que é calculado o valor de aptidão que determina a qualidade de um indivíduo, ou seja, o qual bom este indivíduo é para solucionar o problema.

Seleção

Nesta etapa é realizada a seleção dos indivíduos para o cruzamento posterior, ela é baseada no valor de aptidão obtido no passo anterior privilegiando os indivíduos mais aptos a serem utilizados mais vezes na geração de novos indivíduos porém sem excluir os menos aptos para evitar a convergência genética prematura que tende a uma perda de diversidade na população com indivíduos cada vez mais semelhantes o que compromete a evolução .

Existem diversas formas de seleção sendo as mais utilizadas a seleção por Roleta ou por Torneio (POZO *et al.*, 2011)

- Roleta

Neste tipo de seleção cada indivíduo é representado proporcionalmente em uma roleta de acordo com o seu valor de aptidão, assim um indivíduo com maior valor de aptidão tem um pedaço maior na roleta o que faz com que suas chances de ser selecionado aumentem (GOLDBERG, 1989).

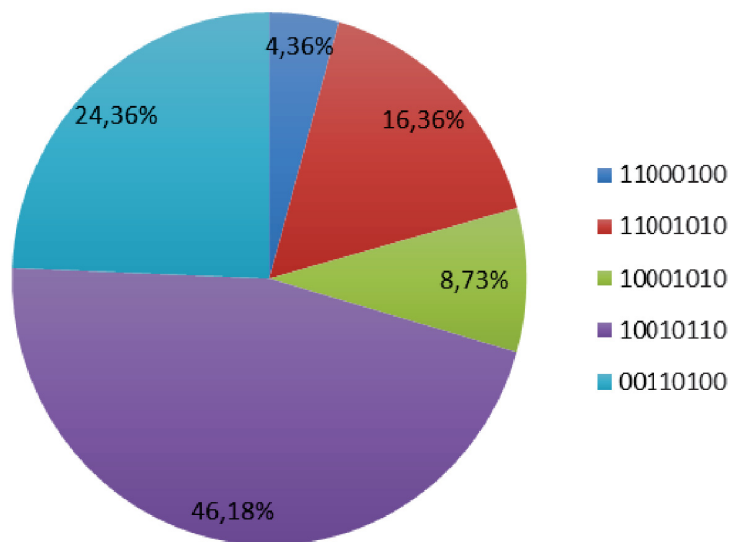
A TABELA 5 em conjunto com o GRÁFICO 4 mostram um exemplo desta seleção.

TABELA 5 – EXEMPLO DE INDIVÍDUOS - SELEÇÃO ROLETA

Indivíduo	Aptidão	Chance de escolha
11000100	12	4.36%
11001010	45	16.36%
10001010	24	8.73%
10010110	127	46.18%
00110100	67	24.36%
Total	275	100.00%

Fonte: A Autora (2019).

GRÁFICO 4 – EXEMPLO DE SELEÇÃO POR ROLETA



FONTE: A autora (2019).

- Torneio

Na seleção por torneio uma subpopulação temporária é formada aleatoriamente com um número n de indivíduos, sendo o indivíduo mais apto dela selecionado. Neste tipo de seleção não é preciso a avaliação de todos os indivíduos da população (POZO *et al.*, 2011).

A FIGURA 11 mostra um exemplo desta seleção.

FIGURA 11 – EXEMPLO DE SELEÇÃO POR TORNEIO

População		Subpopulação		Escolhido	
Indivíduo	Aptidão	Indivíduo	Aptidão	Indivíduo	Aptidão
11000100	12	11001010	45	10010110	127
11001010	45	10010110	127	10010110	127
10001010	24	00110100	67		
10010110	127				
00110100	67				

FONTE: A autora (2019).

Cruzamento

O cruzamento (*crossover*) é o operador predominante nos operados genéticos. Os operados genéticos diversificam a população mantendo características de adaptação adquiridas das gerações anteriores a fim de estender o espaço de busca da solução do problema (POZO *et al.*, 2011).

Este operador promove com uma probabilidade pré-estabelecida, geralmente alta, a troca de parte das características de um indivíduo selecionado pela equivalente em outro com o objetivo de gerar com a combinação indivíduos mais adaptados.

Mutação

O outro operador genético é a mutação que modifica aleatoriamente com uma taxa pré-estabelecida normalmente baixa, alguma característica do indivíduo podendo introduzir genes não presentes no resto da população (CARVALHO, 2005).

A mutação é necessária para se manter a diversidade da população e procura assegurar que todo o espaço de busca tenha uma probabilidade não zero de ser alcançado.

Atualização

Nesta etapa são determinados os indivíduos que farão parte da nova população, criando assim a próxima geração. Esta nova geração é formada por alguns indivíduos que faziam parte da geração anterior assim como os que foram gerados a partir dos operados genéticos e pode incluir também uma elite. A elite aparece quando

o processo de elitismo é empregado, processo este que copia integralmente indivíduos com os maiores valores de aptidão para a próxima geração prevenindo assim a perda da melhor solução, porém pode causar convergência prematura (GOLDBERG, 1989).

Finalização

A finalização ocorre quando o critério de parada é atingido, este pode ser quando se atinge um número determinado de gerações criadas, quando não se tem mais evoluções na população a determinadas gerações ou quando a função objetivo atinge um valor definido anteriormente (LINDEN, 2008).

2.4 TRABALHOS RELACIONADOS

Os estudos apresentados a seguir, que embasam o presente trabalho, foram separados pelos tipos de tecnologias avaliadas (DSRC e LoRa).

- DSRC

Em Gozavez, Sepulcre e Bauza (2012) foram distribuídas 10 RSUs pela cidade de Bologna na Itália com o objetivo de analisar o impacto do ambiente urbano nas comunicações entre o veículo e a infraestrutura. Os resultados mostraram que o *layout* das ruas, a densidade do tráfego, a presença ou não de veículos pesados ou vegetação assim como a elevação do terreno tem impacto na qualidade da comunicação.

Boban, Barros e Tonguz (2014) realizaram uma pesquisa extensiva sobre a comunicação veicular utilizando o padrão 802.11p em cenários rurais, urbanos, suburbanos e estradas em duas cidades distintas. Os dados coletados foram separados em tipos de obstruções entre os veículos. Com estes dados foi desenvolvido em MATLAB um modelo de canal, o *Geometry-based Efficient Propagation Model for V2V communication* (GEMV²).

XU *et al.*, 2017 avaliam a tecnologia DSRC e 4G-LTE em um mesmo cenário com poucas obstruções. A tecnologia DSRC se mostra menos sensível ao efeito

Doppler, porém ela apresenta um menor alcance sendo mais indicada para cenários de segurança como a prevenção de colisão.

- LoRa

Baseado no trabalho de Petäjäjärvi *et al.*, (2017) o qual analisa a performance do LoRa em relação ao efeito Doppler conclui que dependendo da configuração escolhida as velocidades dos veículos podem tornar a comunicação inviável. Testes para a avaliação da área de cobertura terrestre e marítima também foram realizados.

Augustin *et al.*, (2016) fizeram uma análise compreensiva da tecnologia LoRa além de realizar testes de alcance em uma área suburbana com uma antena fixa no segundo andar de uma edificação e outra móvel instalada em um veículo. Foram realizados testes com três configurações diferentes. O autor também realizou testes de sensibilidade de recepção do sinal com algumas configurações de diferentes parâmetros, onde os limites de recepção obtidos foram um pouco piores que os especificados e não foi notada a diferença esperada entre as configurações escolhidas.

Os estudos de Sanchez-Iborra *et al.* (2018) desenvolve tanto um estudo teórico da cobertura da antena base, posicionada no teto de um prédio, em três cenários distintos (urbano, suburbano e rural) quanto com testes experimentais com um veículo em movimento nos mesmos cenários. Vários testes foram realizados cada um com uma combinação de parâmetros de configuração LoRa diferentes.

Santa *et al.* (2019) desenvolveram um sistema fim a fim, que obtém dados de telemetria do veículo, os envia pelo enlace LoRaWAN e apresenta as informações em um site web através de um servidor armazenado na nuvem. O sistema foi validado com teste de campo realizados em um ambiente suburbano.

3 METODOLOGIA

A metodologia foi dividida em simulação das tecnologias DSRC/WAVE e LoRa e os testes de campo com a tecnologia LoRa.

3.1 SIMULAÇÃO

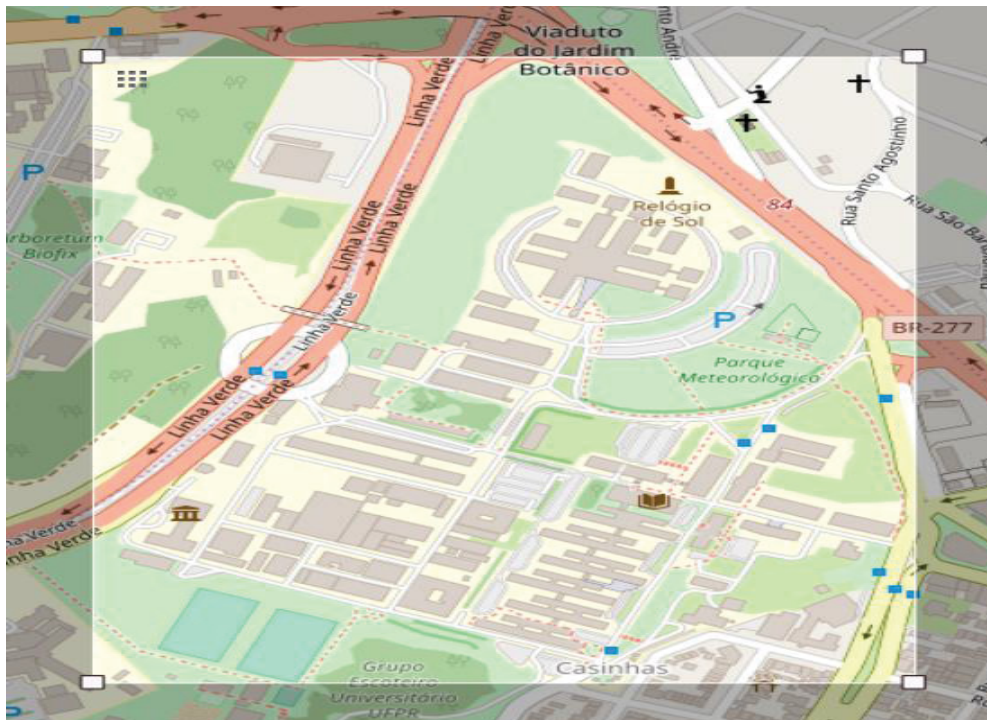
As simulações foram realizadas em um laptop com sistema operacional Windows 10 *Home Single Language* de 64 bits, com processador Intel(R) Core (TM) i7-7500U CPU @ 2,70GHz e 16GB de memória RAM.

A metodologia utilizada para a simulação foi baseada no GEMV² que fornece a potência recebida em comunicação veicular, para tal faz-se necessário fornecer as informações da topologia e morfologia da região, o tráfego de veículos e o posicionamento, se for o caso, das localizações da RSUs. Assim, foi definida, primeiramente, a área a ser estudada, sendo escolhido o Campus Politécnico da UFPR, com latitude de -25.449722 e longitude de -49.233056, por seu fácil acesso e pela possibilidade de confirmação dos dados, topográficos e morfológicos obtidos para região.

O ambiente do centro politécnico simula de forma muito próxima o ambiente real de tráfego urbano, pois encontra-se diferenças significativas de altitude, área de visada direta, áreas de obstrução por edificações e vegetação relevante. Neste ambiente pode-se gerar a movimentação randômica dos veículos de modo similar ao uso cotidiano.

As informações da topologia e morfologia da região foram extraídas de um mapa de fonte aberta chamado de *Open Street Map* (OSM). A importação gera um arquivo do formato .osm que contempla todas as vias e estruturas do campus como mostra a FIGURA 12.

FIGURA 12 – ÁREA SELECIONADA NO WEBSITE OPENSTREETMAP



FONTE: A autora (2019).

O tráfego na região foi simulado utilizando-se o *Simulation of Urban MObility* (SUMO) que é um simulador baseado em linguagem C++ de código aberto com um alto poder de simulação de tráfego veicular. Esse simulador foi desenvolvido pela *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) permitindo um sistema de tráfego intermodal, desde tráfegos em larga escala como uma cidade completa considerando transporte público, pedestres, bicicletas até pequenas regiões de uma cidade, como o Centro Politécnico (KRAJZEWICZ, *et al.*, 2002).

Através dele é possível informar quais as características inerentes a esse tráfego baseando-se em uma matriz de origem e destino (ODM), que identifica as melhores rotas dos veículos dentro do ambiente de simulação.

O SUMO é, em essência, um simulador de tráfego rodoviário contínuo. Suporta tráfego terrestre multimodal e intermodal. O SUMO modela veículos individuais e suas interações usando modelos para comportamento de seguir veículos e mudar de faixa e interseção. Ele também usa modelos de pedestres para simular o movimento de pessoas e suas interações com veículos.

Para permitir a simulação eficiente de cenários muito grandes, também é possível executar o SUMO como uma simulação com parâmetros ajustado (LOPEZ *et al.*, 2018).

O SUMO é alimentado com o mapa da região identificando as ruas por onde o tráfego deve fluir. Este tráfego é gerado aleatoriamente, com um total simulado de 10.000 viagens. A FIGURA 13 mostra em tempos diferentes o tráfego simulado pelo SUMO, a noção de movimento é referenciada pelo veículo indicado, destacado pela seta.

FIGURA 13 – (a) SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO EM TEMPO IGUAL A T1. (b) SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO EM TEMPO IGUAL A T2. (c) SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO EM TEMPO IGUAL A T3



FONTE: A autora (2019).

Para a escolha da localização dos RSUs inicialmente foram escolhidos 50 pontos (FIGURA 14) baseados em fatores como como prédios, obstruções, tipo de vegetação, elevação do terreno pois eles têm grande influência na potência do sinal recebido.

FIGURA 14 – LOCALIZAÇÕES DAS 50 RSUS INICIAIS



FONTE: A autora (2019).

Estes pontos foram reduzidos com a aplicação do algoritmo genético com o objetivo de prover uma cobertura completa do campus com o menor número possível de RSUs para se reduzir custos, assim o AG utilizava-se da informação de potência recebida fornecida pelo simulador de propagação de canal (GEMV²) para manter somente as RSUs com a maior quantidade de conexões e buscava a maior distâncias entre as antenas para se reduzir o número de RSUs.

O algoritmo genético foi implementado utilizando uma matriz onde as linhas representam cada uma das RSUs, a primeira coluna a Latitude, a segunda coluna a Longitude, a terceira coluna a quantidade de conexões estabelecidas, a quarta indica a altura da antena da RSU e a quinta a potência de transmissão.

Na sequência, define-se uma *string* binária de 2⁶ bits (64 bits), onde os 50 primeiros bits representam cada uma das posições das RSUs.

Para cada indivíduo gerado pelo algoritmo genético cria-se um arquivo de texto no formato .txt com a localização das RSUs por ele definidas com suas respectivas características. O algoritmo genético inicia o GEMV² e fornece a ele, como entrada, os valores obtidos na matriz de seleção e faz-se a simulação para obter a potência recebida. A seguir o resultado do GEMV² é analisado pelo algoritmo genético que pondera o custo de instalação e quantidade de conexões estabelecidas até encontrar o ponto que apresenta o melhor resultado.

Como todo algoritmo genético necessita de um critério de parada estabeleceu-se que o melhor resultado seria encontrado após 6.400 interações. A taxa de mutação foi considerada em 10%, o que previne que a busca fique estagnada em sub-regiões do espaço de busca, ampliando consideravelmente a melhoria nos resultados obtidos. Para a seleção do melhor indivíduo foi utilizado o método de roleta ou seleção proporcional, que divide todos os indivíduos em probabilidade de serem escolhidos.

Ao se unir as informações apresentadas nesta seção gera-se a função objetivo, responsável por encontrar o melhor indivíduo que tem como entrada a população inicial, definida pela equação abaixo.

$$z = \sum_{i,j=1}^{50} (C_i) + (\alpha d_{ij}) \quad (11)$$

Onde, C_i representa a quantidade de conexões acima do limiar de recepção normalizada entre -1 e 1, e α é o valor do peso apresentados na tabela 6.

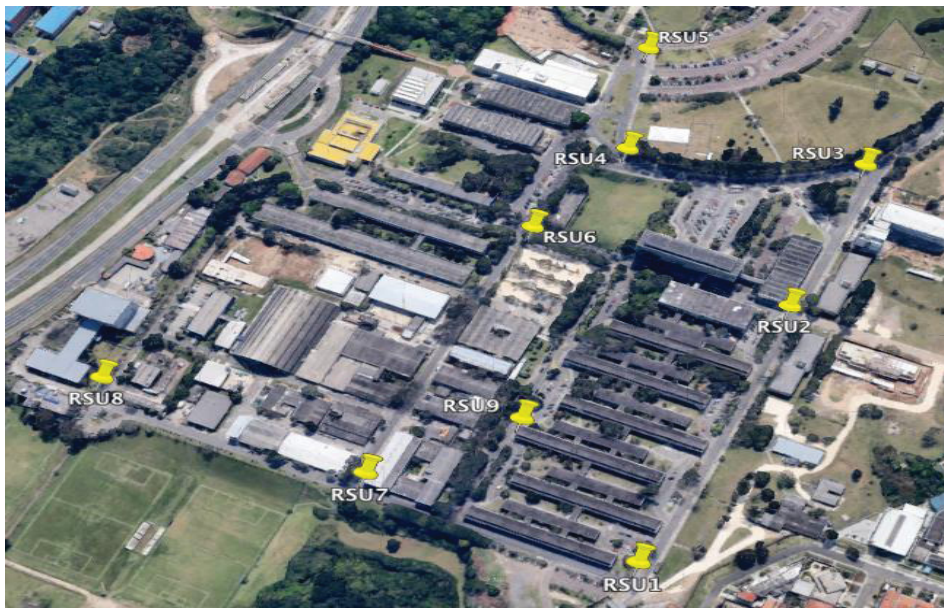
TABELA 6 – PESOS DO ALGORITMO GENÉTICO

Peso	Descrição
-1	$d_{ij} \leq 150$
0,5	$150 < d_{ij} \leq 300$
1	$300 < d_{ij} \leq 500$
0	$d_{ij} > 500$

FONTE: A autora (2019).

A utilização do algoritmo genético apresentou como resultado os 9 pontos mostrados na FIGURA 15.

FIGURA 15 – LOCALIZAÇÕES DAS 9 RSUS FINAIS



FONTE: A autora (2019).

As coordenadas dos pontos acima são descritas na TABELA 7.

TABELA 7 – LOCALIZAÇÃO DAS 9 RSUS

RSU	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	-25,4533	-49,23282	919
2	-25,45108	-49,23179	916
3	-25,44974	-49,23123	920
4	-25,44961	-49,23301	915
5	-25,44859	-49,23288	918
6	-25,45038	-49,23369	912
7	-25,45262	-49,23472	919
8	-25,45184	-49,23669	908
9	-25,45213	-49,23367	918

FONTE: A autora (2019).

Para a realização das simulações são definidos os parâmetros utilizados em cada tecnologia como mostra a TABELA 8.

TABELA 8 – PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Parâmetro	DSRC	LoRa
	Valor	
Número de veículos	100	
Frequência	5,89 GHz	915 MHz
Tipo de antena	Omnidirecional	
Potência de transmissão	12 dBm	
Ganho da antena	5 dBi	

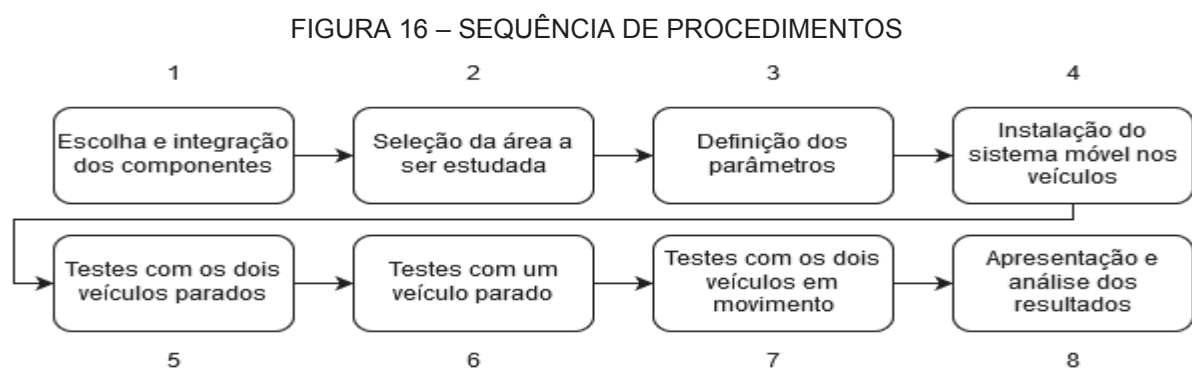
FONTE: A autora (2019).

O número de veículos foi imposto pela limitação de equipamento, por regulamentações define-se as frequências e os outros parâmetros foram escolhidos de forma a se equipararem com o hardware utilizado nos testes de campo.

Com os dados obtidos da topologia e morfologia, do tráfego, e das localizações das RSUs assim como os parâmetros já definidos são realizadas as simulações para o DSRC e LoRa no GEMV².

3.2 TESTES DE CAMPO

Para avaliação da comunicação veicular utilizando a tecnologia LoRa foram realizados testes de campo tanto entre veículos como também entre veículo e infraestrutura dentro da mesma área selecionada para a simulações. A metodologia utilizada nos testes de campo segue os seguintes passos (FIGURA 16):



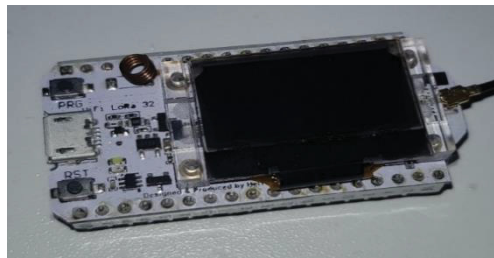
FONTE: A autora (2019).

Da FIGURA 16 segue-se:

1. Escolha e integração dos componentes:

- 1.1. A placa base utilizada foi a Heltec Esp32 LoRa (FIGURA 17) que possui integrado o chip LoRa SX1276 e o ESP32, que é um microcontrolador programável, também incorpora um display OLED de 0,96 Polegadas. Esta placa opera na frequência de 915 MHz com uma sensibilidade de recepção de -127 dBm.

FIGURA 17 – PLACA HELTEC ESP32 LORA



FONTE: A autora (2019).

- 1.2. Uma antena móvel omnidirecional UHF 5/8 de Onda WHIP da Steelbras modelo AP3900 (FIGURA 18) com ganho de 5,15 dBi foi conectada a placa da Heltec, escolhida pelo seu ganho e por possuir uma base magnética que permite a fácil instalação em veículos.

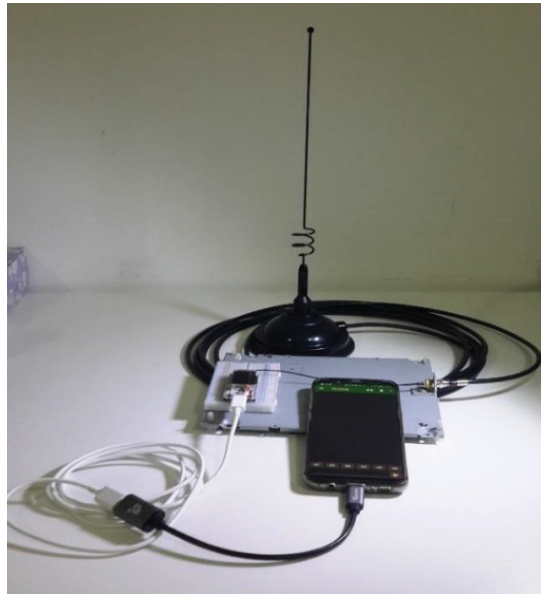
FIGURA 18 – ANTENA STEELBRAS AP39000



FONTE: A autora (2019).

- 1.3. A integração dos componentes resultou em dois equipamentos similares que devido a sua programação um atua como transmissor e o outro como receptor. Uma imagem do equipamento com um celular como dispositivo serial também utilizado como GPS pode ser vista na FIGURA 19.

FIGURA 19 – EQUIPAMENTO DE TESTES



FONTE: A autora (2019).

2. A área de estudo foi o campus Politécnico da UFPR, o mesmo local em que foram realizadas as simulações.
3. Com a seleção da área de estudo, foram feitos testes de campo utilizando os parâmetros mostrados na TABELA 9.

TABELA 9 – PARÂMETROS DA CONFIGURAÇÃO LORA

Parâmetro	Valor
Potência de transmissão	12 dBm
Frequência	915 MHz
Largura da banda (BW)	125 kHz
Fator de espalhamento (SF)	7 e 12
Taxa de código (CR)	4/5
Tamanho do pacote	Variável

FONTE: A autora (2019).

Este trabalho considera apenas a largura de banda com menor suscetibilidade (125 kHz) a erros e com maior sensibilidade; também, é considerado apenas a taxa de código com a menor redundância na mensagem, porém com a menor sobrecarga de controle. A potência de transmissão foi calibrada na máxima permitida pelo hardware. Para os valores do fator de espalhamento programados foram adotados os extremos do parâmetro (7 e 12).

4. A FIGURA 20 mostra a instalação do sistema móvel no veículo.

FIGURA 20 – ANTENA POSICIONADA NO TETO DO VEÍCULO



FONTE: A autora (2019).

5. Para o teste inicial foram escolhidos 8 pontos fixos de recebimento espalhados pelo campus para a avaliação da tecnologia LoRa. Os pontos escolhidos podem ser vistos na FIGURA 21.

FIGURA 21 – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA TESTES SEM VELOCIDADE



FONTE: A autora (2019).

As coordenadas de cada ponta são mostradas na TABELA 10.

TABELA 10 – LOCALIZAÇÃO DOS 8 PONTOS

Pontos	Latitude	Longitude	Altitude (m)
1	-25.44739973	-49.23120959	927
2	-25.4468971	-49.23335031	920
3	-25.4488997	-49.23279681	918
4	-25.44980636	-49.23500773	910
5	-25.45182702	-49.23663608	908
6	-25.453125	-49.233733	914
7	-25.45071949	-49.23290333	913
8	-25.44986	-49.231212	918

FONTE: A autora (2019).

Buscou-se locais distribuídos por todo o campus com diferentes tipos de obstruções.

6. A seguir foram realizados testes com um veículo parado e o outro percorrendo as ruas do campus e arredores.
7. Finalmente foram realizados teste com os dois veículos em movimento.
8. Com os dados destes testes foram gerados gráficos com o indicador da potência do sinal recebido (RSSI) e a relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR) em função da distância e calculado a porcentagem de pacotes perdidos. Para as comunicações com um dos equipamentos fixo também foi gerada uma imagem com a localização e o RSSI dos pacotes enviados.

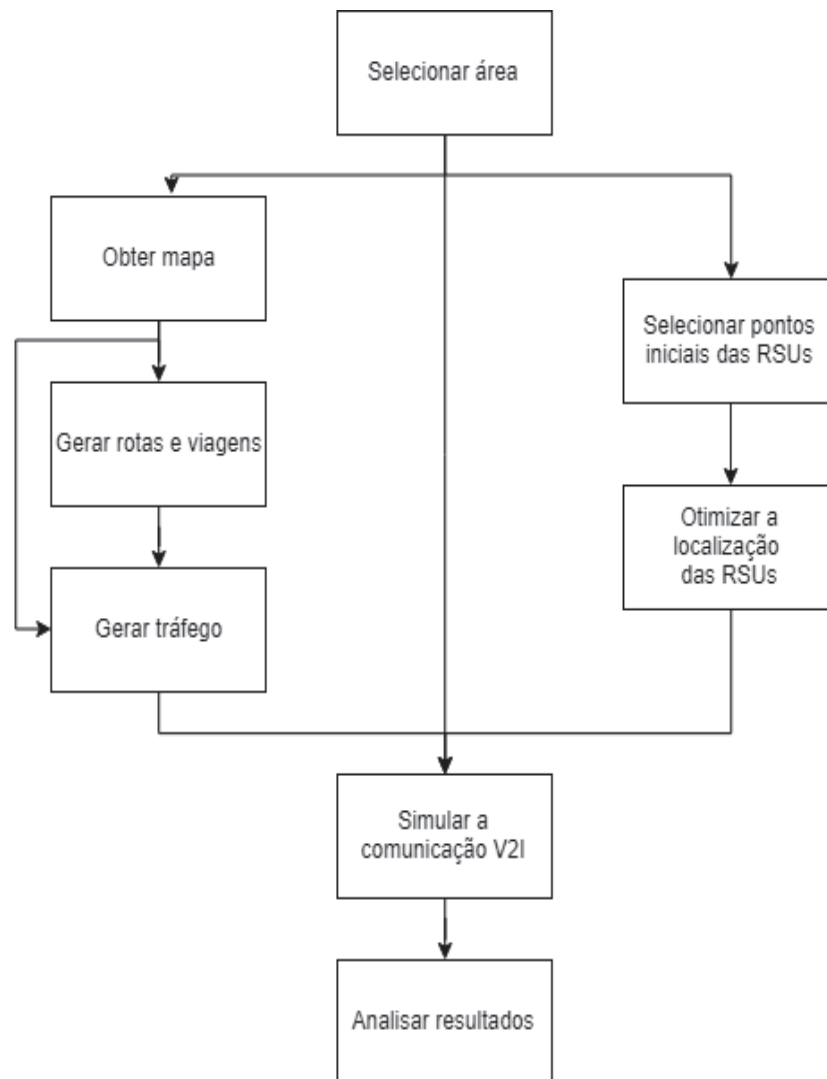
3.3 FLUXOGRAMA

As simulações e testes de campo seguem a sequência dos fluxogramas abaixo.

3.3.1 Fluxograma da simulação

A FIGURA 22 apresenta um fluxograma que sintetiza as etapas do processo de simulação da tecnologia DSRC.

FIGURA 22 – FLUXOGRAMA DA SIMULAÇÃO DSRC



FONTE: A autora (2019).

Tendo por base o fluxograma, entende-se que ao se definir a área de estudo é possível obter o mapa da região e selecionar os pontos das RSUs e então por algoritmo genético reduzir ao número final as RSUs e gerar as rotas dos veículos simulando o tráfego. Em seguida é realizada a simulação fornecendo como entrada o mapa da área, o tráfego na região e as localizações das RSUs, então o simulador GEMV² realiza a simulação e fornece a potência recebida em cada par de comunicação.

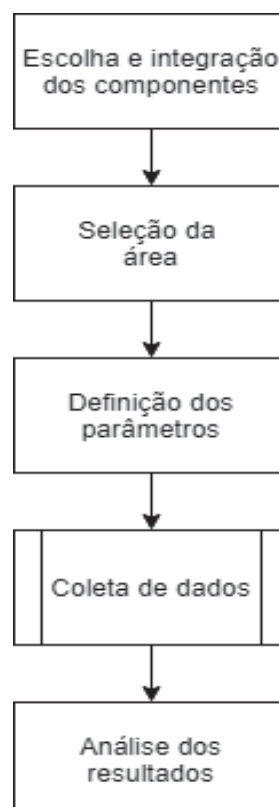
O GEMV² fornece a potência recebida em cada enlace, assim a métrica avaliada foi a porcentagem de sinal com potência recebida acima do limiar.

Foi, então, possível calcular a porcentagem dos pacotes recebidos acima do limiar de recepção do DSRC (-92 dBm definido pelo software utilizado para a tecnologia DSRC) e LoRa (-124 dBm para SF7 e -127 dBm para SF12 definidos para o hardware selecionado). Para a comunicação entre veículos utilizou-se o mesmo limiar de recepção da comunicação V2I e a mesma métrica foi avaliada, o software simula o canal fornecendo a potência recebida como resultado.

3.3.2 Fluxograma do teste de campo

As FIGURA 23 e FIGURA 24 representam um fluxograma que sintetiza as etapas do processo de teste de campo da tecnologia LoRa.

FIGURA 23 – FLUXOGRAMA DO TESTE DE CAMPO LORA

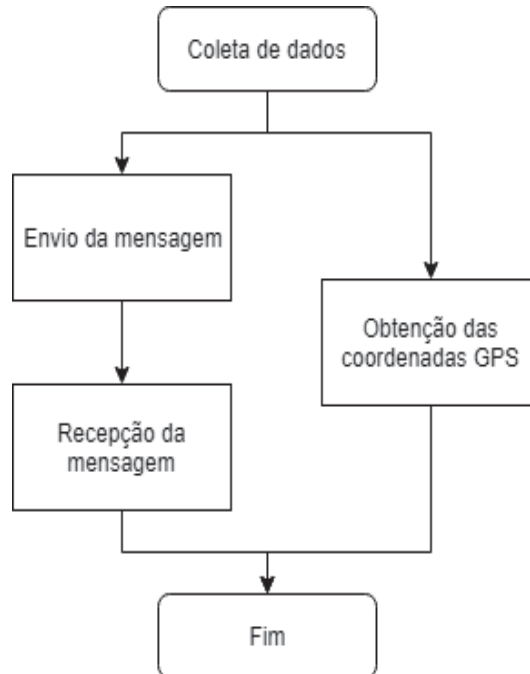


FONTE: A autora (2019).

Como mostra a FIGURA 23, para o teste de campo o primeiro passo foi a montagem do equipamento com a escolha e integração dos componentes. A seguir a área de estudo é definida. Os parâmetros da modulação LoRa são definidos de

acordo com a regulamentação e assim foi possível a realização da coleta de dados, como mostrado na FIGURA 24, bem como a análise dos resultados.

FIGURA 24 – FLUXOGRAMA DA COLETA DE DADOS VEÍCULO COM BASE FIXA



FONTE: A autora (2019).

A coleta de dados do veículo é realizada com o envio da mensagem simultâneas com as coordenadas GPS. O receptor armazena a RSSI e o SNR da mensagem recebida. A análise dos dados será apresentada no capítulo subsequente.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo do trabalho serão analisados os resultados simulados e os obtidos por medições nas diversas formas de comunicação objetos de análise deste trabalho.

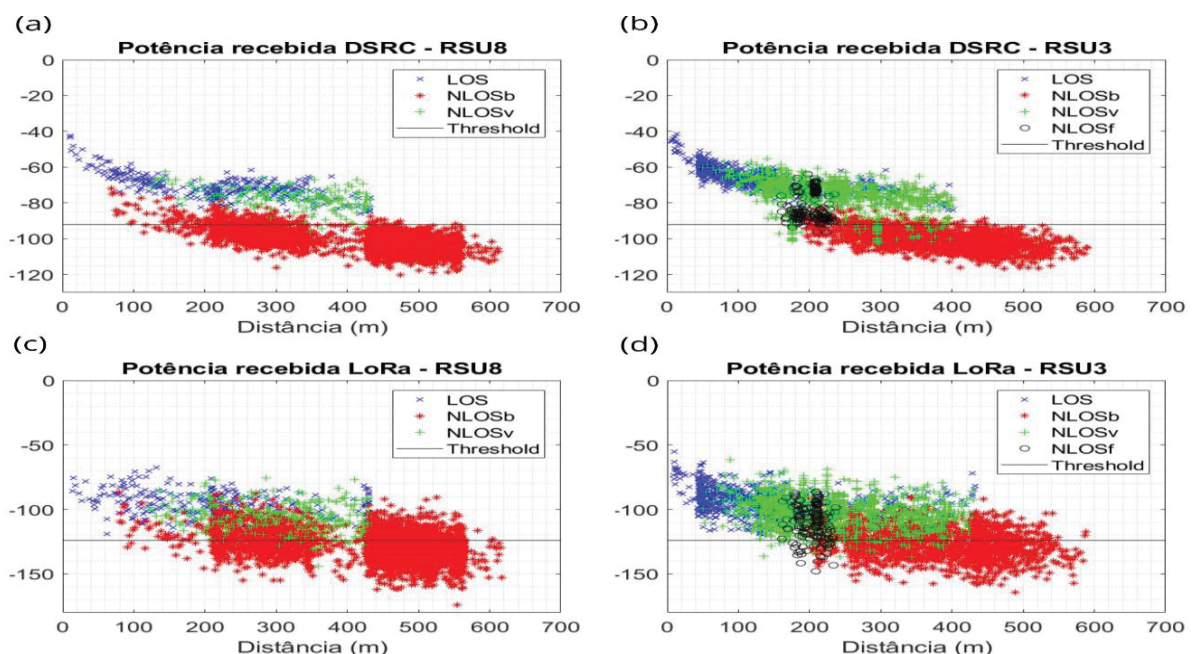
4.1 SIMULAÇÃO

Na parte simulada do presente trabalho, foram consideradas situações de comunicação com um veículo em movimento (V2I) tanto para a frequência da tecnologia DSRC como para a do LoRa. A simulação do canal foi realizada na área do Cento Politécnico da UFPR no software GEMV² avaliando-se a potência recebida pela distância de cada tipo de obstrução assim como a porcentagem do sinal recebido acima do limiar de recepção.

4.1.1 Resultados e análise das simulações V2I

Para efeitos de comparação e análise escolheu-se as RSUs de melhor (RSU3) e pior taxa de sinal recebido acima do limiar (RSU8) na frequência de 5,9 GHz (DSRC), e simulado para o DSRC e LoRa na frequência de 915 MHz. A potência recebida apresentou comportamento conforme mostrado no GRÁFICO 5.

GRÁFICO 5 – POTÊNCIA RECEBIDA SIMULADA V2I



FONTE: A autora (2019).

Para o DSRC até o limite de -92 dBm, valor encontrado por Boban, Barros e Tonguz (2014), o sinal é recebido e decodificado, abaixo deste nível é considerado como sendo ruído. Observa-se que o recebimento de pacotes com nível de potência acima do limiar ocorre em espaços com tráfego de veículos próximos à RSU, o que é perfeitamente compatível com o resultado teórico esperado, devido à atenuação do espaço livre que na frequência simulada exerce grande impacto ($P = 92,4 + 20 \log r_{[km]} + 20 \log f_{[GHz]}$) e pela baixa capacidade de espalhamento do sinal neste espectro de frequência com a grande maioria dos encales obstruídos por edificações ficando abaixo do limiar de recepção (TABELA 11). Já para o LoRa com limiar de -124 dBm, valor do menor limiar dos testes de campo realizados (SF7), o nível de atenuação do sinal devido a propagação ($P = 32,4 + 20 \log r_{[km]} + 20 \log f_{[MHz]}$) é sensivelmente menor que aquela da frequência simulada na tecnologia DSRC. Também o processo de comunicação é sensivelmente facilitado pela capacidade de espalhamento do sinal com maior número de sinais ficando acima do limiar quando estão obstruídas por edificações, conforme TABELA 11.

TABELA 11 – SINAL ACIMA DO LIMIAR V2I SIMULADO

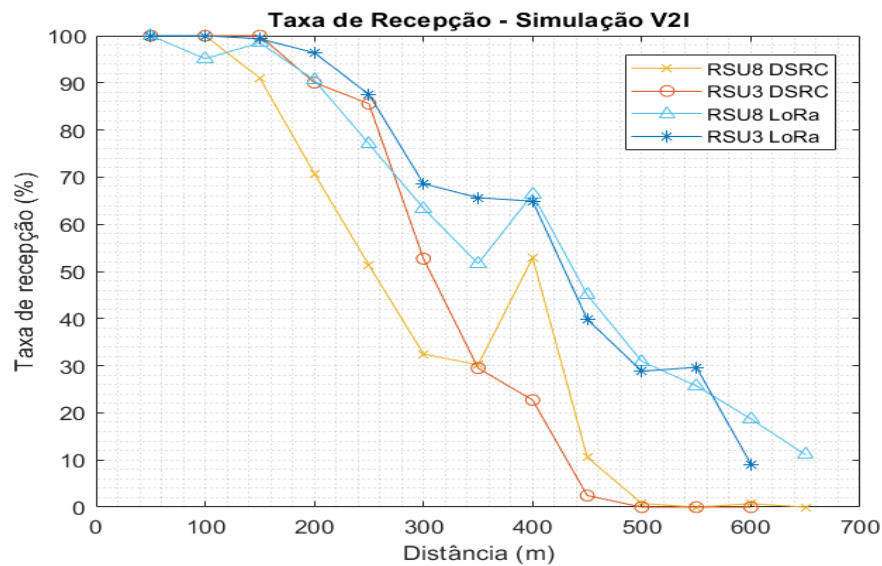
	RSU3		RSU8	
	DSRC	LoRa	DSRC	LoRa
Total	51,73 %	71,20%	20,93 %	46,72%
LOS	100,00 %	99,45%	100,00 %	100,00%
NLOSb	7,10 %	39,80%	8,50 %	37,10%
NLOSv	92,60 %	96,50%	98,00 %	95,40%
NLOSf	95,80 %	83,20%	-	-

FONTE: A autora (2019).

4.1.1.1 Taxa de recepção

As taxas de recepção, conforme mostrada no GRÁFICO 6, mostram os resultados simulados para as tecnologias DSRC e LoRa.

GRÁFICO 6 – TAXA DE RECEPÇÃO SIMULADA V2I



FONTE: A autora (2019).

Para o LoRa a taxa de recepção em pequenas distâncias, até 200 m, é equivalente à do DSRC, a partir desse ponto observa-se a superioridade do sistema LoRa praticamente ao longo de todo o enlace, o que conforme preconiza a teoria está em consonância com os resultados esperados.

4.2 TESTE DE CAMPO - LORA

A parte não simulada do presente trabalho, se deu por medições efetuadas no Cento Politécnico da UFPR. Foram consideradas situações de comunicação com os dois veículos parados, com um veículo em movimento (V2I) e com os dois veículos em movimento (V2V). Para os testes foram mantidas a frequência de transmissão de 915 MHz, a potência de transmissão de 12 dBm, a largura da banda de 125 kHz e a taxa de código de 4/5, variando o fator de espalhamento para os valores extremos 7 e 12. O aparato de transmissão/recepção está descrito e caracterizado no capítulo 3.

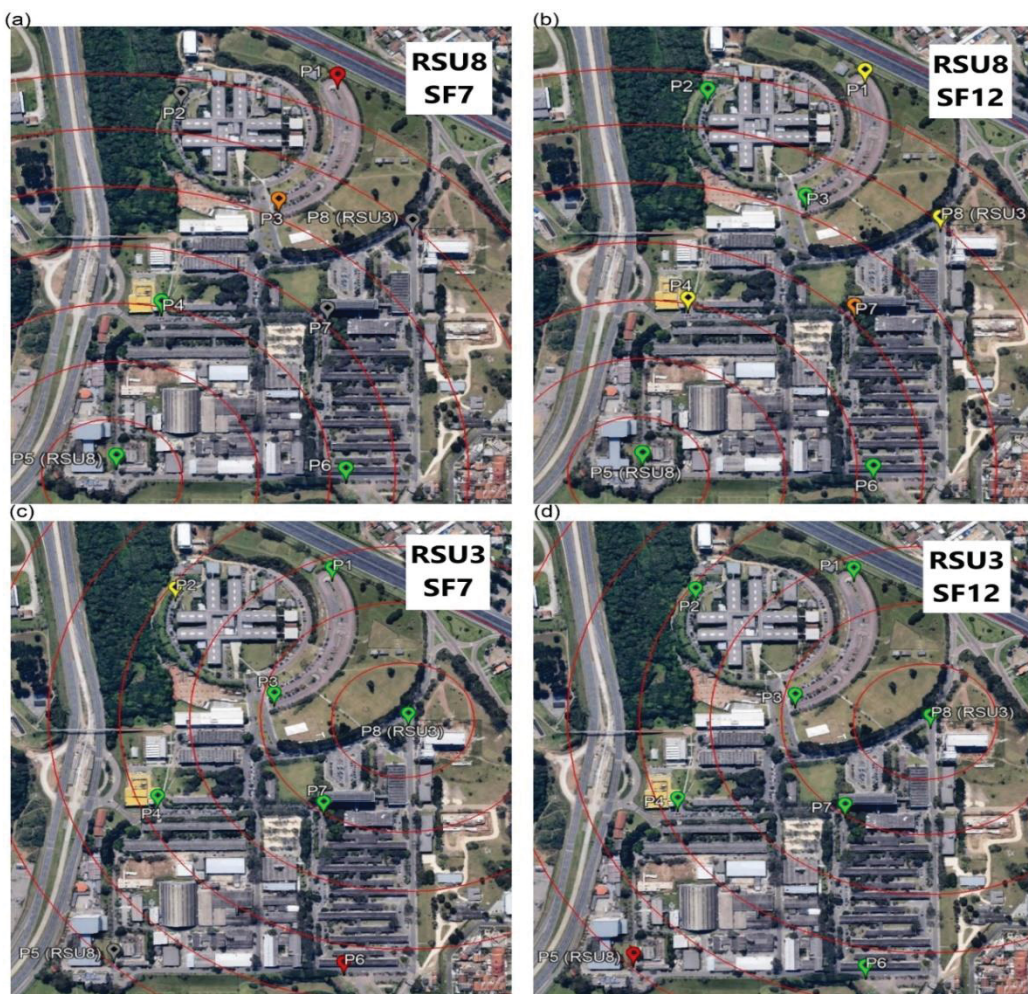
Todos os dados obtidos nos testes de campo são referentes a pacotes recebidos e nestes é possível determinar a potência de recepção e a relação sinal/ruído (SNR).

4.2.1 Resultados e análises dos testes com ambos os veículos parados

Os aparatos de transmissão e recepção foram instalados em cada um dos veículos. O veículo com o transmissor permaneceu estacionado nos pontos P5,

correspondente ao local de pior índice de recepção simulada para o DSRC (correspondente a RSU8) e no ponto P8 ,de melhor recepção (correspondente a RSU3). Enviava um pacote de dados a cada segundo para o equipamento receptor, instalado, no segundo veículo, que por determinado período, tempo suficiente para transmissão de 150 pacotes, ficava estacionado nos pontos específicos (P₁ a P₈) mostrados na FIGURA 25, com o raio de cada círculo correspondendo a 100 m. Estes pontos foram escolhidos por terem se mostrados como pontos críticos em testes de movimento realizados, cronologicamente, em data anterior.

FIGURA 25 – MAPA DE COBERTURA DOS PONTOS COM DOIS VEÍCULOS PARADOS



FONTE: A autora (2019).

A TABELA 12 apresenta a legenda de cores utilizada na FIGURA 25 de acordo com a porcentagem de pacotes recebidos.

TABELA 12 – LEGENDA DO MAPA DE COBERTURA COM DOIS VEÍCULOS PARADOS

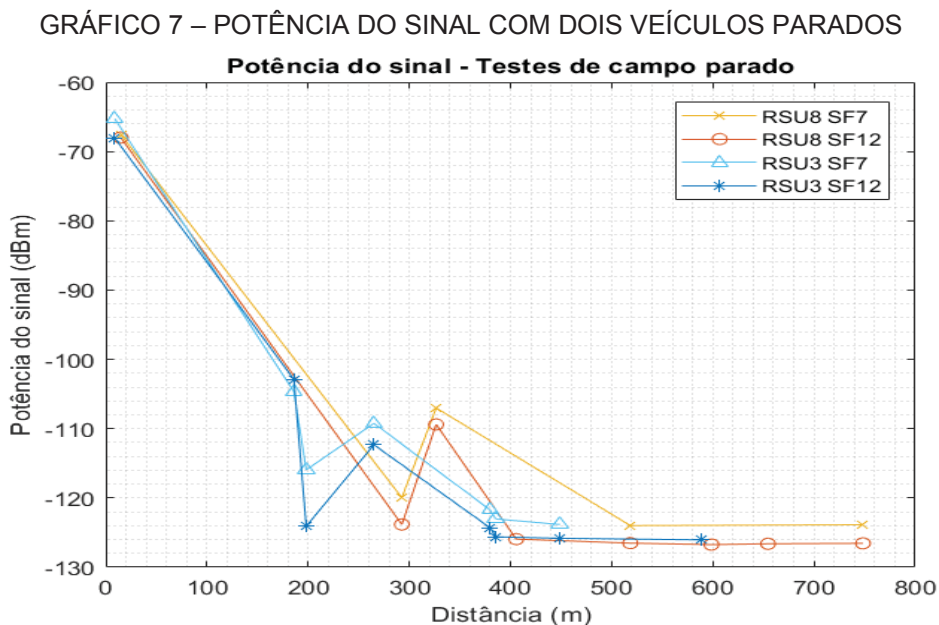
Cores	Porcentagem de recebimento
Cinza	0
Vermelho	1 - 25
Laranja	26 - 45
Amarelo	46 - 75
Verde	76 - 100

FONTE: A autora (2019).

O comportamento da recepção se mostrou coerente com as especificações técnicas do LoRa. Observa-se na imagem, que quando o fator de espalhamento aumenta o raio de alcance do sinal recebido também aumenta e, também, aumenta a taxa de recepção para os sinais mais próximos, ou seja, há um acréscimo na robustez e sensibilidade do equipamento. Com SF12 houve comunicação entre o transmissor e todos os pontos (P_1 a P_8) em maior ou menor grau, influenciados principalmente pela distância e obstruções no percurso.

4.2.1.1 Potência do sinal recebido

O GRÁFICO 7 apresenta os níveis do sinal recebido em função da distância e compara os efeitos do fator de espalhamento, as potências do sinal são apenas dos pacotes recebidos, não se tendo a informação das potências dos pacotes perdidos.



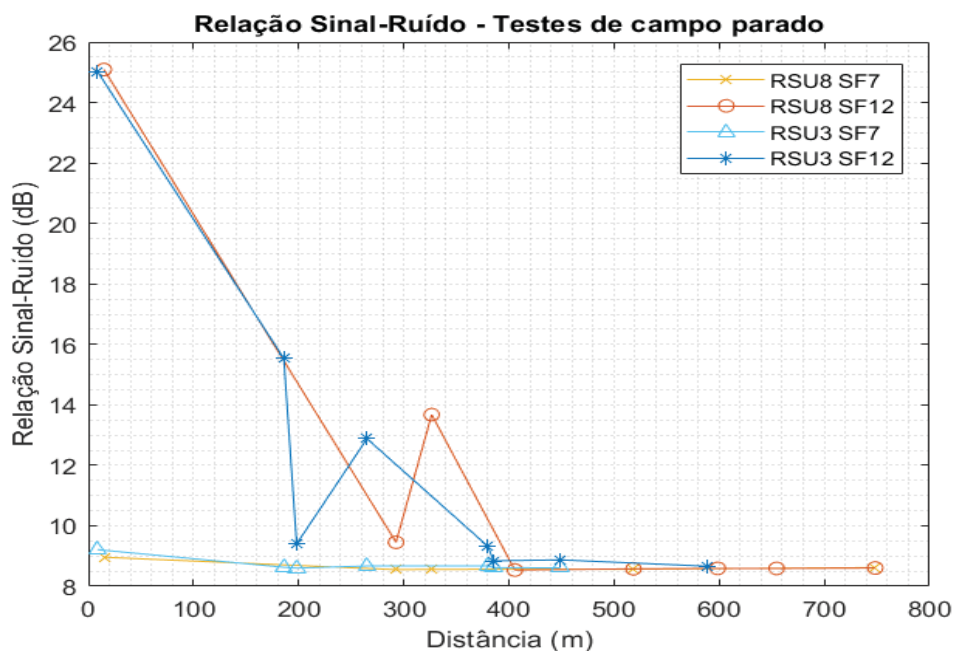
FONTE: A autora (2019).

Com SF7 a potência do sinal recebido tende a ser maior, porém o equipamento tem menor sensibilidade que com SF12, havendo maior ganho operacional neste caso, ou seja, menor perda de pacotes transmitidos e maior raio de recepção.

4.2.1.2 Relação Sinal-Ruído do sinal recebido

A SNR, para os diferentes SFs foi obtido pela placa utilizada para a comunicação LoRa e é somente dos pacotes recebidos assim como a potência recebida não se tem a informação do SNR para os pacotes perdidos (GRÁFICO 8).

GRÁFICO 8 – RELAÇÃO SINAL-RUÍDO COM DOIS VEÍCULOS PARADOS



FONTE: A autora (2019).

Com SF menor a relação sinal/ruído sempre se manteve em níveis muito baixos, o que compromete a integridade do sinal recebido bem como a confiabilidade do enlace. Com o aumento do fator de espalhamento, em distâncias próximas, a SNR se mostra em níveis confiáveis, porém há uma rápida degradação com variação da distância (a partir de 200 m dependendo da morfologia do enlace) e tendendo a se equiparar ao SF menor. Uma menor relação sinal/ruído impacta diretamente a taxa BER.

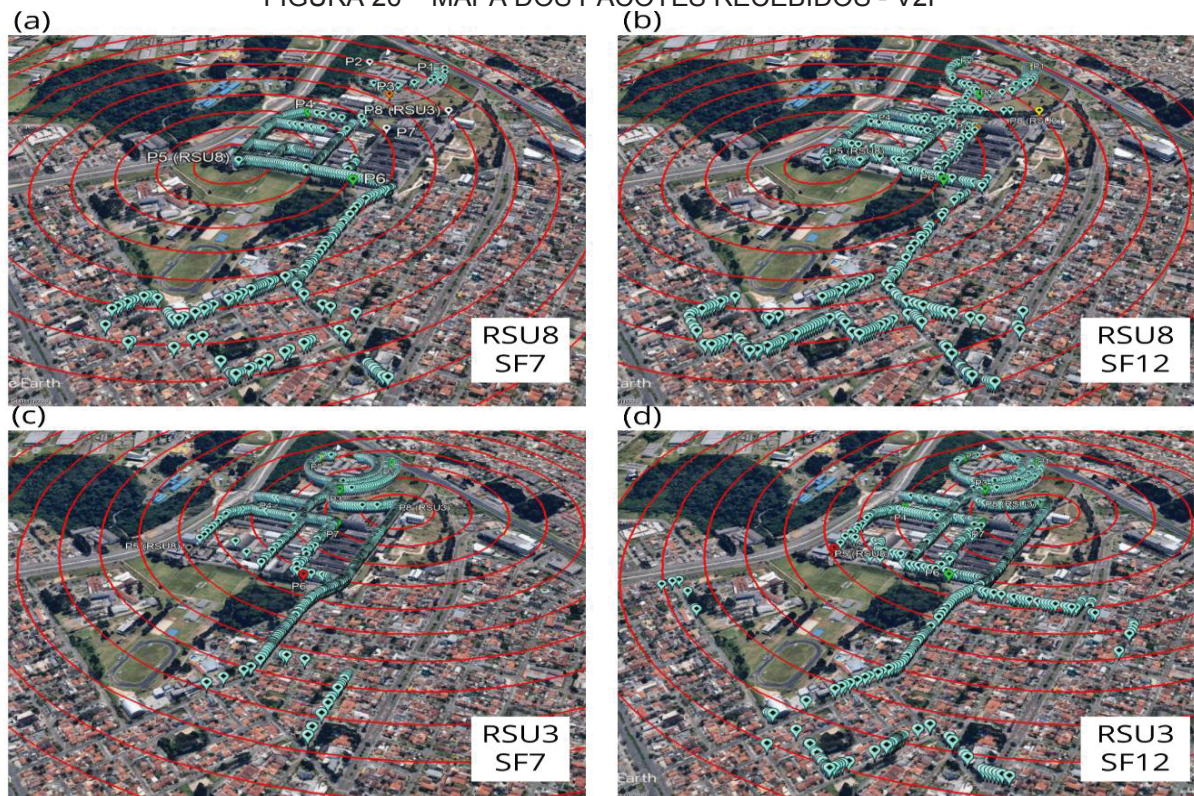
4.2.2 Resultados e análise dos testes V2I

Com o transmissor posicionado num veículo que circulou de forma aleatória, enviando um pacote a cada segundo para o receptor posicionado em um veículo que permaneceu parado na latitude -25.451897 e longitude -49.236757 , posição muito próxima a do RSU8 e na latitude -25.44977727 e longitude -49.2312217 , correspondente a RS3 simulada na tecnologia DSRC. Procurou-se manter similaridade entre as rotas percorridas na simulação DSRC dentro do campus, porém como a tecnologia em experimentação tem, sabidamente, maior alcance que a DSRC simulada, para efeitos de levantamento de dados extrapolou-se o limite do Campus do Centro Politécnico indo até a distância limite em que o sinal foi definitivamente perdido. Os resultados obtidos a partir do procedimento descrito estão apresentados na sequência.

4.2.2.1 Mapas de cobertura

A FIGURA 26 traz o mapa do campus com os pontos em azul representando os locais onde o veículo em movimento conectou-se ao receptor.

FIGURA 26 – MAPA DOS PACOTES RECEBIDOS - V2I

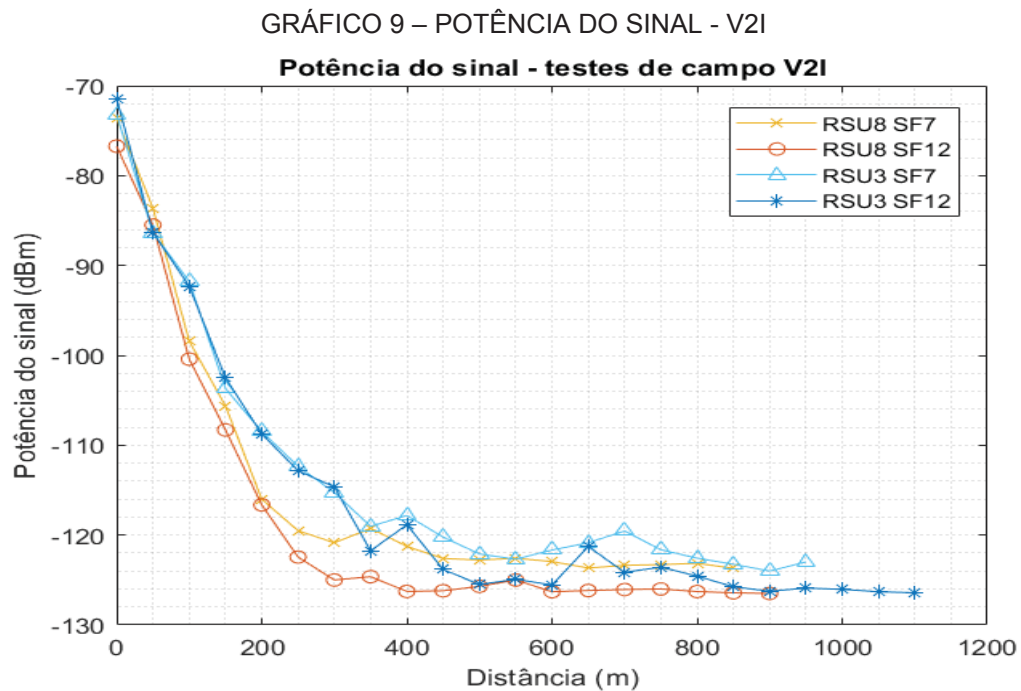


FONTE: A autora (2019).

Com um dos veículos em movimento procurou-se avaliar a máxima distância para o sinal recebido, percorrendo os arredores do campus do Centro Politécnico, conforme mostrado na FIGURA 26. Também, neste cenário de teste o maior fator de espalhamento propiciou um maior percentual de recepção dos pacotes transmitidos a distancias maiores. Porém com a adição da velocidade em alguns pontos não há recepção de pacotes onde antes existia (sensibilidade ao efeito *Doppler*).

4.2.2.2 Potência recebida

Os valores da potência recebida para os diferentes valores de SFs considerando cada uma das RSUs analisadas é mostrada no GRÁFICO 9.



FONTE: A autora (2019).

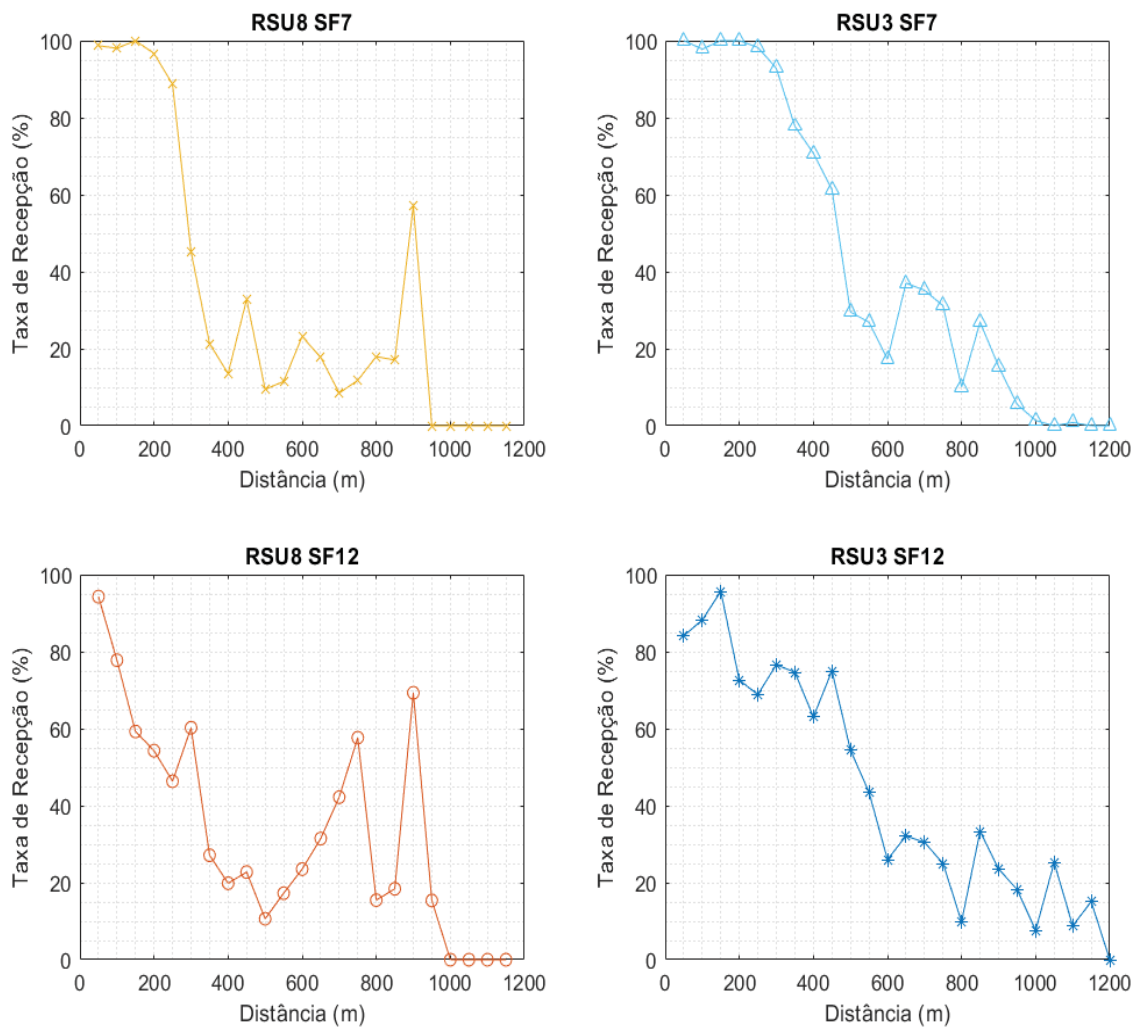
O LoRa se mostra muito sensível ao efeito da velocidade em relação a potência do sinal recebido, isto pode ser explicado pelo efeito Doppler. Um menor fator de espalhamento leva há uma menor sensibilidade a este efeito, o que compensa em parte o maior limiar de recepção e praticamente se equipara ao maior SF quando se considera a totalidade das medições.

4.2.2.3 Taxa de recepção

Com os dados dos testes de campo foram calculadas as porcentagens de sinais transmitidos que foram recebidos, estes valores são apresentados no GRÁFICO 10.

GRÁFICO 10 – TAXA DE RECEPÇÃO V2I

Taxa de recepção - Testes de campo V2I



FONTE: A autora (2019).

Na situação em análise um menor SF diminui o raio de alcance da recepção do sinal, porém em distâncias menores a taxa de recepção é sensivelmente superior que para o SF maior, isto se deve, como dito anteriormente a menor sensibilidade do SF (menor) ao efeito Doppler.

A TABELA 13 compila a média dos valores para cada RSU e SF.

TABELA 13 – PORCENTAGEM DE PACOTES RECEBIDOS V2I - LORA

	RSU8 SF7	RSU8 SF12	RSU3 SF7	RSU3 SF12
Taxa de recebimento UFPR	37,77%	36,17%	76,29%	68,01%
Taxa de recebimento Geral	34,21%	34,78%	53,08%	48,41%

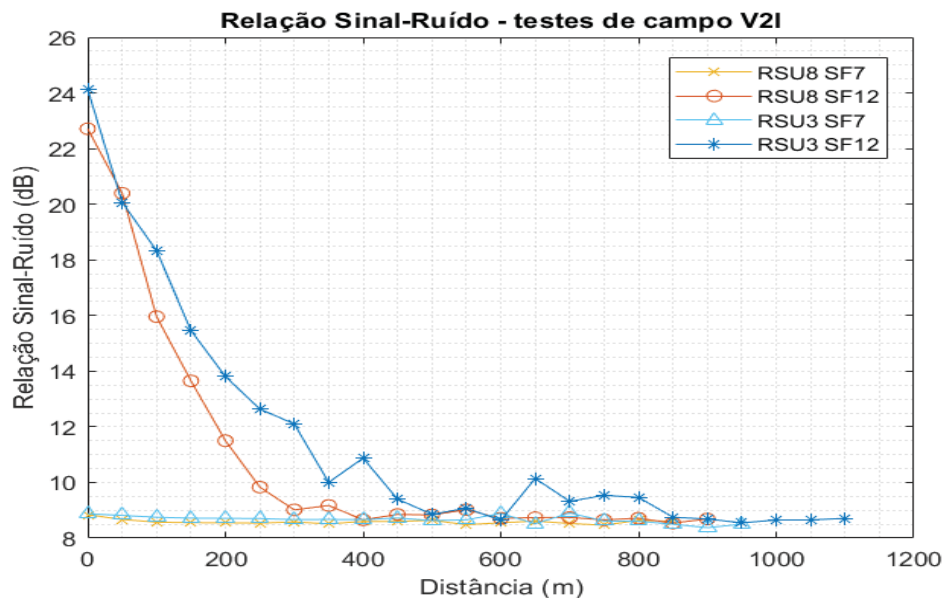
FONTE: A autora (2019).

Considerando o mesmo fator de espalhamento a RSU3 manteve, conforme esperado, desempenho médio consideravelmente superior a RS8 no que diz respeito ao número de pacotes recebidos.

4.2.2.4 Relação sinal/ruído

Os valores da SNR para os diferentes valores de SFs considerando cada uma das RSUs analisadas é mostrada no GRÁFICO 11.

GRÁFICO 11 – RELAÇÃO SINAL-RUÍDO V2I



FONTE: A autora (2019).

O comportamento médio da relação sinal/ruído com um dos veículos em movimento se manteve coerente àquela com ambos os veículos parados. Ressalte-

se que com um dos veículos em movimento o número de pacotes recebidos de pontos aleatórios é muito superior ao primeiro caso. E a análise aqui realizada é da média do número de pacotes recebidos.

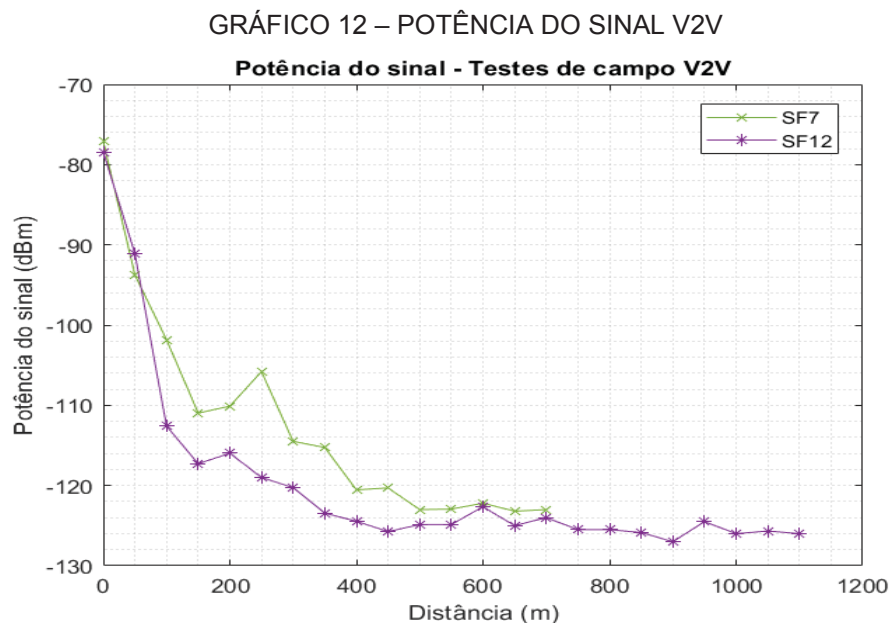
4.2.3 Resultados e análise dos testes V2V

O dispositivo transmissor posicionado num veículo, que circulou de forma aleatória dentro do campus, enviava uma mensagem a cada segundo para o receptor posicionado em um veículo que também circulou de forma aleatória dentro do campus e fora do campus indo até o limite de distância em que o sinal foi definitivamente perdido.

Os resultados obtidos a partir do procedimento descrito estão apresentados na sequência.

4.2.3.1 Potência recebida

Com ambos os veículos em movimento aleatório e variando-se o fator de espalhamento, a potência recebida se comportou, de acordo com a distância entre os veículos, conforme mostra o GRÁFICO 12.



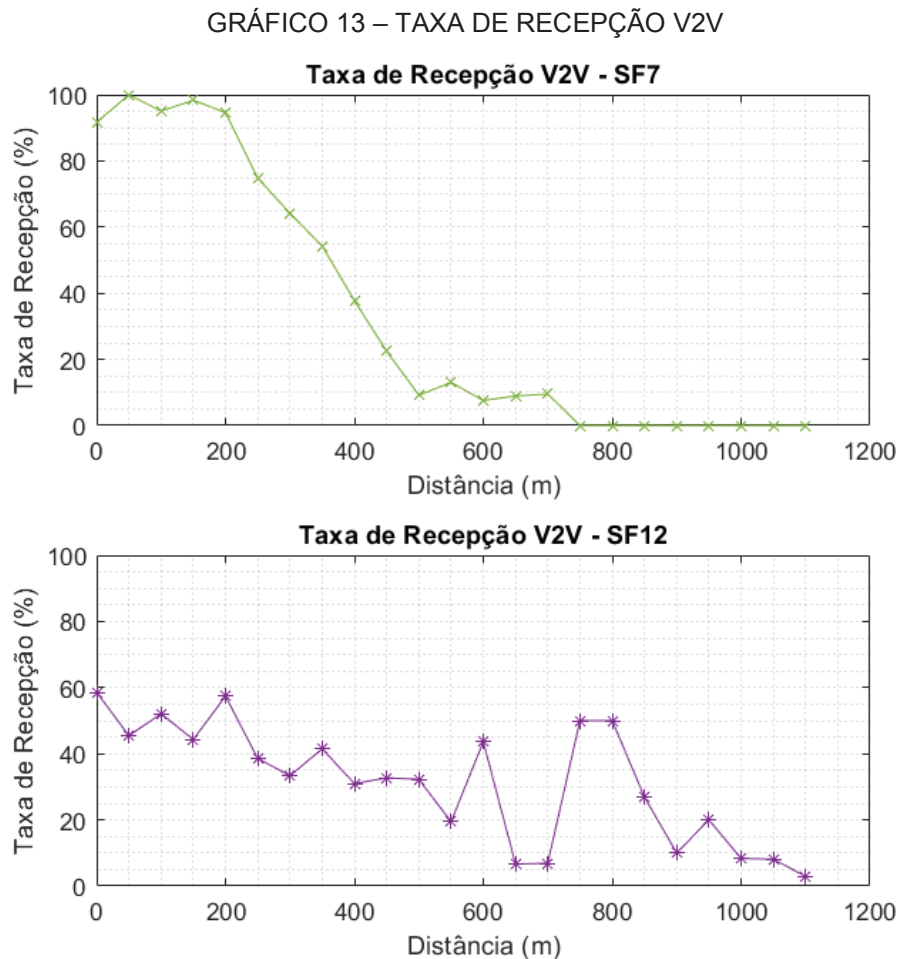
FONTE: A autora (2019).

Conforme discutido para o V2I, a velocidade exerce grande impacto nos níveis de recepção do sinal, devido principalmente ao efeito Doppler, assim no V2V onde as

velocidades dos veículos irão se somar ou se subtrair o efeito Doppler irá adquirir importância ainda maior. Nesta situação, como se observa no GRÁFICO 9 com SF7, os níveis de recepção foram sempre significativamente superiores ao SF12 em distâncias de até aproximadamente 450 m, e o raio do sinal recebido para o SF maior se manteve nas condições do V2I.

4.2.3.2 Taxa de recepção

Com os dados dos testes de campo foram calculadas as porcentagens de sinais transmitidos que foram recebidos, estes valores são apresentados no GRÁFICO 13.



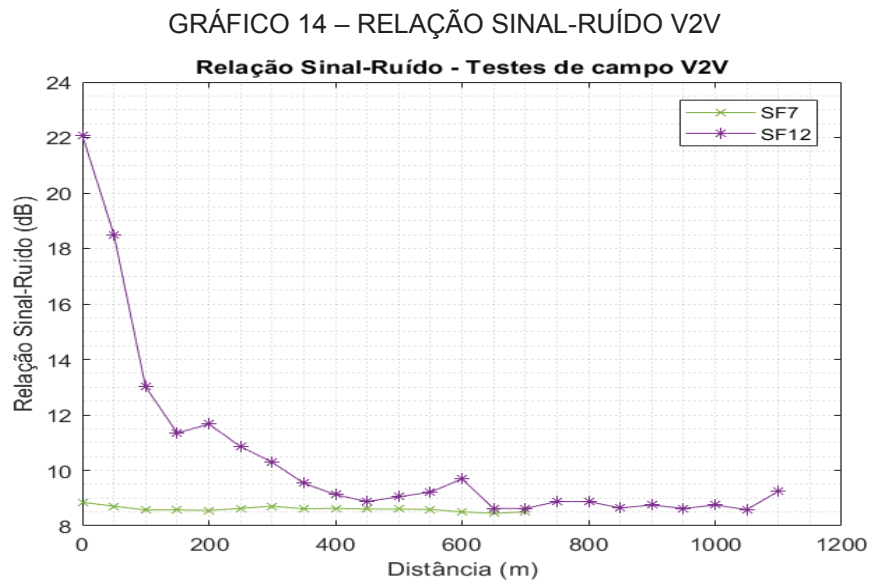
FONTE: A autora (2019).

Na situação em análise um menor SF diminui o raio de alcance da recepção do sinal, porém em distâncias menores a taxa de recepção é sensivelmente superior que para o SF12, isto se deve, como dito anteriormente a menor sensibilidade do SF7

ao efeito Doppler. Note-se que para o SF12 mesmo em pequenas distancias a queda da taxa de recepção é acentuada (60%).

4.2.3.3 Relação Sinal/Ruído (SNR)

O GRÁFICO 14 mostra a variação da SNR em função da distância e com os fatores de espalhamento analisados.



FONTE: A autora (2019).

Analogamente ao V2I, o comportamento médio da relação sinal/ruído com ambos os veículos em movimento se manteve coerente àquela com ambos os veículos parados e, com relação ao V2I, houve uma queda bem mais acentuada em pequenas distancias para o SF12.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foram analisadas duas tecnologias distintas, DSRC e LoRa, em aplicações V2I e V2V, tanto através de simulações do canal (DSRC) quanto por simulações e medidas de campo para a tecnologia LoRa. Como as tecnologias têm características técnicas e operacionais distintas e operam em faixas de frequências com grande diferença não foi objetivo principal compará-las e sim apresentar diferenças e características técnicas de operação, pois pela faixa de frequência a comparação não é tecnicamente viável e, também pelas características de taxas de transmissão e tamanhos de pacotes.

A tecnologia DSRC é homologada para comunicações veiculares, porém devido a sua baixa cobertura pode ser necessária a instalação de RSUs a distâncias de aproximadamente 200 metros o que acarreta custo para a sua implementação podendo torná-la economicamente inviável comercialmente em regiões com grande concentração de edificações e baixo tráfego. A análise de perdas e raio de alcance do sinal deixou evidenciado que para a tecnologia DSRC há grande volume de perdas de sinal devido a obstruções de prédios e menor nível de espalhamento, devido a frequência de operação mais elevada, as diferenças significativas de desempenho entre as RSUs e a grande quantidade de sinais recebidos abaixo do limiar de recepção. Tem a vantagem de permitir a transmissão de pacotes maiores com uma maior taxa de transmissão.

Para a tecnologia LoRa a porcentagem de pacotes recebidos se mostrou significativamente maior, principalmente devido ao maior espalhamento do sinal e um maior raio de alcance em função da menor atenuação de propagação e espalhamento do sinal por esta operar em uma faixa de frequência significativamente menor.

Fica patente, para a tecnologia LoRa, a influência da velocidade, devido à alta sensibilidade desta tecnologia ao efeito Doppler, o qual pode ser atenuado com a calibração do *hardware* para um fator de espalhamento (SF) menor, porém com prejuízo no desempenho de recepção, alcance e relação sinal/ruído (SNR). Os resultados da simulação e dos testes de campo se mostraram coerentes e em concordância com a teoria para os valores de SFs, tanto para a condição ponto-a-ponto quanto para V2I e V2V. Ressalte-se que para a condição ponto-a-ponto o fator de espalhamento 12 (SF12) foi significativamente superior ao SF7 em todos os pontos

mensurados, o que corrobora com a teoria, visto nesta condição não haver influência do efeito Doppler.

A tecnologia LoRa pode ser empregada em aplicações com menos caracteres na transmissão de mensagens e para situações onde não seja necessário o envio frequente de pacotes, devido sua menor taxa de transmissão e a restrições dessa taxa impostas por regulamentação (no Brasil, resolução ANATEL 680/2017), como alertas de acidentes, informações de nível de tráfego veicular e pontos de interesse, especialmente em regiões mais extensas e com alta densidade de edificações e obstruções, porém não se recomenda para a comunicação V2I e V2V pelo baixo desempenho apresentado.

Nas simulações levadas a termo, o objetivo foi avaliar o canal de comunicação, tanto para o DSRC quanto para o LoRa, ou seja, não se gerou tráfego de rede e nos testes de campo limitou-se a análise de tráfego de dois veículos nos testes para V2I e V2V.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

A possibilidade de continuidade do presente trabalho pode ser a implementação do LoRa em camadas superiores (modelo OSI-Open System Interconnection), desenvolvimento de um modelo estocástico específico para avaliação do sistema considerando todas suas especificidades em relação a comunicação veicular ou ainda estudos relativos ao comportamento da comunicação veicular em ambientes *indoor*.

REFERÊNCIAS

- AL-SULTAN, Saif, *et al.* A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network. **Journal of Network and Computer Applications**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 380–392, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2013.02.036>>. Acesso em: 07 abr. 2019.
- AUGUSTIN, Aloÿs, *et al.* A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things. **Sensors (Switzerland)**, [s. l.], v. 16, n. 9, p. 1–18, 2016.
- BENZAIR, B.; SMITH, H.; NORBURY, J. R. Tree Attenuation Measurements At 1-4 GHz for mobile radio systems. **System**, [s. l.], p. 16–20, 1991.
- BOBAN, Mate, *et al.* Impact of vehicles as obstacles in Vehicular Ad Hoc Networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 15–28, 2011.
- BOBAN, Mate; BARROS, João; TONGUZ, Ozan K. **Geometry-Based Vehicle-to-Vehicle Channel Modeling for Large-Scale Simulation**, [s. l.], v. 63, n. 9, p. 4146–4164, 2014.
- CARVALHO, Deborah Ribeiro. **Árvore de decisão/ algoritmo genético para tratar o problema de pequenos disjuntos em classificação de dados**. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2005.
- CISCO. **Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021 White Paper**. 2016. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- COLEY, David A. **An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**. [S.l: s.n.], [?].
- COX, Earl. **Fuzzy Modeling and Genetic Algorithms for Data Mining and Exploration**. [S.l: s.n.], [?].
- FIDELIS, M. V.; LOPES, H. S.; FREITAS, A. A. Discovering comprehensible classification rules with a genetic algorithm. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE CONFERENCE ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, ICEC 2000, **Anais...** : IEEE, 2000.
- GOLDBERG, David E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Repr. with ed. Boston: Addison-Wesley Longman, 1989.
- GOZALVEZ, J.; SEPULCRE, M.; BAUZA, R. IEEE 802.11p Vehicle to Infrastructure Communications in Urban Environments. **IEEE Communications Magazine**, [s. l.], n. May, p. 176–183, 2012.

HERRERA-TAPIA, Jorge *et al.* Evaluating the use of sub-gigahertz wireless technologies to improve message delivery in opportunistic networks. **Proceedings of the 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2017**, [s. l.], p. 305–310, 2017.

HORNER, Andrew; GOLDBERG, David. Genetic algorithms and computer-assisted music composition. **Urbana**: [s. n.], 1991.

JIANG, Daniel *et al.* Design of 5.9 GHz DSRC-based vehicular safety communication. **IEEE Wireless Communications**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 36–43, 2006.

KAIWARTYA, Omprakash *et al.* Internet of Vehicles: Motivation, Layered Architecture, Network Model, Challenges, and Future Aspects. **IEEE Access**, [s. l.], v. 4, p. 5356–5373, 2016.

KRAJZEWICZ, Daniel *et al.* SUMO (Simulation of Urban MObility) - an Open-Source Traffic Simulation. **Proceedings of the 4th Middle East Symposium on Simulation and Modelling (MESM20002)**, [s. l.], n. January, p. 183–187, 2002. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/6661>>. Acesso em: 14 ago. 2019.

LI, Fan; WANG, Yu. Routing in vehicular ad hoc networks: a survey. **IEEE Vehicular Technology Magazine**, June, p. 12–22, 2007.

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos genéticos: uma importante ferramenta da inteligência computacional**. 2. ed. São Paulo: Brasport, 2008.

LINKA, Hendrik *et al.* Path Loss Models for Low-Power Wide-Area Networks : Experimental Results using LoRa. In: VDE ITG-FACHBERICHT MOBILKOMMUNIKATION 2018. **Anais...** [s.l: s.n.], 2018.

LOPEZ, Pablo Alvarez *et al.* Microscopic Traffic Simulation using SUMO. **IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC**, nov. p. 2575–2582, 2018.

LORA ALLIANCE. A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™ LoRaWAN™ What is it? [s. l.], n. November, 2015. Disponível em: <http://www.semtech.com/wireless-rf/iot/LoRaWAN101_final.pdf>. Acesso em: 10 set. 2019.

MOUSTAFA, HASSNAA; ZHANG, Yan. **Vehicular Networks: Techniques, Standards, and Applications**. [S.l.] : Auerbach Publications, 2019.

OLARIU, STEPHAN ; WEIGLE, Michele C. **Vehicular Networks: From Theory to Practice**. [S.l.] : Chapman and Hall/CRC, 2017.

OMAR, Hassan Aboubakr; LU, Ning; ZHUANG, Weihua. Wireless access technologies for vehicular network safety applications. **IEEE Network**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 22–26, 2016.

PASCAL, J. *et al.* Urban Channel Models for Smart City IoT- Networks Based on

Empirical Measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz. In: ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR, AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS (PIMRC), 2017. **Anais...**, 2017. Doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292708.

PETAJAJARVI, JUHA; PETTISSALO, Marko. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation for lora technology. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ITS TELECOMMUNICATIONS, 2015. **Anais...** [s. l.], p. 55–59, 2015.

PETÄJÄJÄRVI, Juha *et al.* Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, [s. l.], v. 13, n. 3, 2017.

POZO, Aurora *et al.* *Computação Evolutiva*. Portugal: Departamento de Informática, UFP, [s. l.], 2011.

RAO, CHAITANYA KUMAR. Asymptotic Analysis of Wireless Systems with Rayleigh Fading. **California Institute of Technology**, [s. l.], 2007.

RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless Communication: Principles and Practice**. 2. ed. Westford: Pearson Education, 2010.

SANCHEZ-IBORRA, R. *et al.* Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions. **Sensors**, [s. l.], v. 18, n. 3, 2018.

SANCHEZ-IBORRA, Ramon. Integrating LP-WAN Communications within the Vehicular Ecosystem. **Journal of Internet Services and Information Security**, v.7, n. 4, nov. p. 1–12, 2017.

SANTA, José *et al.* LPWAN-Based Vehicular Monitoring Platform with a Generic IP Network Interface. [s. l.], n. i, p. 1–17, 2019.

XIAO, Yang; ROSDAHL, Jon. Throughput and delay limits of IEEE 802.11. **IEEE Communications Letters**, [s. l.], v. 6, n. 8, p. 355–357, 2002.

XU, Zhigang *et al.* DSRC versus 4G-LTE for connected vehicle applications: A study on field experiments of vehicular communication performance. **Journal of Advanced Transportation**, [s. l.], v. 2017, n. August, 2017.

YACOUB, M. D. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. **CRC Press**, [s. l.], 1993.

ZHANG, Linjuan *et al.* A multilevel information fusion approach for road congestion detection in VANETs. **Mathematical and Computer Modelling**, [s. l.], v. 58, n. 5–6, p. 1206–1221, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2013.02.004>>. Acesso em: 22 set. 2019.

ZHENGYING, Wang; BINGXIN, Shi; ERDUN, Zhao. Bandwidth-delay-constrained least-cost multicast routing based on heuristic genetic algorithm. **Computer Communications**, [s. l.], 2001.