

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE DE OLIVEIRA BUENO

Otimização da seleção de parâmetros de transmissão de redes LORA Mesh de gateway single channel em ambientes rurais

UBERLÂNDIA
2021

HENRIQUE DE OLIVEIRA BUENO

Otimização da seleção de parâmetros de transmissão de redes LORA Mesh de gateway single channel em ambientes rurais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Redes de computadores

UBERLÂNDIA
2021

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B928 2021	<p>Bueno, Henrique de Oliveira, 1996- Otimização da seleção de parâmetros de transmissão de redes LORA Mesh de gateway single channel em ambientes rurais [recurso eletrônico] / Henrique de Oliveira Bueno. - 2021.</p> <p>Orientador: Paulo Roberto Guardieiro. Coorientador: Éderson Rosa da Silva. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.608 Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Guardieiro, Paulo Roberto, 1952-, (Orient.). II. Silva, Éderson Rosa da, 1984-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

HENRIQUE DE OLIVEIRA BUENO

Otimização da seleção de parâmetros de transmissão de redes LORA Mesh de gateway single channel em ambientes rurais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Redes de computadores

Uberlândia, 27 de outubro de 2021

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro – Orientador (UFU)

Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva – Coorientador (UFU)

Prof. Dr. Júnio Moreira – (IFTM)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 794, PPGEELT				
Data:	Vinte e sete de outubro de dois mil e vinte um	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:00
Matrícula do Discente:	11922EEL013				
Nome do Discente:	Henrique de Oliveira Bueno				
Título do Trabalho:	Otimização da seleção de parâmetros de transmissão de redes LORA Mesh de gateway single channel em ambientes rurais				
Área de concentração:	Processamento de informação				
Linha de pesquisa:	Redes de computadores				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Paulo Roberto Guardieiro. Título do projeto: Otimização da seleção de parâmetros de transmissão de redes LORA Mesh de gateway single channel em ambientes rurais Agência financiadora: UFU. Número do processo na agência financiadora: ___ Vigência do projeto: atual.				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Éderson Rosa da Silva - FEELT/UFU; Júnio Moreira- IFTM; Paulo Roberto Guardieiro - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Paulo Roberto Guardieiro, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Ederson Rosa da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/10/2021, às 16:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Junio Moreira, Usuário Externo**, em 27/10/2021, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Roberto Guardieiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/10/2021, às 16:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3131632** e o código CRC **DCB64A42**.

Dedico este trabalho à minha família, por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, pelo amor e pelo cuidado, desde sempre.

Ao meu irmão, pelo apoio nos momentos mais complicados e pelo suporte nas atividades de campo do trabalho.

A Jessica Rodrigues Martins, pelo amor, pelo apoio e pelo companheirismo em todos os momentos e também pelo suporte nas atividades de campo do trabalho.

Ao Prof. Paulo Roberto Guardieiro, principalmente pela ajuda nos primeiros passos na pós-graduação e pela disposição.

Ao Prof. Éderson Rosa da Silva, pelo apoio fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, pelas dicas dadas e por toda a atenção e disposição oferecidas.

Aos meus amigos, por todo o companheirismo e parceria de sempre.

Ao meu pai, que mesmo não presente agora, foi e sempre será a minha base e inspiração.

RESUMO

BUENO, H. O. **Otimização da seleção de parâmetros de transmissão de redes LORA Mesh de gateway single channel em ambientes rurais**. 2021. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

A tecnologia *Long Range* (LoRa) possui como característica possibilitar transmissões *wireless* de dados a longas distâncias com taxas limitadas, porém utilizando dispositivos com custo reduzido, uma potência baixa e, como consequência, com um consumo energético pequeno. A camada física deste tipo de rede é configurada, principalmente, por quatro parâmetros, sendo eles o *spreading factor*, a taxa de código, a potência de transmissão e a largura de banda. Tais parâmetros são responsáveis por ajustar a operação da comunicação em relação à taxa de transmissão, robustez a ruídos e interferências, alcance do sinal e consumo de energia. Portanto, é essencial que a escolha dos valores destes parâmetros seja realizada de forma a otimizar o desempenho da rede LoRa em referência às características mencionadas. Para redes instaladas em determinadas localizações, como em ambientes rurais, por exemplo, tal escolha possui uma relevância ainda maior, visto que, para aplicações deste tipo, muitas vezes os transmissores se encontram em locais pouco acessíveis que dificultam a realização de manutenções gerais do dispositivo, como uma reconfiguração dos parâmetros ou uma substituição de bateria. Neste contexto, este trabalho possui como proposta apresentar o desenvolvimento de um método baseado em algoritmos genéticos, capaz de definir uma configuração de parâmetros de transmissão de uma rede LoRa *Mesh* de *gateway single channel* para ambientes rurais que otimize a taxa de transmissão dos dispositivos, condicionado a não exceder um limite máximo de consumo energético estabelecido. Além disso, utilizando como base o modelo de propagação Log-Distância, desenvolveu-se uma modelagem de perda de caminho para comunicações LoRa em áreas rurais, possibilitando uma representação mais fiel à prática e, como consequência, resultando em maior confiabilidade das análises realizadas.

Palavras-chave: Algoritmos genéticos; LoRa; *Mesh*; Redes em ambientes rurais.

ABSTRACT

BUENO, H. O. **Optimization of transmission parameter selection for LORA Mesh single channel gateway networks in rural environments**. 2021. 118 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021.

The Long Range (LoRa) technology has the characteristic of enabling wireless data transmission over long distances with limited rates, but using devices with reduced cost, a low power and, as a consequence, with a low energy consumption. The physical layer of this type of network is mainly configured by four parameters - the spreading factor, the code rate, the transmission power and the bandwidth. These parameters are responsible for adjusting the communication operation in relation to the transmission rate, noise and interference robustness, signal range and power consumption. Therefore, it is essential that the choice of values for these parameters is carried out in order to optimize the performance of the LoRa network in reference to the mentioned characteristics. For networks installed in certain locations, such as in rural environments, for example, this choice has even greater relevance, since, for applications of this type, transmitters are often located in scarcely accessible areas that make it difficult to carry out general maintenances of the device, such as a reconfiguration of parameters or a battery replacement. In this context, this work proposes to present the development of a method based on genetic algorithms, capable of define a configuration of transmission parameters of a single channel gateway LoRa Mesh network for rural environments that optimizes the transmission rate of the devices, conditioned not to exceed an established maximum energy consumption limit. Furthermore, using the Log-Distance propagation model as a basis, a path loss model for LoRa communications in rural areas was developed, enabling a representation that is more faithful to practice and, as a consequence, resulting in greater reliability of the performed analyzes.

Keywords: Genetic algorithms; LoRa; Mesh; Networks in rural environments.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TÉCNICA DSSS	26
FIGURA 2 – DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA DO SINAL DSSS	27
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DE UM CHIRP NO DOMÍNIO DO TEMPO	28
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DE CHIRPS DE UMA MODULAÇÃO LORA.....	28
FIGURA 5 – CHIRPS MODULADOS UTILIZANDO DIFERENTES SPREADING FACTORS	30
FIGURA 6 – ESTRUTURA DO PACOTE LORA	34
FIGURA 7 – ESTRUTURA DAS TECNOLOGIAS LORA E LORAWAN.....	35
FIGURA 8 – ARQUITETURA DE UMA REDE LORAWAN	36
FIGURA 9 – CLASSE A LORAWAN	38
FIGURA 10 – CLASSE B LORAWAN	39
FIGURA 11 – CLASSE C LORAWAN	39
FIGURA 12 – ARQUITETURA DE UMA REDE LORA MESH	41
FIGURA 13 – CURVAS DE CORREÇÃO DEVIDO AO TIPO DE AMBIENTE DO MODELO OKUMURA	51
FIGURA 14 – IMAGEM DE SATÉLITE DA ÁREA ESCOLHIDA PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO	58
FIGURA 15 – PONTOS DETERMINADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES	59
FIGURA 16 – DISTÂNCIA DE UM ENLACE FORNECIDA PELO SOFTWARE	60
FIGURA 17 – VISADA DE UM ENLACE E ALTURA DOS PONTOS FORNECIDAS PELO SOFTWARE	60
FIGURA 18 – ADAPTAÇÃO FÍSICA DOS MÓDULOS LORA.....	62
FIGURA 19 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE PERDA DISTÂNCIA APLICADOS AO AMBIENTE RURAL DE ESTUDO	66
FIGURA 20 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM ALGORITMO GENÉTICO	71
FIGURA 21 – SELEÇÃO POR TORNEIO	74
FIGURA 22 – CRUZAMENTO DE PONTO ÚNICO	76
FIGURA 23 – MUTAÇÃO EM UM GENE BINÁRIO	77
FIGURA 24 – CICLO DE OPERAÇÃO DO ALGORITMO ADR	82
FIGURA 25 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DESENVOLVIDO	89
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO DO CROMOSSOMO	93

FIGURA 27 – OPERAÇÃO DE CRUZAMENTO NO PARÂMETRO PTX1	93
FIGURA 28 – OPERAÇÃO DE MUTAÇÃO NO PARÂMETRO SF2	94
FIGURA 29 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 1)	103
FIGURA 30 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 2)	104
FIGURA 31 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 3)	105
FIGURA 32 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 4)	106

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES DE SENSIBILIDADE DO MÓDULO SX1272	23
TABELA 2 – BANDAS DE OPERAÇÃO LORA DE ALGUNS PAÍSES	33
TABELA 3 - VALORES DO EXPOENTE DE PERDA DE CAMINHO PARA DIFERENTES AMBIENTES	48
TABELA 4 – VALORES DOS FATORES DE CORREÇÃO DO MODELO HATA	53
TABELA 5 – VALORES MÉDIOS DE RSSI COLETADOS	63
TABELA 6 – DIFERENÇA DE VALORES DE PERDA DE CAMINHO OBTIDOS UTILIZANDO MODELOS DIFERENTES	67
TABELA 7 – TAXAS DE TRANSMISSÃO UTILIZADAS PELO ALGORITMO ADR ..	81
TABELA 8 – CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS NO ALGORITMO GENÉTICO	97
TABELA 9 – PARÂMETROS DO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO	98
TABELA 10 – COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM ALGORITMOS GENÉTICOS (100 EXECUÇÕES).....	100
TABELA 11 – COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM ALGORITMOS GENÉTICOS (10 EXECUÇÕES).....	102
TABELA 12 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS ANALISADOS EM RELAÇÃO À (a) TAXA DE TRANSMISSÃO, TEMPO DE PROCESSAMENTO E (b) CONSUMO ENERGÉTICO.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS

ADR	-	Adaptive Data Rate
AG	-	Algoritmos genéticos
ASFS	-	Adaptive Spreading Factor Selection
BW	-	Largura de banda
CR	-	Taxa de código
CRC	-	Cyclic Redundancy Check
CSS	-	Chirp Spread Spectrum
CT	-	Concurrent Transmission
DER	-	Taxa de extração de dados
DSSS	-	Direct-Sequence Spread Spectrum
FSK	-	Modulação por chaveamento de frequência
IEEE	-	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IoT	-	Internet of Things
ISM	-	Industrial, Scientific and Medical
LoRa	-	Long Range
LPWAN	-	Low-Power Wide-Area Network
LR-WPANs	-	Redes sem fio pessoais de baixas taxas de transmissão
MAC	-	Controle do acesso ao meio
NLOS	-	Non-Line-of-Sight
PL	-	Payload
PRR	-	Taxa de recepção de pacote
RSSI	-	Indicador de intensidade do sinal recebido
SF	-	Spreading Factor
SNR	-	Relação sinal-ruído
SPI	-	Serial Peripheral Interface
ToA	-	Time on Air
UHF	-	Ultra High Frequency

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	16
1.2 SOLUÇÃO PROPOSTA.....	17
1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA	18
1.4 SINOPSE DOS CAPÍTULOS	19
2 COMUNICAÇÃO LORA	21
2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2 MODULAÇÃO LORA	25
2.3 PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO	29
2.3.1 <i>Spreading factor</i> (SF)	29
2.3.2 Taxa de código (CR)	30
2.3.3 Largura de banda (BW).....	31
2.3.4 Potência de transmissão	32
2.3.5 Frequência de operação.....	32
2.4 ESTRUTURA DE PACOTE.....	33
2.5 LORAWAN	35
2.5.1 Classes.....	37
2.6 LORA MESH	40
2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	42
3 MODELOS DE PERDA DE CAMINHO PARA COMUNICAÇÕES SEM FIO	44
3.1 INTRODUÇÃO	44
3.2 MODELO DE PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE	45
3.3 MODELO DE PERDA DE CAMINHO LOG-DISTÂNCIA.....	47
3.4 MODELO DE PROPAGAÇÃO OKUMURA-HATA	49
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53

4 MODELO DE PERDA DE CAMINHO PARA COMUNICAÇÃO LORA EM ÁREAS RURAIS.....	55
4.1 INTRODUÇÃO	55
4.2 COLETA DE DADOS	57
4.3 PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO DE PERDA DE CAMINHO	64
4.4 RESULTADO E COMPARAÇÕES COM OUTROS MODELOS	65
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5 ALGORITMOS GENÉTICOS	69
5.1 INTRODUÇÃO	69
5.2 MÉTODOS DE SELEÇÃO	71
5.2.1 Método da roleta	71
5.2.2 Seleção por torneio	73
5.3 OPERAÇÕES.....	75
5.3.1 Cruzamento.....	75
5.3.2 Mutação.....	76
5.3.3 Elitismo.....	78
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
6 MÉTODO DE SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO DE UMA REDE LORA MESH DE GATEWAY SINGLE CHANNEL EM AMBIENTES RURAIS.....	80
6.1 INTRODUÇÃO	80
6.2 PARAMETRIZAÇÃO E MODELAGEM.....	85
6.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO	87
6.4 ALGORITMO PROPOSTO.....	88
6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
7 AVALIAÇÃO DA PROPOSTA	96
7.1 INTRODUÇÃO	96
7.2 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE VARIAÇÕES DO ALGORITMO GENÉTICO.....	100

7.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS 3 MÉTODOS	107
7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
8 CONCLUSÕES GERAIS.....	111
REFERÊNCIAS.....	113
APÊNDICE A – CÓDIGO DA FUNÇÃO “CALCULAR VAZÃO CONSUMO”	117
APÊNDICE B – CÓDIGO DA FUNÇÃO “CALCULAR PERDA POR DISTÂNCIA” ..	118

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais, os equipamentos, ambientes e processos não pertencentes ao contexto da quarta revolução industrial vem sendo integrados a sistemas conectados a redes e se adequando às tecnologias atuais. Este fenômeno é definido como *Internet of Things* (IoT), um conceito que se refere à inserção e conexão destes elementos, antes externos ao meio digital, na internet ou em algum outro tipo de rede. A IoT estabelece a relação entre os sistemas *on-line* e físicos, possibilitando, por exemplo, a automatização de serviços de manufatura, o monitoramento contínuo de processos industriais, facilitando a disponibilização de dados de diferentes origens, entre outros cenários.

O conceito de IoT foi inicialmente proposto em 1999 por Kevin Ashton, ao implementá-lo em um sistema logístico utilizando a tecnologia RFID. Posteriormente, o termo se tornou popular após o surgimento de aplicações baseadas em redes de sensores que conectavam o meio físico à internet (SHENG et al, 2013). Com o surgimento de mais sensores e dispositivos de comunicação, cada vez menores e de menor custo, várias alianças de padronização foram formadas, com o intuito de desenvolver e disponibilizar tecnologias IoT comerciais, como o ZigBee, WAVE2M e o *Long Range* (LoRa).

Devido ao intenso crescimento da Internet das Coisas, tal tecnologia se tornou presente em diferentes contextos, inclusive no ambiente rural. Diante disso, uma nova concepção foi implementada nas operações agrícolas, denominada *smart farming*. Este conceito se baseia na utilização de tecnologias IoT a fim de monitorar o campo continuamente, realizando medições de características do solo e de variáveis climáticas, e também automatizar sistemas para reduzir a intervenção humana e gerar informações instantâneas que auxiliam na tomada de decisão (DOSHI; PATEL; BHARTI, 2019). Com todas essas vantagens, o *smart farming* possibilita um aumento na produtividade das colheitas, provê redução nos gastos e facilita o gerenciamento de recursos.

Entre as opções de comunicação IoT existentes, a tecnologia LoRa é uma ótima alternativa para viabilizar a operação de várias aplicações no ramo da agricultura. Este tipo de comunicação vem sendo implementado em ambientes rurais para diversas aplicações, sendo algumas delas o envio de dados de sensores para

monitoramento climático, dados de máquinas agrícolas, controle de operação de pivôs de irrigação, entre outras.

A crescente popularidade da tecnologia LoRa neste tipo de contexto se deve ao fato da mesma ser um tipo de rede que possibilita transmissões a longas distâncias utilizando uma baixa potência, sendo essas características favoráveis para um local de difícil acesso e pouco povoado, como muitas vezes é o ambiente agrícola. Adicionalmente, para se obter um melhor aproveitamento destes benefícios, é possível configurar os dispositivos da rede de uma forma que se obtenha uma alta taxa de transmissão e um baixo consumo energético. Para isso, deve-se escolher adequadamente os parâmetros de transmissão utilizados para cada situação e cenário, sendo estes o *spreading factor* (SF), a taxa de código (CR), a potência de transmissão e a largura de banda (BW).

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A tecnologia LoRa foi projetada para permitir o envio de uma pequena quantidade de dados, normalmente gerados por sensores e dispositivos embarcados em geral, muitas vezes provenientes de uma aplicação IoT. Ao utilizar esse tipo de comunicação, é possível realizar a transmissão destes dados a grandes distâncias demandando um baixo consumo energético. Porém, como previamente observado, é necessário realizar uma configuração eficiente de alguns parâmetros dos dispositivos utilizados para garantir tais características e ao mesmo tempo não afetar na taxa de transmissão e na vazão de dados geral da rede.

Mais especificamente, para redes LoRa baseadas em protocolos *mesh*, torna-se um pouco mais desafiador realizar a escolha de valores para estes parâmetros. Para garantir o roteamento de dados baseado no esquema *multi-hop* e para se adequar às limitações dos *gateways* utilizados nestes tipos de redes, é necessário configurar alguns parâmetros (principalmente o *spreading factor* e a largura de banda) utilizando o mesmo valor para todos os dispositivos atuantes.

Os métodos de escolha de parâmetros LoRa mais difundidos não consideram os pontos citados, além de serem mais simples e genéricos, não considerando as características únicas de cada rede, como, por exemplo, o tipo de ambiente em que a mesma atua. Devido a isso, muitas vezes para aplicações que utilizam o LoRa *Mesh*,

realiza-se a seleção de parâmetros dos dispositivos de forma manual, sendo este um processo pouco eficaz.

Deste modo, diante do cenário apresentado, conclui-se que novas propostas menos generalistas e baseadas em técnicas mais complexas necessitam ser desenvolvidas para garantir uma operação eficiente baseada na tecnologia apresentada. E tal demanda se torna ainda mais clara para aplicações mais críticas, como são as que estão relacionadas a um ambiente rural. Com isso, na próxima seção, apresenta-se a solução proposta para essa questão.

1.2 SOLUÇÃO PROPOSTA

A partir do contexto citado, nesta dissertação apresenta-se uma proposta de um método de definição de parâmetros de transmissão de uma rede LoRa baseada em um protocolo *mesh* e na utilização de um *gateway single channel*, implementada em um ambiente rural, capaz de otimizar a taxa de transmissão sem ultrapassar um determinado limite de consumo energético estabelecido. Para a realização da escolha dos parâmetros, utilizou-se técnicas de algoritmos genéticos (AG), geralmente aplicadas em situações em que se deseja alcançar o valor máximo (ou mínimo, em alguns casos) de uma determinada variável a qual, neste contexto, é a taxa de transmissão dos dispositivos.

Uma das variáveis que possuem uma forte influência na escolha dos valores dos parâmetros LoRa é a perda de caminho. Uma alta atenuação do sinal transmitido pode requisitar uma alta potência de transmissão ou uma redução na largura de banda utilizada, por exemplo. Já uma atenuação menos expressiva pode permitir o uso de um *spreading factor* menor, o que possibilita uma maior vazão de dados, uma redução no *time on air* e, conseqüentemente, um menor consumo energético. Portanto, nota-se a necessidade de considerar tal elemento ao desenvolver o método de escolha de parâmetros. Neste contexto, para ser possível estimar a perda de caminho com uma maior confiabilidade e fidelidade em relação à prática, nesta dissertação foi desenvolvido um modelo de perda de caminho para comunicações LoRa em áreas rurais, utilizando como base o modelo log-distância.

Com o intuito de cumprir tal tarefa, realizou-se um trabalho de campo com a finalidade de extrair medidas reais de intensidade de sinais LoRa em diferentes distâncias, todas efetuadas em um ambiente rural: uma região sem urbanização, com

vegetação natural, terrenos de plantio de culturas e presença de animais típicos de criação extensiva. Com os resultados obtidos, ao aplicar os fundamentos teóricos do modelo log-distância, obteve-se uma relação entre perda de caminho e distância de transmissão.

1.3 OBJETIVOS E METODOLOGIA

Para se alcançar ao objetivo final do desenvolvimento do método de escolha de parâmetros e, adicionalmente, do modelo de perda de caminho para comunicações LoRa em áreas rurais, é necessário realizar algumas outras tarefas para construir a sustentação e fundamentação dos mesmos. Com isso, o trabalho também propõe a realização destas, sendo elas:

- Pesquisa e embasamento teórico da tecnologia LoRa, com foco em sua camada física e técnica de modulação;
- Embasamento das teorias relativas a algoritmos genéticos, sobre os principais tipos de operações e técnicas de seleção;
- Pesquisa sobre diferentes modelos de perda de caminho já existentes e a compreensão do contexto de aplicação de cada um;
- Desenvolvimento do modelo de perda de caminho proposto através da realização do trabalho de campo citado na seção anterior;
- Pesquisa sobre diferentes métodos de escolha de parâmetros LoRa, aplicados a redes *mesh single channel* em ambientes rurais;
- Desenvolvimento do método de escolha de parâmetros LoRa proposto;
- Implementação de simulações do método proposto para a obtenção de resultados, analisar o seu desempenho e assim validá-lo.

As teorias de algoritmos genéticos se demonstram como uma ótima opção para resolver problemas de otimização. Mesmo assim, as mesmas foram pouco aplicadas no contexto de desempenho das redes LoRa. Nesse sentido, aplica-se técnicas de AG baseadas no método de seleção da roleta e em alguns operadores genéticos modificados para prover uma escolha eficiente dos parâmetros de transmissão de uma rede LoRa *Mesh*.

Para então avaliar o objetivo principal do trabalho, é necessário estabelecer um ambiente de simulação, uma vez que há um número considerável de parâmetros envolvidos. Então, utiliza-se a linguagem de programação Python e o ambiente de desenvolvimento integrado PyCharm® para esse fim. Tais escolhas foram baseadas nos recursos e bibliotecas presentes nessas ferramentas que facilitam a implementação de técnicas de AG e o desenvolvimento de gráficos e outras formas de visualização de dados. Além disso, há uma familiaridade com ambas as ferramentas. Nesse contexto, as avaliações são conduzidas por meio de simulação computacional e então são reproduzidas, a fim de evidenciar a capacidade da proposta em cumprir o objetivo definido.

1.4 SINOPSE DOS CAPÍTULOS

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação possui mais 7 capítulos, organizados conforme a seguir.

No Capítulo 2, Comunicação LoRa, realiza-se uma exposição teórica da tecnologia LoRa, com foco em sua camada física, nos parâmetros de transmissão, na modulação LoRa, na estrutura do pacote e, por fim, nas alternativas mais comuns utilizadas na camada de enlace, sendo elas o LoRaWAN e o LoRa *Mesh*.

No Capítulo 3, Modelos de Perda de Caminho para Comunicações sem Fio, apresenta-se os principais métodos de perda de caminho utilizados para aplicações de larga escala. Expõe-se toda a fundamentação teórica de cada um deles, bem como suas respectivas aplicabilidades.

O Capítulo 4, Modelo de Perda de Caminho para Comunicação LoRa em Áreas Rurais, visa apresentar o desenvolvimento e a aplicação do modelo de perda de caminho implementado, iniciando com uma exposição de trabalhos relacionados sobre o tema, seguida de uma descrição do trabalho de campo realizado e a aplicação do embasamento teórico do modelo log-distância, finalizando com uma comparação dos resultados obtidos com os modelos de referência.

No Capítulo 5, Algoritmos Genéticos, apresenta-se um embasamento teórico sobre algoritmos genéticos, focando nos principais métodos de seleção e operações, detalhando as suas funcionalidades, aplicabilidade, objetivos, vantagens e desvantagens.

No Capítulo 6, Método de Seleção de Parâmetros de Transmissão de uma Rede LoRa *Mesh* de *Gateway Single Channel* em Ambientes Rurais, é exposto o desenvolvimento do método de escolha de parâmetros proposto. Primeiramente, apresenta-se um estudo de trabalhos relacionados sobre o tema e, em seguida, comenta-se sobre a modelagem da simulação do cenário de operação da rede LoRa em questão, bem como sobre o método de avaliação considerado para analisar o desempenho do método. Por fim, todo o algoritmo do mesmo é explicado em detalhes.

O Capítulo 7, Avaliação da Proposta, expõe todos os cenários e parâmetros de simulação, bem como a justificativa da composição e configuração de cada um deles. Além disso, o mesmo traz a avaliação dos resultados obtidos das simulações computacionais do método desenvolvido em relação a outras duas opções de referência. Os parâmetros de análise considerados são: tempo de processamento, taxa de transmissão, consumo energético e repetibilidade do método.

Por fim, o Capítulo 8, Conclusões Gerais, evidencia as contribuições do trabalho realizado, além de realizar uma análise concludente do impacto da aplicação do modelo de perda de caminho desenvolvido ao método proposto, assim como dos resultados obtidos a partir da simulação da operação de tal método, apresentados no capítulo anterior.

2 COMUNICAÇÃO LORA

Neste capítulo realiza-se uma apresentação da tecnologia LoRa, iniciando com uma descrição de suas características gerais, seguido de uma explanação de sua operação e funcionamento (classes, modulação e parâmetros de transmissão), bem como a sua estrutura de pacote e de suas camadas física e de enlace.

O capítulo possui como foco descrever os principais elementos envolvidos relacionados à comunicação LoRa considerados importantes para a fundamentação do presente trabalho.

2.1 INTRODUÇÃO

A tecnologia LoRa pode ser definida como um tipo de rede que possibilita uma comunicação a longas distâncias utilizando uma baixa potência, sendo assim considerada uma *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN). Tal termo classifica e engloba, incluindo a LoRa, as redes de telecomunicações *wireless* que operam a um longo alcance, a pequenas taxas de transmissão, com uma baixa potência fornecida por uma bateria e que possuem um baixo custo.

Esta tecnologia foi desenvolvida pela empresa Semtech com o intuito de criar dispositivos do tipo IoT escaláveis para uso industrial inicialmente (LIANDO *et al.*, 2018). Logo após o seu lançamento, a mesma ganhou muito reconhecimento e destaque, principalmente pelo fato de proporcionar uma comunicação na faixa de frequência *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) e por propiciar transmissões a distâncias maiores do que a maioria das LPWAN's através de um consumo de potência baixo.

Outro fator importante para a ampla divulgação desta tecnologia é a modulação utilizada em dispositivos LoRa. A técnica utilizada para este fim, definida como modulação LoRa, é uma variação da técnica *Chirp Spread Spectrum* (CSS), capaz de oferecer uma alta robustez contra níveis consideráveis de interferência, efeito *Doppler* e perdas por multi-caminho (ADELANTADO, 2017). A sua operação está diretamente relacionada com os parâmetros de configuração da camada física LoRa, sendo eles o *spreading factor*, a taxa de código, a largura de banda, a potência de transmissão e a frequência de operação. Tanto os parâmetros de rede quanto a técnica de modulação são apresentados com maiores detalhes em seções posteriores.

A capacidade de vazão da rede LoRa é um fator bastante variável, uma vez que este depende de outros elementos, como a taxa de transmissão (a qual varia com os parâmetros de rede), o tamanho do *payload* e a frequência de transmissão dos nós. Devido à utilização da modulação LoRa, baseada em espalhamento espectral, e à variação do *spreading factor*, possibilita-se que o *gateway* (quando *multi channel*) receba sinais de diferentes taxas no mesmo canal ao mesmo tempo, aumentando a capacidade da rede e tornando-a mais escalável (LORA ALLIANCE, 2015).

Em números, esta tecnologia oferece uma capacidade de transmissão de ótimo desempenho quando comparada com outras alternativas. A título de exemplo, em documentações oficiais da associação LoRa *Alliance* são apresentadas situações em que a modulação LoRa consegue oferecer praticamente o dobro da capacidade (*bits/s*) de uma comunicação baseada em modulação por chaveamento de frequência (FSK) (SEMTECH AN1200.22, 2015).

Em relação à distância, a comunicação LoRa proporciona transmissões de longo alcance, mais exatamente de dois até cinco quilômetros em ambientes urbanos, até 15 quilômetros em ambientes suburbanos (ADELANTADO, 2017) e até 48 quilômetros em ambientes rurais (LORA PHY, 2020). Para oferecer transmissões nas maiores distâncias, utiliza-se menores taxas de transmissão alterando os parâmetros de rede. Devido a esta característica, a tecnologia pode ser utilizada em diversas aplicações como, por exemplo, em algumas situações que necessitam de transmissores posicionados em localizações isoladas, mas que transmitem uma pequena quantidade de dados, como um monitoramento de sensores em atividades agrícolas. Além deste exemplo, a comunicação LoRa pode ser aplicada com eficiência em situações nas quais os elementos da rede não são tão afastados entre si, porém há uma maior demanda de taxa de transmissão, como um monitoramento contínuo de equipamentos de um ambiente industrial.

Outra variável a ser analisada é a sensibilidade do receptor, definida como o nível de sinal mais fraco que um receptor consegue distinguir do ruído. Quanto a este fator, os dispositivos LoRa apresentam uma melhor sensibilidade que a maioria das outras modulações, oferecendo na média um valor de -130 dBm (AUGUSTIN *et al.*, 2016), assim demandando uma potência de transmissão de nível reduzido para o estabelecimento de um enlace de comunicação. A título de exemplo, o módulo SX1272, produzido pela empresa Semtech e amplamente utilizado, opera a uma

potência de transmissão máxima de 20 dBm e oferece uma satisfatória sensibilidade, variando o seu valor de acordo com os parâmetros de rede (TABELA 1).

TABELA 1 – VALORES DE SENSIBILIDADE DO MÓDULO SX1272

Largura de banda (KHz)	Spreading factor	Taxa de transmissão (bps)	Sensibilidade (dBm)
125	6	9380	-122
125	12	293	-137
250	6	18750	-119
250	12	586	-134
500	6	37500	-116
500	12	1172	-131

FONTE: Adaptado de Semtech SX1272/73 (2017).

A taxa de transmissão (R [bps]) de transmissões LoRa alcança valores teóricos de até 21,9 kbps. A mesma é calculada através da equação (1), variando o seu valor de acordo com o SF, CR e BW (BOUGUERA *et al.*, 2018), parâmetros estes detalhados na Seção 2.3.

$$R[bps] = SF * \frac{BW[Hz]}{2^{SF}} * CR \quad (1)$$

Outro fator relevante na operação deste tipo de rede em questão a ser analisado é o *time on air* (ToA), definido como o tempo necessário para transmitir uma determinada quantidade de dados (*payload* ou PL) utilizando uma configuração LoRa específica. Para se calcular essa variável, primeiramente deve-se obter, por meio da equação (2), o número de símbolos ($N_{payload}$) necessários para transmitir um determinado PL em *bytes* de acordo com o SF e CR configurados (BOUGUERA *et al.*, 2018).

$$N_{payload} = 8 + \max \left(\text{ceil} \left(\frac{8 * PL - 4 * SF + 16 + 28 - 20 \cdot H}{SF - 2 * DE} \right) * \frac{1}{CR}, 0 \right) \quad (2)$$

A função *ceil* utilizada é responsável por realizar o arredondamento para cima, do número inteiro mais próximo do resultado obtido, o termo H representa a presença ou não do envio do campo de cabeçalho ($H = 0$ ou $H = 1$) e o termo DE representa a utilização da otimização de baixa taxa de dados, funcionalidade detalhada na Seção 2.4. Já a função *max* retorna o maior valor entre os seus dois parâmetros de entrada, sendo eles, neste caso, o resultado da função *ceil* multiplicado pelo inverso de CR e zero.

Em seguida, calcula-se o período do símbolo (T_{Symbol}) através da equação (3), de acordo com o SF e BW configurados (BOUGUERA *et al.*, 2018).

$$T_{Symbol} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3)$$

O cálculo da duração do preâmbulo ($T_{preamble}$) e da duração do *payload* ($T_{payload}$) também são realizados (BOUGUERA *et al.*, 2018). Em relação ao preâmbulo, também detalhado na Seção 2.4, a sua duração está relacionada diretamente com o número de símbolos que o compõe (N_P), além do período do símbolo já obtido. Por fim, o ToA é calculado através da soma das duas durações calculadas.

$$T_{preamble} = (4.25 + N_P) * T_{Symbol} \quad (4)$$

$$T_{payload} = N_{payload} * T_{Symbol} \quad (5)$$

$$ToA = T_{preamble} + T_{payload} \quad (6)$$

É importante esclarecer que a tecnologia LoRa se refere apenas à camada física deste tipo de rede, representando principalmente a estrutura física e eletrônica responsável pela modulação do sinal, sendo esta desenvolvida exclusivamente pela empresa Semtech, como já citado. Além desta camada, as redes LoRa são compostas por uma camada de enlace, representada por uma determinada tecnologia, sendo o padrão LoRaWAN o mais comum e utilizado para este fim. Tal tecnologia pode ser definida por um conjunto de protocolos e especificações que determinam a arquitetura

do sistema e os parâmetros de controle do acesso ao meio (MAC) utilizados pela tecnologia LoRa. A camada LoRaWAN foi desenvolvida pela associação LoRa *Alliance*, fundada pela Semtech em 2015 e atualmente composta por mais de 500 membros, dentre eles as empresas IBM, Cisco, entre outros. Esta camada é mais bem definida na Seção 2.5.

2.2 MODULAÇÃO LORA

Como já apresentado na Seção 2.1, a tecnologia LoRa utiliza uma modulação própria para possibilitar a transmissão de dados. A técnica implementada é uma variação da técnica CSS, baseada em variação de frequência, que possibilita um ajuste entre taxa de transmissão e sensibilidade com uma largura de banda fixa. Através da utilização de *spreading factors* ortogonais, a modulação LoRa permite uma variação de taxa de transmissão, possibilitando uma escolha de configuração que priorize alcances ou potências maiores em troca de vazões menores (SEMTECH AN1200.22, 2015).

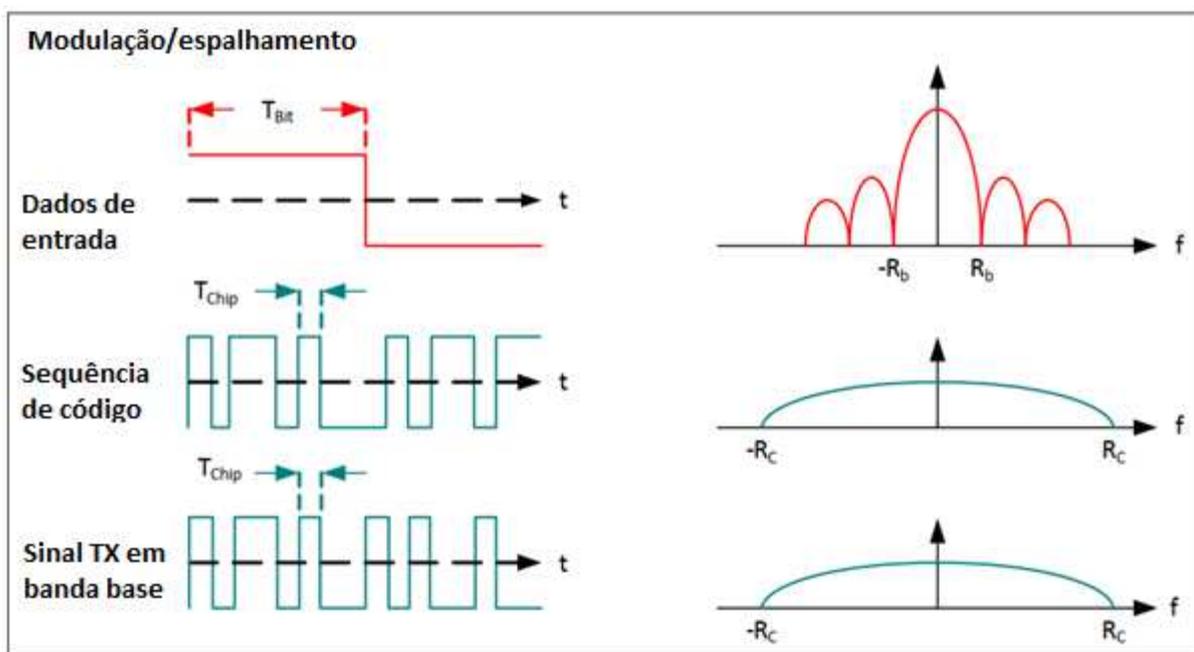
A técnica CSS foi desenvolvida para aplicações de radar na década de 1940, utilizada tradicionalmente em aplicações de segurança e serviços militares. Esta é uma técnica de espalhamento espectral que utiliza pulsos de sinal modulados através de acréscimos ou decréscimos lineares em sua frequência para codificar informações, denominados *chirps*.

Em épocas mais recentes, esta modulação foi bastante implementada em diversas aplicações de transmissões de dados devido aos seus baixos requisitos de potência de operação e robustez em relação à degradação do sinal (perdas multicaminho, efeito *Doppler*, desvanecimento e interferência). Na década de 2000, a mesma foi adotada pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) no padrão 802.15.4, caracterizado por especificar a camada física e o controle de acesso para redes sem fio pessoais de baixas taxas de transmissão (LR-WPANs), tornando a técnica ainda mais conhecida e utilizada.

O princípio de operação da técnica CSS se baseia na modulação *Direct-Sequence Spread Spectrum* (DSSS), a qual se consiste em “espalhar” o sinal no domínio da frequência, fazendo com que o mesmo ocupe uma largura de banda maior do que a sua forma original ao ser transmitido. Tal feito é alcançado através da multiplicação dos dados originais por uma sequência de *bits*, também conhecida como

sequência de *chipping*. Esta sequência possui uma taxa muito maior do que o sinal de origem, ou seja, uma frequência maior (FIGURA 1). Para recuperar os dados, no lado da recepção multiplica-se o sinal modulado pela mesma sequência citada, gerando como resultado a informação original do transmissor.

FIGURA 1 – TÉCNICA DSSS



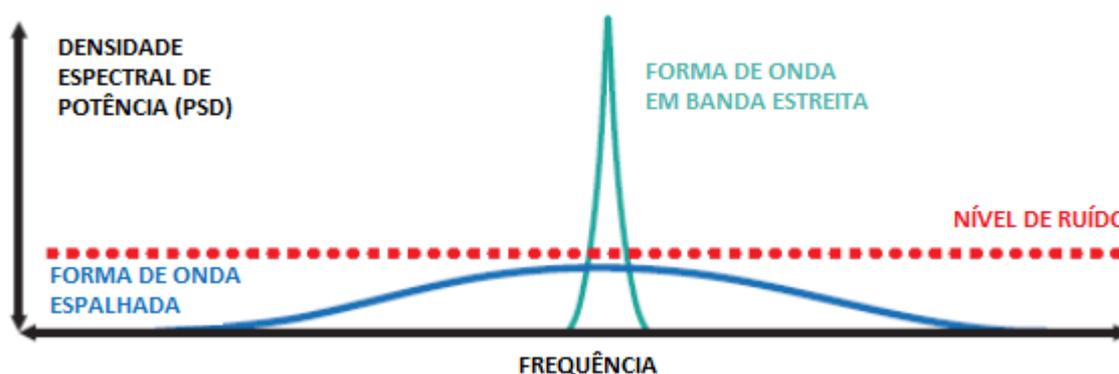
FONTE: Adaptado de Semtech AN1200.22 (2015).

Em mais detalhes, a sequência de *chipping* utilizada para espalhar o sinal no espectro é composta por um conjunto de pulsos digitais, denominados *chips*. No modelo padrão, os *chips* possuem o valor de 1 ou 0 (podendo ser representados por 1 ou -1), assumindo uma forma binária. Como já citado, estes *bits* possuem um período bem menor quando comparado aos *bits* de informação, consequentemente assumindo uma frequência muito maior. Essa sequência pode ser facilmente gerada através de um registrador digital de deslocamento com realimentação.

A variação de sequência de *chipping* mais difundida é a sequência de registrador de deslocamento de comprimento máximo, também conhecida como *m-sequence*. A mesma é gerada através de um registrador digital de deslocamento com realimentação de "*m*" estágios, possuindo um comprimento de $L = 2^m - 1$ *bits* ou *chips* (LATHI; DING, 2010).

O espalhamento no espectro causado pela técnica DSSS traz algumas vantagens para a transmissão do sinal, sendo uma delas o aumento da robustez a interferências. Devido ao fato de a potência do sinal se tornar mais distribuída pelo espectro, o mesmo se aproxima mais do nível do ruído, eliminando picos no domínio da frequência, os quais são mais susceptíveis a sofrerem influências de outros sinais (FIGURA 2).

FIGURA 2 – DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA DO SINAL DSSS



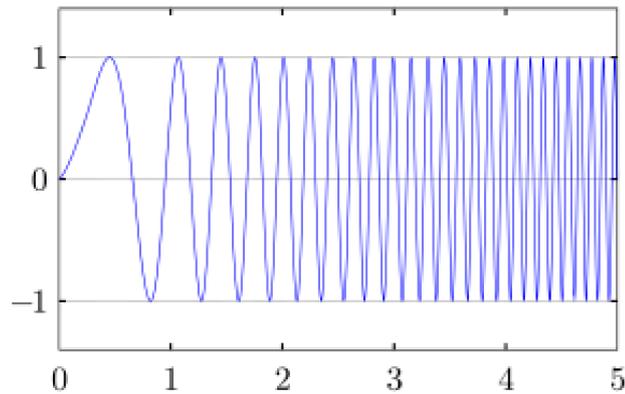
FONTE: Adaptado de Library (2021).

Na prática, as vantagens oferecidas pela modulação DSSS proporcionam um ganho no sinal, fazendo com que seja possível realizar transmissões em distâncias maiores e receber dados até quando a relação sinal-ruído (SNR) da transmissão assumir valores negativos na escala logarítmica. Tal ganho, conhecido como ganho de processamento (G_P), é dependente da taxa de *chip* utilizada (R_C), medida em *chips/s*, e da taxa de dados (R_B), medida em *bits/s* (SEMTECH AN1200.22, 2015).

$$G_P = 10 * \log_{10} \left(\frac{R_C}{R_B} \right) \quad (dB) \quad (7)$$

Na técnica CSS, os dados já multiplicados pela sequência de *chipping* passam pelo processo de modulação para assim possibilitar a transmissão. Este sinal modulado é composto por *chirps*, definidos como sinais senoidais com constante acréscimo (*upchirps*) ou decréscimo (*downchirps*) em sua frequência, variando entre uma determinada largura de banda (FIGURA 3).

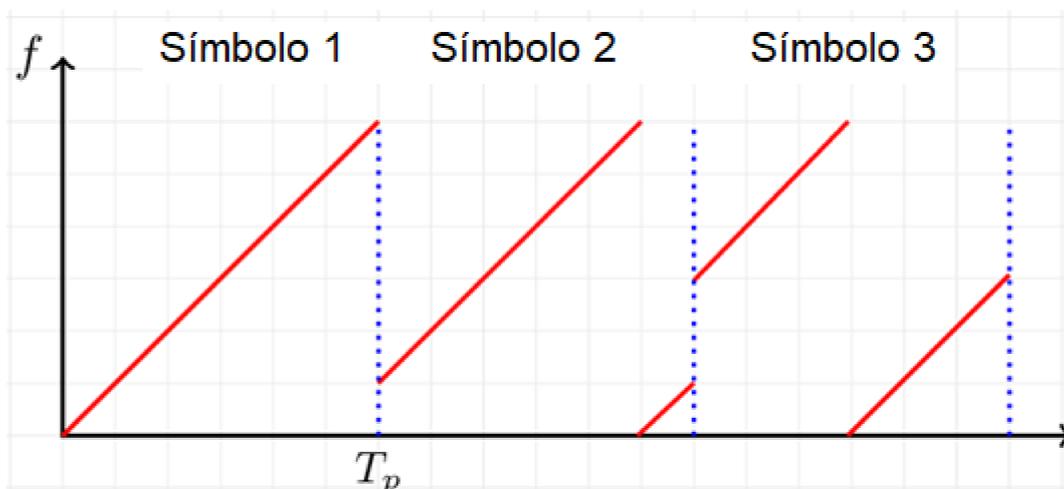
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO DE UM CHIRP NO DOMÍNIO DO TEMPO



FONTE: Chirp (2021).

A modulação CSS original é do tipo “*on-off*”, ou seja, é capaz de modular os dados em *upchirps* ou *downchirps*. Por sua vez, a modulação LoRa se baseia em aplicar todos os recursos anteriormente apresentados, tanto da técnica DSSS quanto da técnica CSS, porém apresentando a vantagem de modular os dados através da diferença da frequência inicial de cada *chirp* transmitido (LIANDO *et al.*, 2018). Com isso, cada símbolo, que representa um determinado número de *bits* de dados, é convertido em um *chirp*, que possui uma determinada frequência inicial, relacionada diretamente ao valor do símbolo (FIGURA 4). Tanto o número de *bits* por símbolo quanto a velocidade de variação da frequência do *chirp* são determinados pelo *spreading factor*, variável esta apresentada na subseção 2.3.1.

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DE CHIRPS DE UMA MODULAÇÃO LORA



FONTE: Adaptado de Lulu e Mobasseri (2019).

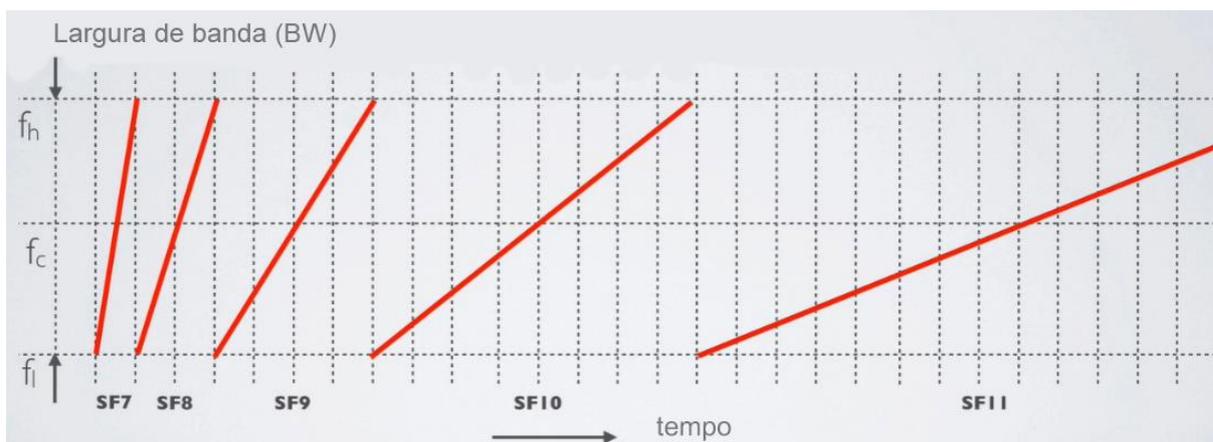
2.3 PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO

A tecnologia LoRa é caracterizada por cinco parâmetros configuráveis, sendo eles o *spreading factor*, a taxa de código, a largura de banda, a potência de transmissão e a frequência de operação. Essas variáveis podem ser ajustadas com o intuito de variar a taxa de transmissão, o alcance do sinal, robustez à interferência e consumo de energia para assim obter uma relação entre esses fatores que mais favoreça uma determinada aplicação (CHALL; SAMER; HELOU, 2019).

2.3.1 *Spreading factor* (SF)

O *spreading factor* é definido como a razão entre a taxa de *chips* da sequência utilizada para codificar os dados e a taxa de símbolos transmitidos, podendo assumir, conforme definido pela especificação LoRa, os valores de 6, 7, 8, 9, 10, 11 ou 12. Como já mencionado na Seção 2.2, cada símbolo, representado por um *chirp*, é composto por 2^{SF} *chips*, o qual pode representar até SF *bits* de dados. Considerando uma largura de banda fixa e partindo de uma frequência inicial sempre menor que a frequência final (de forma crescente), com mais *chips*, ou seja, utilizando um valor de SF maior, o símbolo percorre a mesma de uma forma mais gradual, através de uma variação no domínio da frequência mais lenta, pois com mais *chips* o sinal levará mais tempo para ser transmitido. Este efeito pode ser notado ao analisar a representação do espectro, em que os *spreading factors* maiores possuem ângulos de inclinação menores, ou seja, variam mais lentamente na frequência até alcançarem a frequência máxima do símbolo (FIGURA 5). Este efeito facilita a decodificação do sinal na recepção e torna a demodulação mais precisa.

FIGURA 5 – CHIRPS MODULADOS UTILIZANDO DIFERENTES SPREADING FACTORS



FONTE: Adaptado de LoRa/LoRaWAN tutorial 15 (2020).

Um valor de SF superior gera um acréscimo na SNR e, conseqüentemente no alcance de transmissão e na sensibilidade do receptor. Estes benefícios podem ser explicados pelo aumento de *chips* por *bit* de informação útil, fazendo com que o sinal seja menos corrompível, tornando-o mais robusto contra erros de *bit*. Porém, o tempo de transmissão também aumenta ao utilizar valores de SF maiores, diminuindo a densidade máxima que a rede pode alcançar e expondo o sinal por um maior período a degradações. Além disso, a vazão do sistema é inversamente proporcional ao *spreading factor*, uma vez que, com o aumento do tempo de transmissão por símbolo, a taxa de *bits* de *payload* por segundo diminuirá com o acréscimo desta variável. Devido a esta característica, o consumo de energia também se torna mais elevado, simplesmente por ser necessário transmitir por mais tempo ao aumentar o SF.

2.3.2 Taxa de código (CR)

A taxa de código pode ser definida como a proporção do *stream* de *bits* transmitidos que são úteis (não redundante) em relação aos *bits* redundantes, e é apresentada através de um número fracionário k/n , sendo que para “ k ” *bits* de informação útil, “ n ” *bits* de informação são gerados, dos quais $n-k$ são redundantes. Os valores mais comuns para a CR em comunicações LoRa são: $4/5$, $4/6$, $4/7$ e $4/8$.

A utilização desta técnica oferece proteção contra interferência, tornando o sinal mais robusto devido à maior possibilidade de correção de um *bit* com a utilização da redundância. Porém, quanto mais *bits* forem utilizados para redundância (no caso

do LoRa, quando a CR for 4/8), maior será o tempo de transmissão de um determinado *payload*. Com isso, a probabilidade de colisão aumenta, podendo diminuir o limite de nós presente em uma única rede, além de aumentar o tempo de exposição do sinal a possíveis fatores externos degradadores. Outro fator influenciado pela utilização de mais *bits* redundantes é o tempo de vida da fonte de energia, uma vez que, quanto mais informação transmitida, maior será o consumo de energia do dispositivo. E, considerando que a maioria de aplicações IoT são alimentadas à bateria, este fator passa a se tornar bastante relevante.

É importante observar que dispositivos operando com diferentes taxas de código ainda conseguem se comunicar entre si, caso seja utilizado na composição de estrutura de pacote o campo de cabeçalho explícito, definido na Seção 2.4, fazendo com que a CR utilizada para codificar o *payload* seja armazenada no cabeçalho, sendo este elemento sempre codificado com uma CR de 4/8 (ROEDIG; BOR, 2017).

2.3.3 Largura de banda (BW)

A capacidade de transmissão de dados está relacionada à largura de banda disponível, ou seja, quanto de recurso relacionado ao domínio da frequência poderá ser utilizado para transmitir uma determinada quantidade de dados. Para transmissões LoRa, os valores utilizados para essa variável são 125 KHz, 250 KHz e 500 KHz. Este parâmetro influencia diretamente no desempenho da modulação LoRa, como já comentado na Seção 2.1.

É notável que, quanto maior a largura de banda, mais *bits* por segundo poderão ser enviados de um ponto a outro, ou seja, a vazão é diretamente proporcional a este parâmetro. Além disso, considerando uma mesma quantidade de informação a se transmitir, a mesma será enviada em menor tempo ao utilizar uma faixa maior, expondo menos os dados enviados a interferências e degradações do sinal.

Porém, quanto maior a largura de banda, menor a sensibilidade de recepção. Este fenômeno ocorre devido à maior exposição do sinal a ruídos ao utilizar faixas maiores, uma vez que, quanto mais banda utilizada, mais ruídos de diferentes frequências poderão degradar o sinal.

Outro fator influenciável por este parâmetro é a produção dos dispositivos de transmissão. Sabe-se que, quanto menor a largura de banda, mais precisos os osciladores de cristal, responsáveis pela geração do sinal modulado, precisam ser.

Porém, a maioria dos dispositivos LoRa presentes no mercado já são projetados para operarem em boas condições nas três opções de largura de banda disponíveis para esta tecnologia.

2.3.4 Potência de transmissão

A potência de transmissão em dispositivos LoRa quase sempre assume valores muito baixos, uma vez que na maioria das vezes os mesmos operam à bateria. Um dispositivo deste tipo de tecnologia pode assumir valores de -4 até 20 dBm para este parâmetro, com uma resolução de 1 dBm. Porém, devido a algumas limitações de *hardware*, geralmente o *range* é limitado para 2 até 20 dBm (ROEDIG; BOR, 2017).

Além disso, a potência máxima para se realizar uma transmissão em certas faixas de frequência em alguns países são limitadas. Por exemplo, são permitidas potências de transmissão de até 25 mW (14 dBm) na faixa de 863 até 870 MHz em países europeus para comunicações *uplink*. Os ganhos das antenas utilizadas, fator muito importante para aplicações de baixa potência, também podem ser limitados. Para este mesmo exemplo, o ganho máximo permitido de uma antena é de +2,15 dBi. (LORA READ THE DOCS, 2020).

2.3.5 Frequência de operação

Como em qualquer transmissão de dados, comunicações baseadas em LoRa devem operar em determinadas frequências por padrão, além de serem projetadas para um funcionamento específico em certas faixas deste domínio. Este parâmetro varia de acordo com o país/região, porém mundialmente todas as transmissões LoRa são limitadas na faixa de 300 até 1000 MHz (TABELA 2). Geralmente, as faixas de espectro não licenciado são escolhidas para essas aplicações, por serem consideradas faixas em que não há burocracia e necessidade de permissão para realizar transmissões, possibilitando a implementação de redes acessíveis, de alta escalabilidade, densidade e aplicabilidade. Por exemplo, no Brasil as faixas de operação LoRa estão inseridas no espectro não licenciado, sendo elas: 433 até 435 MHz, 902 MHz até 907,5 MHz e 915 MHz até 928 MHz (LORA ALLIANCE, 2019).

Na maioria dos casos, as bandas utilizadas para transmissões deste tipo oferecem robustez à atenuação em geral, tanto para características naturais (chuva,

gases, névoa, etc) quanto para obstruções (prédios, pessoas, árvores, etc). Porém, por serem bastante utilizadas, é possível que haja bastante interferência. Para resolver isto, a modulação utilizada no LoRa possui técnicas e ferramentas que garantem uma blindagem maior a este problema, todas elas citadas na Seção 2.2.

TABELA 2 – BANDAS DE OPERAÇÃO LORA DE ALGUNS PAÍSES

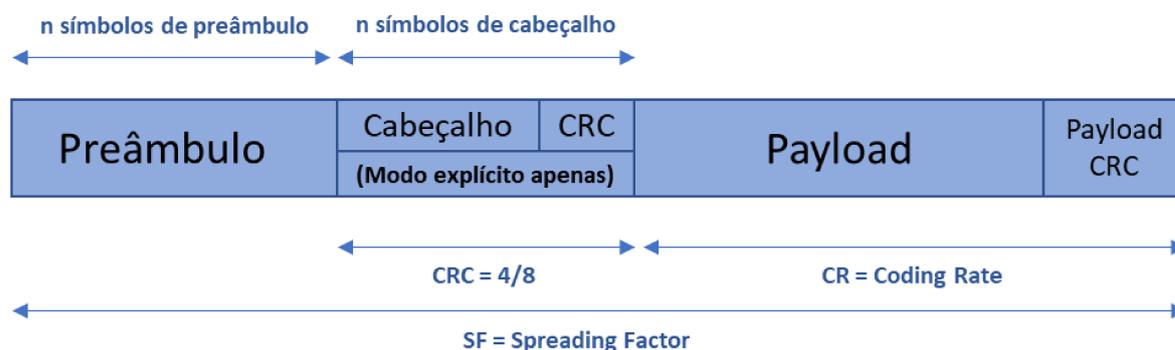
País	Banda/canais
Austrália	915 - 928 MHz
	902 – 907,5 MHz
Brasil	915 - 928 MHz
	433 - 435 MHz
Canadá	902 - 928 MHz
Estados Unidos	902 - 928 MHz
	433,05 – 434,79 MHz
França	863 - 870 MHz
	433,05 – 434,79 MHz
Inglaterra	863 - 873 MHz
	915 - 918 MHz
Japão	920,6 – 928 MHz

FONTE: Adaptado de LoRa Alliance (2019).

2.4 ESTRUTURA DE PACOTE

A camada física LoRa possui um padrão de estrutura de pacote para formatar os dados a serem enviados, composta por um preâmbulo, um cabeçalho opcional, pelo payload a ser enviado e pelo campo de *Cyclic Redundancy Check* (CRC) relativo ao *payload* (FIGURA 6). Tal estrutura possui duas variações, sendo elas o formato explícito e o formato implícito. O primeiro formato citado inclui em sua composição os *bytes* de cabeçalho, que contém informações sobre a quantidade de *bytes* de *payload*, o CR utilizado e se o CRC está sendo aplicado.

FIGURA 6 – ESTRUTURA DO PACOTE LORA



FONTE: Adaptado de Semtech SX1276/77/78/79 (2016).

O preâmbulo é utilizado pelo receptor como um sincronizador do fluxo de dados recebidos. O receptor realiza um processo de detecção de preâmbulo periodicamente a fim de encontrar pacotes para serem processados. Tal campo possui um tamanho variável, mas possui um padrão de 12 símbolos, sendo que o tamanho do símbolo varia de acordo com o SF utilizado.

O cabeçalho, como já mencionado anteriormente, é incluso no pacote LoRa apenas ao utilizar o modo explícito. Este campo é utilizado principalmente para armazenar informações do *payload* enviado, como a quantidade de *bytes* que compõe esses dados, o CR utilizado para codificá-los e a indicação do uso ou não de um CRC de 16 *bits* relativo também ao *payload*. Além disso, neste campo também é incluso um CRC relativo aos seus próprios dados. Um ponto a ser observado é que os *bytes* que compõe o cabeçalho são codificados com um CR fixo de 4/8 (SEMTECH SX1276/77/78/79, 2016).

Quando o cabeçalho não é incluído, indica-se que o modo implícito está sendo utilizado. Tal opção é útil para aplicações em que o CR, a presença ou não do CRC e o tamanho do *payload* são fixos ou sempre conhecidos por todos os elementos da rede. Com isso, o uso do cabeçalho não se torna tão essencial, podendo ser removido para diminuir a quantidade de *bytes* a serem transmitidos.

Em relação ao CRC, o mesmo é implementado obrigatoriamente no fim do pacote a ser enviado apenas no lado do transmissor quando o modo explícito é utilizado. Tal campo é composto por dois *bytes* e possui a função de verificar a integridade dos dados de *payload* na recepção do sinal. Em relação ao modo implícito, este campo é implementado obrigatoriamente tanto pelo transmissor quanto pelo receptor.

Outro parâmetro relacionado ao pacote LoRa e ao SF utilizado para transmiti-lo é a otimização aplicada a baixa taxa de dados (*low data rate optimization*). Esta é uma característica que geralmente é obrigatoriamente empregada quando a duração do símbolo (T_{Symbol}) excede 16 ms, cujo cálculo foi demonstrado na Seção 2.1. Tal funcionalidade não possui a sua operação e descrição documentada, porém através da equação do cálculo de N_{payload} , observa-se que a mesma reduz o número de *bits* transmitidos por símbolo em dois (AUGUSTIN *et al.*, 2016).

2.5 LORAWAN

Como já mencionado anteriormente, a tecnologia LoRa representa somente a camada física de um tipo específico de rede, sendo apropriada para transmissões de pequenas quantidades de dados a longas distâncias utilizando uma baixa potência. A mesma é responsável por definir apenas a estrutura física e eletrônica, além da modulação utilizada. Já a tecnologia LoRaWAN é o conjunto de protocolos e especificações que definem os parâmetros de acesso ao meio utilizados pela tecnologia LoRa, representando a camada MAC da rede (FIGURA 7). As principais atribuições do LoRaWAN são: gerenciamento das configurações dos dispositivos transmissores, suporte à comunicação bidirecional e o controle do acesso ao canal de comunicação.

FIGURA 7 – ESTRUTURA DAS TECNOLOGIAS LORA E LORAWAN



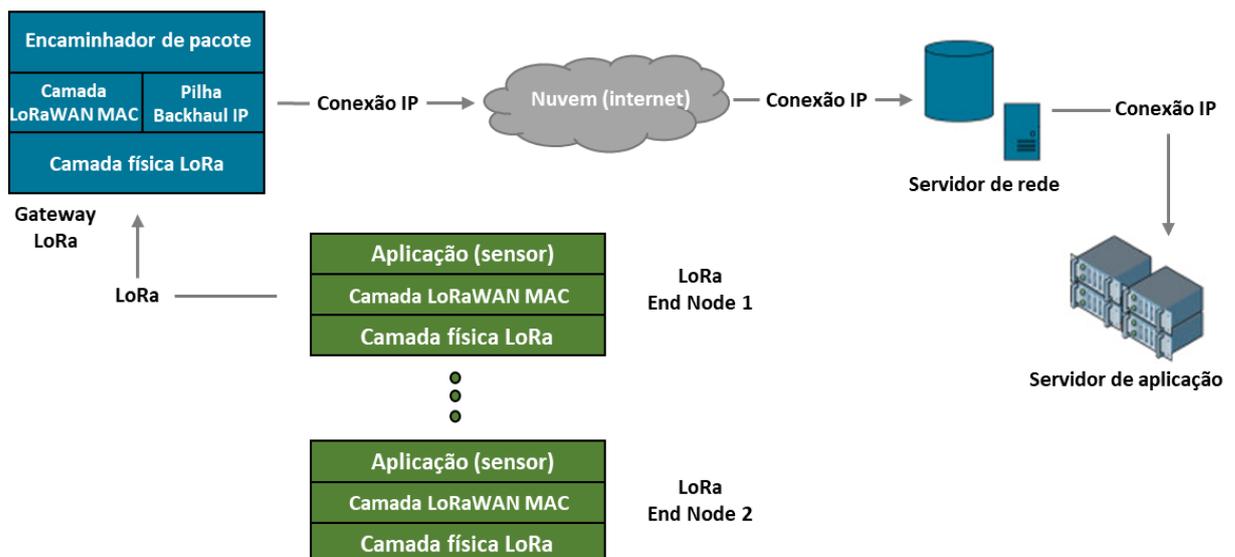
FONTE: Adaptado de Library (2021).

A rede LoRaWAN, constituída pela junção das tecnologias LoRa e LoRaWAN, é composta por dois tipos de dispositivos. O primeiro deles são os *gateways*,

concentradores ou mestres, caracterizados por realizarem a função de receber os dados de todos os outros dispositivos da rede, para assim enviá-los à rede externa (*internet*) através de um enlace de comunicação baseados em pilhas de protocolos IP, sendo este estabelecido através redes móveis celulares, comunicação via satélite ou alguma outra opção. O outro tipo de dispositivo presente em redes LoRAWAN são os nós, *end nodes* ou escravos, os quais possuem a função de coletar e transmitir dados para o concentrador, não possuindo um acesso direto à rede externa, composto apenas pela camada física (LoRa PHY), MAC (LoRaWAN) e, em alguns casos, pela camada de aplicação (FIGURA 8).

Em mais detalhes, o *gateway* é responsável por gerenciar a rede de *end nodes*, alocando as sub-bandas, *spreading factors* e outros parâmetros para cada um deles, geralmente realizando essa atribuição através da técnica *Adaptive Data Rate* (ADR), explicada na Seção 6.1. Devido à possibilidade de utilizar diferentes *spreading factors* para cada nó e pelo fato de os concentradores em questão serem *multi-channel*, a rede LoRaWAN permite um alto número de dispositivos e de transmissões simultâneas, assim aumentando a sua capacidade. Por fim, o *gateway* também possui a função de realizar a criptografia dos dados entre a camada de aplicação e a camada MAC (ORTIZ, 2018).

FIGURA 8 – ARQUITETURA DE UMA REDE LORAWAN



FONTE: Adaptado de Triantafyllou *et al.* (2021).

Em relação à comunicação entre as camadas lógica (MAC) e física, a mesma é realizada através do protocolo *Serial Peripheral Interface* (SPI). Além disso, previamente à conexão SPI, há a atuação de uma camada de abstração de *hardware* (HAL), responsável por interpretar as instruções de *software* a nível de sinais elétricos para o transmissor em questão (ORTIZ, 2018).

Quanto ao acesso ao enlace, a rede LoRaWAN utiliza o protocolo ALOHA puro como base para gerenciar tal ponto, sendo este um protocolo com uma operação descentralizada e sem definições de intervalos. O seu funcionamento se baseia em realizar uma transmissão assim que necessário pelo canal de difusão e, caso ocorrer uma colisão, retransmitir os dados imediatamente relacionado a uma probabilidade “p”. No caso de a retransmissão não ocorrer (probabilidade de $1 - p$), o nó espera por um tempo de quadro. Em seguida, repete-se a chance de realizar a retransmissão vezes suficientes até que haja sucesso na transmissão dos dados (KUROSE; ROSS, 2013). Para obter vantagens em relação ao protocolo ALOHA puro, a tecnologia LoRaWAN também se utiliza de outros modos de operação, denominados classes, capazes de oferecer um funcionamento mais complexo aos *end nodes*, assim otimizando o desempenho da rede e disponibilizando opções de atuação mais adequadas a cada um deles conforme as suas respectivas aplicações.

2.5.1 Classes

As classes são elementos que compõem a camada MAC LoRaWAN responsáveis por definirem os tipos de modos de operação dos dispositivos desta tecnologia. A especificação LoRaWAN define três possíveis classes em sua arquitetura: classe A, classe B e classe C.

A classe A define o modo de transmissão mais simples que um elemento LoRaWAN pode assumir. Além disso, esta categoria também impõe as especificações básicas que qualquer um destes elementos, independente de qual classe, deva seguir, por exemplo: formatos de mensagens, janelas de recepção, etc. (LORA ALLIANCE, 2018).

Dispositivos de classe A podem iniciar uma transmissão *uplink* (do nó ao *gateway*) a qualquer momento de acordo com a sua necessidade, além de permitir comunicação bi-direcional. Porém, a sua recepção é limitada a duas janelas de recepção, sendo a primeira iniciada após um *delay* de sua transmissão de

aproximadamente um segundo (LORA ALLIANCE, 2019). Após a primeira janela ser finalizada, há um segundo *delay* de aproximadamente um segundo (LORA ALLIANCE, 2019) e então a segunda oportunidade de receber dados é iniciada e, em seguida, finalizada (FIGURA 9).

O tempo de duração das janelas é variado de acordo com as necessidades do dispositivo. Em relação ao domínio da frequência, cada janela é configurada para dados em frequências específicas. A primeira janela utiliza uma frequência e uma taxa de transmissão referente aos mesmos parâmetros utilizados na transmissão realizada pelo nó. Já a segunda janela utiliza valores fixos pré-definidos para tais parâmetros. Estes valores por padrão obedecem às especificações regionais, porém podem ser alterados. Já em relação ao consumo de energia, esta classe possui o menor deles.

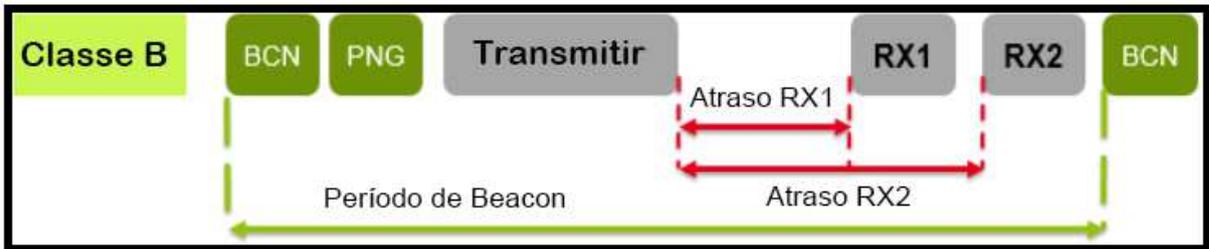
FIGURA 9 – CLASSE A LORAWAN



FONTE: Adaptado de Bouguera *et al.* (2018).

A classe B possui algumas semelhanças em relação à classe A. Dispositivos desta categoria também abrem duas janelas de recepção após a sua transmissão, porém quem inicia a comunicação é sempre o *gateway*, enviando *pings* e *beacons* aos nós, indicando que os mesmos podem realizar transmissões. O sinal de *beacon* é responsável por garantir a sincronização entre todos os elementos da rede e por informar aos dispositivos escravos os tempos de duração das janelas de recepção, ou seja, realizar o escalonamento da rede. No final da última oportunidade de um nó receber dados, o *gateway* volta a enviar um *beacon* para informar o fim da comunicação entre os dois (FIGURA 10). Nesta classe, dispositivos mestre podem fazer envios *multicast* para múltiplos nós e dispositivos escravos podem realizar apenas envios *unicast*, sendo eles sempre destinados ao mestre (ORTIZ, 2018).

FIGURA 10 – CLASSE B LORAWAN

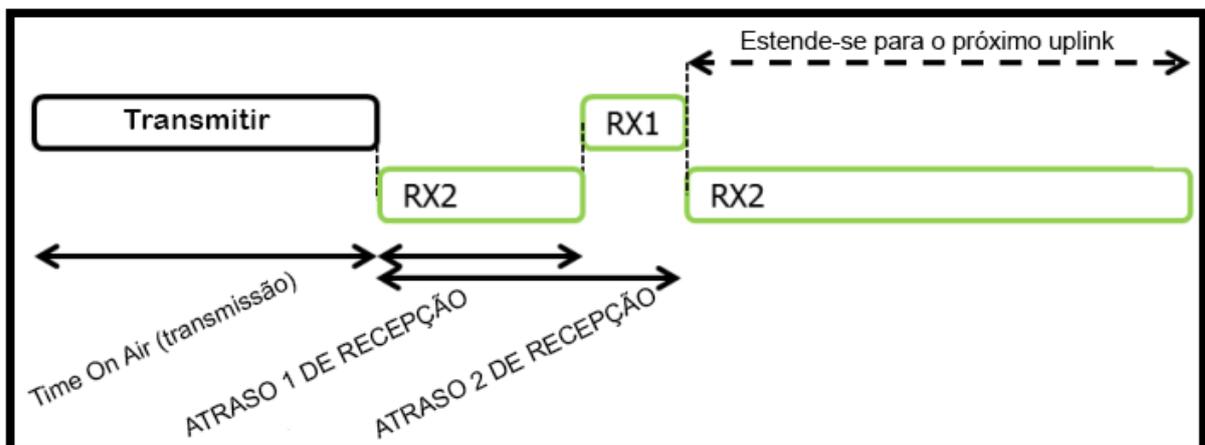


FONTE: Adaptado de Bouguera *et al.* (2018).

Por fim, a classe C é a categoria que oferece a menor latência de transmissão, porém a que possui o maior consumo de energia dos dispositivos, uma vez que os terminais pertencentes a esta classe estão sempre disponíveis para receber mensagens. Devido a isso, esta categoria é mais utilizada em aplicações nas quais os elementos da rede são alimentados por fontes de energia externas, e não por baterias.

A operação desta classe também se baseia no mesmo princípio de duas janelas de recepção. Após uma transmissão de um dispositivo escravo, imediatamente uma oportunidade de receber dados é aberta. Após o seu encerramento, instantaneamente outra janela é aberta e após um período é fechada. Com isso, a primeira janela volta a se abrir e permanece neste estado até que outra transmissão seja feita pelo mesmo nó (FIGURA 11).

FIGURA 11 – CLASSE C LORAWAN



FONTE: Adaptado de LoRa Alliance (2018).

Outro tipo de aplicação que pode se beneficiar ao utilizar dispositivos de classe C são redes de topologia *mesh*, uma vez que é recomendado a prontidão de todos os participantes da mesma, já que qualquer um deles podem servir como “ponte” para o envio de dados ao *gateway* conectado à rede Ethernet. Esta topologia pode ser aplicada à tecnologia LoRa, relação a qual é apresentada na Seção 2.6.

2.6 LORA MESH

Como apresentado na Seção 2.5, a rede LoRaWAN é capaz de receber dados de dispositivos localizados a longas distâncias do *gateway*. Porém, a distância máxima de transmissão desta tecnologia nem sempre é suficiente para determinadas aplicações, nas quais é necessário garantir uma cobertura de sinal muito extensa, por exemplo em casos de grandes propriedades rurais, parques ecológicos, entre outros. Além disso, mesmo em médias distâncias, nem sempre este tipo de rede é capaz de garantir a comunicação, devido às características desfavoráveis do relevo da área em questão. Essas características podem prejudicar as visadas entre os dispositivos, assim diminuindo a distância máxima da transmissão dos dados ou até mesmo impossibilitá-la.

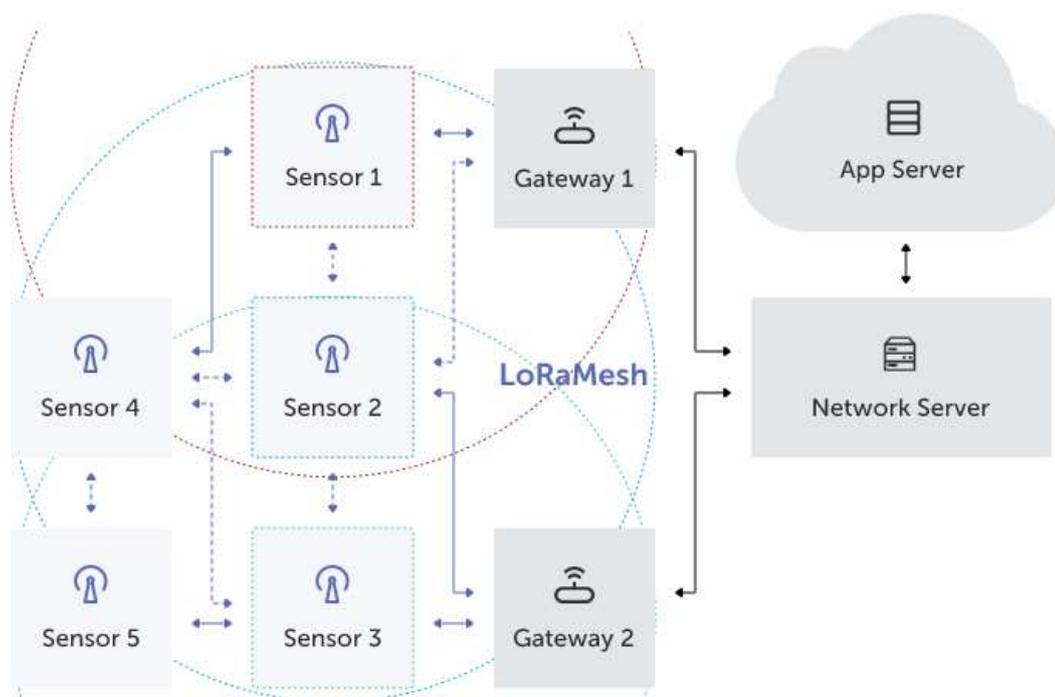
Para lidar com tais limitações, é possível utilizar uma rede do tipo *mesh*, que possui como característica permitir a comunicação entre todos os dispositivos da mesma, independente do seu tipo, formando uma topologia de malha. Assim, mesmo em casos de um *end node* não conseguir transmitir diretamente seus dados para o concentrador, o mesmo pode direcioná-los a outro nó visível, que repetirá este processo até alcançar o destino final, ou seja, o *gateway*.

Quanto às redes *mesh*, pode-se entendê-las como um conjunto de diversas conexões do tipo *ad hoc*, capazes de realizar o redirecionamento de mensagens entre os dispositivos que as compõe, conceito este conhecido como *multi-hop*. Este tipo de rede deve ser capaz de se auto-organizar e controlar o tráfego de dados nela existente. Geralmente, tal tarefa é feita através do gerenciamento de tabelas de roteamento baseadas em algum ID único que represente individualmente cada nó, seja ele o endereço físico da camada MAC ou alguma outra opção.

As tecnologias baseadas em *mesh* podem ser aplicadas à camada física LoRa, substituindo a tecnologia LoRaWAN. Tal combinação, denominada LoRa *Mesh* (FIGURA 12), unifica a robustez da modulação LoRa contra interferências, efeito

Doppler e perdas por multi-caminho com todos os ganhos já citados que a topologia em malha oferece, fazendo com que este tipo de rede se torne uma excelente opção para aplicações IoT em áreas extensas.

FIGURA 12 – ARQUITETURA DE UMA REDE LORA MESH



FONTE: What (2021).

Diferente do LoRaWAN, o LoRa *Mesh* não possui um protocolo padrão, com as suas especificações divulgadas de forma aberta. No caso desta rede, foram criadas inúmeras variações pelo meio privado e acadêmico, cada um com suas peculiaridades e otimizações, não possuindo assim um órgão ou empresa padronizadora responsável por centralizar a referência destes protocolos.

Geralmente, as variações da rede LoRa *Mesh* desenvolvidas se baseiam em implementar mais um tipo de dispositivo, responsável por realizar o roteamento dos pacotes de dados dos *end nodes* ao *gateway*, denominado roteador. Para realizar tal função, tal dispositivo provê uma camada de enlace (podendo ou não possuir características baseadas na tecnologia LoRaWAN) e, em alguns casos, uma camada de rede, para melhor gerenciar tabelas de roteamento ou outro recurso para gerenciar o tráfego de dados (COTRIM; KLEINSCHMIDT, 2020). Com isso, é possível implementar uma rede com todos os seus dispositivos operando como roteadores,

permitindo o estabelecimento de rotas entre todos eles, ou uma rede composta por uma junção de roteadores e *end nodes* padrão.

Apesar de oferecer benefícios consideráveis às aplicações IoT, as redes LoRa *Mesh* podem trazer algumas desvantagens em relação ao LoRaWAN. Um exemplo é o fato de a maioria das variações *mesh* serem aplicáveis a apenas *gateways single channel*, resultando em uma queda expressiva na capacidade da rede. Outro ponto a se considerar é o aumento de cabeçalhos nos pacotes de dados a serem transmitidos. Para garantir o roteamento, é necessário um protocolo mais complexo, fazendo com que mais informações sejam inseridas em cada transmissão realizada pelos dispositivos.

Mesmo com as desvantagens citadas, as redes *LoRa Mesh* são bem atrativas a diversas aplicações devido a todos os seus benefícios já apresentados. Com isso, para cada situação, é preciso analisar qual tecnologia é mais adequada à respectiva necessidade. Portanto, não é possível afirmar que a rede LoRa *Mesh* possui mais vantagens quando comparada à rede LoRaWAN ou vice-versa, e sim que, cada uma delas se aplica melhor a uma determinada situação.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo apresentar as principais características da tecnologia LoRa a nível técnico. Inicialmente, as características gerais da mesma foram expostas, bem como a sua capacidade de transmissão e sensibilidade de recepção. A seguir, as equações do cálculo da taxa de transmissão e *time on air* foram apresentadas.

Em seguida, a modulação utilizada pela comunicação LoRa foi apresentada, trazendo um contexto histórico, mostrando a relação da mesma com as técnicas CSS e DSSS. Posteriormente, deu-se foco em sua operação, nos detalhes técnicos, nas suas vantagens e em como a modulação dos *bits* de dados é realizada.

Além disso, uma explicação sobre os parâmetros de transmissão LoRa foi realizada, sendo eles o *spreading factor*, taxa de código, largura de banda, a potência de transmissão e a frequência de operação. O significado, a aplicação e a função de cada um deles foram expostas, bem como a contribuição dos mesmos com o desempenho da rede, relativo à taxa de transmissão, consumo energético, etc.

A seguir, a estrutura do pacote LoRa foi apresentada, identificando cada campo presente em sua composição, assim como a sua respectiva função. Também se comentou sobre as duas variações de formato de estrutura de pacote, sendo elas o formato explícito e o formato implícito.

Posteriormente, apresentou-se as principais opções de camada de acesso para a tecnologia LoRa, sendo elas a tecnologia LoRaWAN e o LoRa *Mesh*. Primeiramente, comentou-se sobre o LoRaWAN, dando foco em sua estrutura de dispositivos escravos e dispositivos mestre, além de apresentar o protocolo ALOHA puro utilizado para o acesso ao meio, bem como as 3 classes de variações, as quais trazem uma complexidade adicional para a tecnologia em questão. Então, por fim, comentou-se sobre o LoRa *Mesh*, apresentando um embasamento teórico sobre redes *mesh* e, em seguida, expondo as principais variações da tecnologia LoRa *Mesh* encontradas no meio acadêmico, uma vez que a mesma não possui um protocolo padrão, com as suas especificações divulgadas de forma aberta.

Agora, após a exposição de todos estes tópicos relativos à comunicação LoRa, o próximo capítulo focará na modelagem de perda de caminho para comunicações sem fio, apresentando os principais métodos para esse fim.

3 MODELOS DE PERDA DE CAMINHO PARA COMUNICAÇÕES SEM FIO

Este capítulo tem como objetivo expor a teoria geral sobre modelos de propagação, explicitando os pontos a serem considerados pelos modelos, bem como as suas possíveis classificações.

Além disso, apresenta-se os principais tipos de modelos em larga escala, os quais possuem como objetivo estimar o valor médio de perda de caminho a fim de determinar uma área de cobertura para o sinal transmitido. Os modelos apresentados são: o modelo de propagação no espaço livre, o modelo de perda de caminho log-distância e o modelo de propagação Okumura-Hata. Para cada um, expõe-se a sua teoria geral através de explicações e demonstrações de equações relativas à perda de caminho.

3.1 INTRODUÇÃO

Um dos elementos mais importantes a ser compreendido para projetar um enlace de comunicação é o canal pelo qual o sinal será transmitido, pois este fator impõe limitações e inclui inúmeras variáveis que afetam consideravelmente o desempenho da transmissão, especialmente quando a mesma é estabelecida em um meio sem fio. Além disso, as comunicações de rádio possuem um caráter aleatório e imprevisível diferentemente das transmissões cabeadas e estacionárias, uma vez que diversos fatores externos influenciam a propagação do sinal no meio, como a velocidade de movimento do transmissor ou do receptor, a interferência de outros sinais que compartilham o mesmo canal, a atenuação do próprio meio e de outros elementos (objetos, construções, pessoas, plantas, etc), entre outros. Devido a esta imprevisibilidade, a modelagem do canal é considerada uma das partes mais complexas do projeto de um sistema de comunicação sem fio e quase sempre é baseada em estatística e em procedimentos empíricos através de medições específicas para uma determinada situação (RAPPAPORT, 2009).

Ao estabelecer um modelo de propagação, é necessário considerar os principais fenômenos ondulatórios de uma transmissão de um sinal, sendo eles a reflexão, a difração e a dispersão. Um dos cenários mais influenciados por estes mecanismos é a transmissão em ambientes urbanos, onde não há uma linha de visada

direta entre transmissor e receptor devido à presença de muitos obstáculos (construções, veículos) que causam uma perda de sinal por difração.

Os modelos de propagação podem ser classificados em dois grupos. O primeiro deles corresponde aos modelos em pequena escala ou modelos de atenuação, focados em caracterizar as flutuações rápidas do sinal para pequenas distâncias ou para curtas durações de tempo (RAPPAPORT, 2009). Já o segundo grupo corresponde aos modelos em larga escala. Tal variante se baseia em considerar a influência dos principais mecanismos de propagação, possuindo como foco prever uma intensidade média do sinal na recepção transmitido a qualquer distância e estabelecer uma estimativa na área de cobertura do transmissor.

Como o trabalho em questão tem como foco de estudo as redes de comunicação LoRa, as quais operam a longas distâncias, em contextos susceptíveis a interferências, relevos não favoráveis às transmissões, entre outras variáveis, este capítulo descreve mais detalhadamente apenas os modelos em larga escala. Com isso, os principais modelos desta classificação são apresentados nas próximas seções, sendo eles: o modelo de propagação no espaço livre, o modelo de perda de caminho log-distância e o modelo de propagação Okumura-Hata.

3.2 MODELO DE PROPAGAÇÃO NO ESPAÇO LIVRE

O modelo de propagação no espaço livre é utilizado para prever o tipo de transmissão mais ideal possível, ou seja, um sinal que se propaga através do espaço livre (ar) com linha de visada direta sem nenhum obstáculo entre o transmissor e o receptor, ambos com antenas com ganhos conhecidos, possuindo como resultado a atenuação do sinal causada pela propagação do mesmo entre dois pontos separados por uma determinada distância. Devido a esta característica de trivialidade, este geralmente é utilizado como base e/ou referência para outros modelos.

A propagação no espaço livre é baseada na equação de Friss - equação (8), que fornece a potência de recepção (P_R) em função da potência de transmissão (P_T), os ganhos das antenas do sistema (G_T e G_R), o comprimento de onda do sinal transmitido (λ), a distância (d) entre os dois pontos (RAPPAPORT, 2009).

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (8)$$

A partir de uma análise direta de um enlace de comunicação, percebe-se que a atenuação do sinal ou a perda de caminho é simplesmente a relação entre a potência transmitida e a potência recebida, ou seja, o quanto de intensidade o sinal perdeu durante o percurso até o seu destino. Manipulando a equação de Friss e aplicando a escala de decibéis (dB), é possível relacionar essas duas grandezas a partir de outras variáveis.

$$P_L(dB) = 10 \log\left(\frac{P_T}{P_R}\right) = 10 \log\left(\frac{(4\pi)^2 d^2}{G_T G_R \lambda^2}\right) \quad (9)$$

Através da equação (9), percebe-se que a atenuação do sinal na propagação no espaço livre é diretamente proporcional ao quadrado da distância, fazendo com que a potência recebida sofra um decréscimo de 6 dB ao dobrar a distância entre transmissor e receptor. Em relação a frequência, percebe-se o mesmo comportamento: um aumento de 6 dB na perda de caminho ao dobrar o valor deste parâmetro. Para amenizar esta característica, antenas com um ganho expressivo são utilizadas, principalmente em enlaces de comunicação de alta frequência (faixa de frequência ultra-alta - UHF, por exemplo) nos quais a perda é ainda maior (RAPPAPORT, 2009).

Como a escala em dB é a mais utilizada na área de telecomunicações, é conveniente uma representação matemática da equação do modelo de propagação no espaço livre nesta unidade. Assim, através da equação (9), separando-se e manipulando os termos, é possível encontrar a perda de caminho em dB através da frequência do sinal em MHz e da distância em quilômetros.

$$P_L(dB) = 32,44 + 20 \log(f_{MHz}) + 20 \log(d_{km}) - 10 \log(G_T) - 10 \log(G_R) \quad (10)$$

É importante ressaltar que este modelo de perda é válido apenas quando o receptor estiver localizado no campo distante da antena transmissora, também

conhecido como região de *Fraunhofer* (RAPPAPORT, 2009), definida como a região além da distância de campo distante (d_F), dada pela equação (11),

$$d_F = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (11)$$

sendo D a maior dimensão linear física da antena. Além disso, necessita-se que d_F , seja muito maior que o tamanho da antena e muito maior que o comprimento de onda do sinal (RAPPAPORT, 2009).

$$d_F \gg D \quad (12)$$

$$d_F \gg \lambda \quad (13)$$

Geralmente, para eliminar distâncias menores que d_F ou uma distância nula ($d = 0$), utiliza-se neste modelo de propagação uma distância próxima denominada d_0 , utilizada como referência de uma atenuação já conhecida. O valor da atenuação ou da potência recebida nesta distância pode ser obtido através da equação (9) ou por meio de medições experimentais em diversos pontos, sendo eles localizados a uma distância radial d_0 do transmissor. Como já mencionado, este valor encontrado pode ser utilizado como padrão para outras medidas através do modelo de propagação no espaço livre em outras distâncias desde que obedeçam a condição abaixo, ou até mesmo através de outros sistemas de modelagem, como é o caso de algumas aplicações do modelo de perda de caminho log-distância, descrito na Seção 3.3.

$$d \geq d_0 \geq d_F \quad (14)$$

3.3 MODELO DE PERDA DE CAMINHO LOG-DISTÂNCIA

O modelo de perda de caminho log-distância se baseia em técnicas práticas para estimar a perda de caminho e, do mesmo modo que o modelo de propagação no espaço livre, na relação logarítmica entre a queda da potência média do sinal e o aumento da distância, porém considerando uma variação no expoente de perda de

caminho, denominado “n”. No espaço livre, esta variável é igual a 2, mas para cada tipo de ambiente ela recebe um valor diferente (TABELA 3), sendo esta característica considerada pelo modelo de perda de caminho log-distância. Além disso, também se utiliza a distância próxima d_0 como referência, assim definindo a perda de caminho média em grande escala pela equação (15),

$$\overline{PL}(d)[dB] = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (15)$$

sendo $\overline{PL}(d_0)$ a perda de caminho média medida na distância próxima (CHALL; SAMER; HELOU, 2019), podendo ser obtida simplesmente através do cálculo da fórmula de perda de caminho do espaço livre ou por meio de uma média de medições reais à distância d_0 .

TABELA 3 - VALORES DO EXPOENTE DE PERDA DE CAMINHO PARA DIFERENTES AMBIENTES

Ambiente	Expoente de perda de caminho
Espaço livre	2
Área urbana	2,7 - 3,5
Área urbana sombreada	3 - 5
LOS em construções	1,6 - 1,8
NLOS em construções	4 - 6
NLOS em indústrias	2 - 3

FONTE: Adaptado de Dagnes *et al.* (2011).

Sobre a escolha da distância próxima de referência d_0 , além de obedecer aos critérios mencionados na Seção 3.2, é necessário selecionar um valor apropriado ao ambiente de propagação e ao sistema de comunicação utilizado. Por exemplo, em sistemas de comunicação celular de grande cobertura o valor para d_0 mais utilizado é 1 quilômetro, já em aplicações de menor alcance valores menores são mais adequados, como 100 metros ou até 1 metro (RAPPAPORT, 2009).

Outro ponto relevante considerado por este modelo é o ruído. Ao considerá-lo, é estabelecida uma importante relação da variação da perda de caminho não apenas

com a distância, mas também com o tipo de ambiente em questão. Assim, o ruído adiciona tal contribuição devido ao fato de transmissões realizadas em diferentes localizações, porém a uma mesma distância do receptor, poderem sofrer diferentes atenuações, uma vez que a potência do ruído pode assumir valores completamente diferentes em cada um destes locais.

Para isso, sabendo que a perda de caminho é uma variável aleatória e distribuída log-normalmente ao redor do valor médio para qualquer distância (RAPPAPORT, 2009), a perda de caminho considerando a presença do ruído é representada pela equação (16),

$$\overline{PL}(d) [dB] = \overline{PL}(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + \chi_\sigma \quad (16)$$

sendo χ_σ uma variável aleatória gaussiana de média zero com desvio-padrão σ (em dB), representando o efeito de sombreamento, sendo nada mais que a diferença de níveis de ruído em diferentes locais distantes igualmente em relação ao transmissor.

Como antes mencionado, o modelo de perda de caminho log-distância é um modo prático de estimar a perda de caminho. Portanto, para ser possível aferir esta grandeza, é necessário obter os valores de n e σ , calculados a partir das medições realizadas em campo, geralmente utilizando a regressão linear. O valor de $\overline{PL}(d_0)$, como já citado, pode ser obtido através do cálculo da fórmula de perda de caminho do espaço livre ou por meio de uma média de medições reais à distância d_0 , mas também pode ser gerado através de técnicas de regressões lineares.

3.4 MODELO DE PROPAGAÇÃO OKUMURA-HATA

O modelo de Okumura é um dos modelos mais conhecidos e utilizados para estimar a perda de caminho em áreas externas, principalmente em ambientes urbanos, apesar de o mesmo não considerar diferentes níveis de urbanização (MASADAN; HABAEBI; YUSOFF, 2018). Este se aplica à sinais pertencentes a uma faixa de frequência de 150 MHz até 1920 MHz, distâncias de 1 km até 100 km e possui como foco as redes de comunicação celular, uma vez que este modelo pode apenas ser utilizado para alturas de antena de transmissão de 30 até 200 m.

O método para a obtenção da perda de caminho do sinal é baseado no desenvolvimento de um conjunto de curvas da atenuação mediana relativa ao espaço livre em uma área urbana em terreno quase plano com uma altura de antena efetiva transmissora de 200 m e receptora de 3 m. Estas curvas foram obtidas através de várias medidas reais em ambientes externos e estão dispostas em relação à distância e à frequência utilizada (variando até 3000 MHz, valor um pouco maior previsto pelo modelo).

Para determinar a perda de caminho utilizando este procedimento, soma-se a perda no espaço livre (L_F), o valor da atenuação mediana obtido pelas curvas, $A(f,d)$, e as correções relativas à altura da antena transmissora (h_T), altura da antena receptora (h_R) e ao tipo de ambiente (A), resultando na equação (17), apresentada na referência (RAPPAPORT, 2009).

$$L [dB] = L_F + A(f, d) - G(h_T) - G(h_R) - G(A) \quad (17)$$

Quanto à correção devido às alturas das antenas, o cálculo é realizado da seguinte forma, utilizando como base 200 m para h_T e 3 m para h_R (RAPPAPORT, 2009),

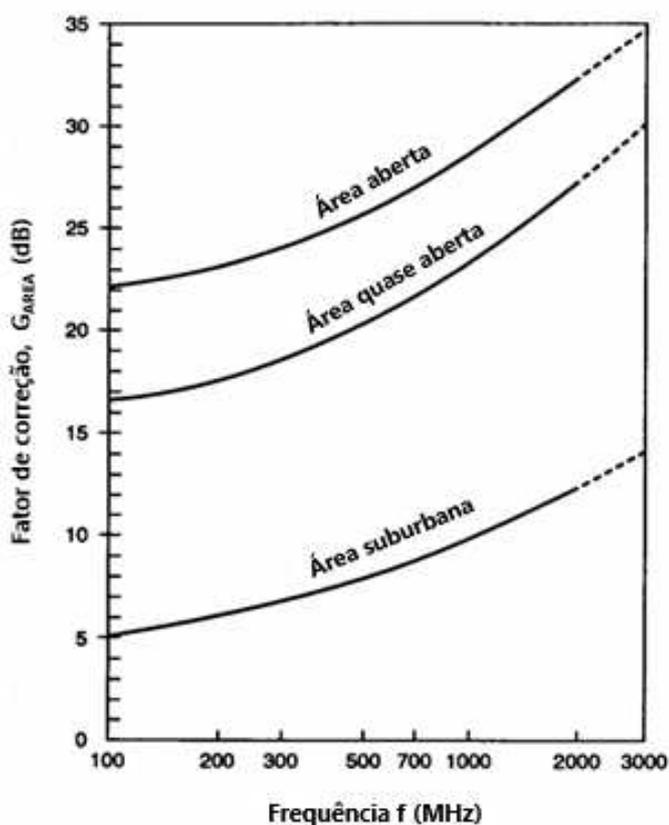
$$G(h_T) = 20 \log\left(\frac{h_T}{200}\right), \quad 30 \text{ m} < h_T < 1000 \text{ m} \quad (18)$$

$$G(h_R) = 10 \log\left(\frac{h_R}{3}\right), \quad h_T \leq 3 \text{ m} \quad (19)$$

$$G(h_R) = 20 \log\left(\frac{h_R}{3}\right), \quad 3 \text{ m} < h_R < 10 \text{ m} \quad (20)$$

Quanto à correção devido ao tipo de ambiente, utiliza-se outras curvas previstas pelo modelo, as quais fornecem valores em dB para $G(A)$ que variam de acordo com a frequência do sinal para áreas abertas, quase abertas e suburbanas (FIGURA 13).

FIGURA 13 – CURVAS DE CORREÇÃO DEVIDO AO TIPO DE AMBIENTE DO MODELO OKUMURA



FONTE: Adaptado de Rappaport (2009).

Como demonstrado nesta seção, o modelo de Okumura é bastante simples e prático. Porém, mesmo com essas características, ele ainda se mostra como uma ótima alternativa em termos de precisão na previsão da perda de caminho para sistemas de rede celular, apresentando um desvio-padrão entre o valor medido e o valor estimado de 10 a 14 dB (RAPPAPORT, 2009).

Contudo, percebe-se que não há um detalhamento em relação aos tipos de áreas consideradas pelo mesmo. Então, para uma melhor consideração em relação a este parâmetro e para acrescentar outras melhorias, outro método, baseado no modelo de Okumura, foi desenvolvido, denominado modelo de Hata ou modelo Okumura-Hata.

O modelo de Hata é uma formulação empírica para perdas de propagação, derivada das curvas de previsão do modelo de Okumura, criado inicialmente com o intuito de facilitar o uso computacional do mesmo. Através do artigo “*Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services*”, Masaharu Hata

apresentou a perda de caminho em áreas urbanas como uma fórmula padrão (HATA, 1980),

$$L[dB] = 69,55 + 26,16 \log(f_c) - 13,82 \log(h_T) - a(h_{RE}) + (44,9 - 6,55 \log(h_T)) \log(d) + C \quad (21)$$

sendo L a perda de caminho em dB, f_c a frequência utilizada em MHz, h_T a altura da antena transmissora em metros, d a distância em quilômetros, $a(h_{RE})$ o fator de correção relativo à altura da antena e C a correção relativa ao tipo de ambiente. As últimas duas variáveis podem assumir diferentes valores, variando de acordo com o tipo de área, conforme apresentado na TABELA 4. O modelo Hata pode ser aplicado a transmissões de sinais pertencentes a uma faixa de frequência de 150 MHz até 1500 MHz, utilizando antenas de transmissão com altura efetiva de 30 até 200 m e antenas de recepção com altura efetiva de 1 até 10 m (RAPPAPORT, 2009).

Similar ao modelo de Okumura, o modelo Hata é mais apropriado para sistemas de comunicação celular, uma vez que não é recomendado utilizá-lo para transmissões de distâncias menores que 1 km, condição essa a qual geralmente representa sistemas de comunicações pessoais.

TABELA 4 – VALORES DOS FATORES DE CORREÇÃO DO MODELO HATA

Ambiente	Variável	
	$a(h_{RE})$	C
Área rural	$(1,1 \log(f_c) - 0,7)h_R - (1,56 \log(f_c) - 0,8)$	$-4,78[\log(f_c)]^2 + 18,33 \log(f_c) - 40,94$
Área suburbana	$(1,1 \log(f_c) - 0,7)h_R - (1,56 \log(f_c) - 0,8)$	$-2 \left[\log \left(\frac{f_c}{28} \right) \right]^2 - 5,4$
Cidade de pequeno a médio porte	$(1,1 \log(f_c) - 0,7)h_R - (1,56 \log(f_c) - 0,8)$	0
Área metropolitana	$\begin{cases} 8,29(\log(1,54h_R))^2 - 1,1, & f_c \leq 200 \text{ MHz} \\ 3,2(\log(11,75h_R))^2 - 4,97, & f_c \geq 400 \text{ MHz} \end{cases}$	0

FONTE: Adaptado de Rappaport (2009).

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve como finalidade apresentar os principais modelos de perda de caminho para comunicações sem fio, focando em expor a teoria e o contexto em que cada um deles pode ser aplicado. Como ponto inicial, apresentou-se a motivação de desenvolver e utilizar modelos de perda de caminho, bem como as dificuldades e desafios que englobam tal processo. Além disso, realizou-se uma explanação sobre os dois tipos de modelagem existentes, sendo eles o de pequena escala e o de larga escala, sendo o último citado o tipo em que o presente trabalho tem como foco.

Em seguida, os três principais modelos de perda de caminho de larga escala foram expostos, iniciando com o modelo de propagação no espaço livre. Para este, realizou-se uma apresentação de seu embasamento teórico através da manipulação da equação de Friss. Além disso, indicou-se as condições relativas ao campo distante para a utilização do método.

A seguir, o modelo de perda de caminho log-distância foi contemplado. Para explicá-lo em detalhes, as suas equações foram demonstradas, assim como o

conceito de distância próxima de referência e a inclusão do efeito do ruído relacionado ao tipo de ambiente. Ademais, comentou-se sobre as medidas reais de intensidade de sinal necessárias para a sua aplicação, pelo fato do mesmo se tratar de um modelo que envolve atividades práticas.

Por fim, o modelo de propagação Okumura-Hata foi abordado, primeiramente detalhando suas limitações de aplicação relacionadas à distância, altura das antenas e frequência de operação. Também se apresentou um embasamento teórico do mesmo, iniciando com a exposição das equações e conjunto de curvas apresentadas no modelo-base de Okumura e posteriormente expondo as contribuições realizadas por Masaharu Hata, as quais trouxeram uma maior sensibilidade ao método em relação ao tipo de ambiente onde as transmissões ocorrem.

Com a apresentação dos principais modelos de perda de caminho de larga escala já realizada, o próximo capítulo traz detalhes da aplicação prática de um deles (modelo log-distância), realizada para estimar a atenuação do sinal considerando o contexto específico de uma transmissão de um sinal LoRa em um ambiente rural.

4 MODELO DE PERDA DE CAMINHO PARA COMUNICAÇÃO LORA EM ÁREAS RURAIS

Este capítulo tem como proposta detalhar o modelo de perda de caminho desenvolvido baseado no modelo log-distância, específico para comunicação LoRa em áreas rurais, citando inicialmente como este tipo de modelagem de perda de caminho é abordado na área acadêmica, através de uma apresentação de trabalhos relacionados sobre o tema. Em seguida, descreve-se o procedimento de coleta de dados de medições reais de intensidade de sinal em uma área condizente com o cenário citado, seguido de uma apresentação da parametrização do modelo desenvolvido, focando em expor como os dados foram trabalhados e combinados com a teoria do modelo log-distância para se gerar o padrão de perda de caminho para o tipo de ambiente em questão.

Por fim, apresenta-se os resultados obtidos, através de uma comparação do modelo desenvolvido com a perda no espaço livre e o modelo Okumura-Hata, considerando todos eles aplicados a diversas distâncias, submetidos a um cenário de transmissão de um sinal LoRa (frequência de 915 MHz).

4.1 INTRODUÇÃO

Os modelos de perda de caminho são amplamente estudados e contemplados pelo meio acadêmico, devido ao fato deste tema ser aplicado em diversos contextos e tipos de rede. Em relação às redes LoRa, este fato se repete, sendo possível encontrar pesquisas que tratam a implementação de diferentes modelos de perda de caminho, em diferentes tipos de ambiente e em diferentes frequências de operação.

Um dos trabalhos que tratam sobre o tema em questão é intitulado “Urban Channel Models for Smart City IoT – Networks Based on Empirical Measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz”, em que os autores apresentaram a implementação do modelo log-distância para comunicações LoRa de 433 e 868 MHz em um ambiente urbano, na cidade de Dortmund, na Alemanha. Na pesquisa, descreve-se o trabalho de campo necessário para coletar as amostras de intensidade de sinal necessárias para o desenvolvimento do modelo, além de apresentar uma comparação dos resultados obtidos com modelos de referência, dentre eles o modelo de propagação no espaço livre, Okumura-Hata, ITU-R para grandes áreas urbanas *Non-Line-of-Sight*

(NLOS), dentre outros. Como resultado, foi apresentado que os modelos de referência foram insuficientes para prever a perda de caminho esperada ao comparar com as medidas coletadas e com a aplicação do modelo log-distância. Além disso, foi evidenciado que a recepção do sinal LoRa é possível em uma cobertura de até 5,8 km, considerando um ambiente urbano e uma antena transmissora a 30 metros de altura (JORKE *et al.*, 2017).

Outras pesquisas também se propuseram a aplicar o modelo log-distância para redes LoRa em áreas urbanas. Uma delas descreve o trabalho de campo de coleta de amostras de intensidade de sinal a uma frequência de 868 MHz, realizado na cidade de Dakar, em Senegal, seguido da utilização da base de dados construída para o desenvolvimento da equação de perda de caminho do modelo em questão. Por fim, a mesma apresenta uma comparação do resultado obtido com o modelo de propagação no espaço livre, expondo uma grande diferença entre os valores de perdas estimadas (SEYE *et al.*, 2018).

Em alguns casos, são realizadas algumas adaptações em modelos de perda de caminho já existentes, ou uma junção de dois ou mais deles, para se alcançar um resultado mais fiel ao contexto de estudo ou simplesmente para tornar o método mais preciso de uma forma geral. Um exemplo pode ser encontrado na referência (CHALL; SAMER; HELOU, 2019), na qual é apresentado a implementação de um modelo de perda de caminho baseado no padrão log-distância, porém com algumas modificações originadas dos modelos ITU-R e Cost 231 – MWF para ambientes *indoor* e adições de correções relacionadas à altura da antena dos *end nodes* para ambientes *outdoor*.

Como de padrão, a pesquisa citada acima descreve o trabalho de campo realizado em detalhes, executado com o objetivo de coletar as amostras de intensidade de sinal LoRa em diferentes tipos de ambientes, sendo um deles de característica *indoor* e outros três de característica *outdoor* (rural, suburbano e urbano), todos localizados na região e nos arredores da cidade de Beirute, capital do Líbano. O trabalho também apresenta uma comparação dos resultados obtidos com inúmeros modelos de referência e, como conclusão, obteve-se que as modelagens propostas alcançaram uma melhor precisão em relação à referência, além de serem mais simples de serem utilizadas no contexto considerado.

Ao realizar o levantamento de trabalhos relacionados, foi possível observar que, para comunicações LoRa, o modelo log-distância é o que apresenta melhores

resultados, pelo fato de o mesmo gerar estimativas de perda mais precisas em relação às medições reais. Além disso, tal opção é capaz de gerar uma modelagem mais específica para um determinado contexto, se tornando menos genérico, como são as outras referências apresentadas. Também foi possível notar que, como o modelo log-distância é totalmente baseado em mensurações reais de intensidade do sinal, as equações geradas pelo mesmo variam consideravelmente para cada situação demonstrada pelas pesquisas, devido aos inúmeros fatores que envolvem o procedimento de medição, como as alturas das antenas utilizadas, a localização geográfica do ambiente considerado, frequência de transmissão, entre outros.

Com isso, para gerar dados mais condizentes com a realidade, utilizados pelo método de escolha de parâmetros de rede desenvolvido, foi proposta a implementação do modelo de perda de caminho log-distância para sinais LoRa, submetido ao contexto específico contemplado pelo presente trabalho, apresentada nas seções seguintes deste capítulo. Assim, foi possível desenvolver uma equação da perda de caminho em relação à distância que seja precisa e mais fiel a aplicações semelhantes ao contexto considerado.

4.2 COLETA DE DADOS

Para gerar o padrão de perda de caminho em áreas rurais através do modelo log-distância, primeiramente é necessário extrair medições reais da perda de caminho da transmissão do sinal considerado ou algum indicador que represente essa variável. Com isso, escolheu-se um ambiente que fosse compatível com o desejado (FIGURA 14) para realizar as medições, localizado a aproximadamente 46 km da cidade de Tupaciguara, no estado de Minas Gerais - Brasil, em uma região sem urbanização, com vegetação natural, terrenos de plantio de culturas e presença de animais típicos de criação extensiva, caracterizando assim uma área rural.

FIGURA 14 – IMAGEM DE SATÉLITE DA ÁREA ESCOLHIDA PARA A REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO



FONTE: Google Earth Pro (2021).

Com o local já escolhido, realizou-se o planejamento de execução do experimento, organizando quais seriam os pontos de medição da perda do sinal transmitido (FIGURA 15). Para se obter sucesso na aplicação do modelo em questão, é necessário escolher pontos de medição os quais possuem uma linha de visada direta entre cada par de transmissor e receptor, além de estarem relativamente distantes um do outro, sendo tal distância pelo menos maior que a distância de referência. Então, para a determinação dos pontos, utilizou-se um *software* proprietário da empresa Zeus Agrotech, capaz de fornecer a distância entre duas coordenadas e uma verificação da visada (se está obstruída ou não) entre elas, através de uma análise da altura dos dois pontos e de todo o relevo do trajeto entre os mesmos (FIGURA 16 e FIGURA 17). O mesmo utiliza o banco de dados e de imagens via satélite do serviço de pesquisa e visualização de mapas Google Maps para realizar todas as tarefas descritas.

FIGURA 15 – PONTOS DETERMINADOS PARA A REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES



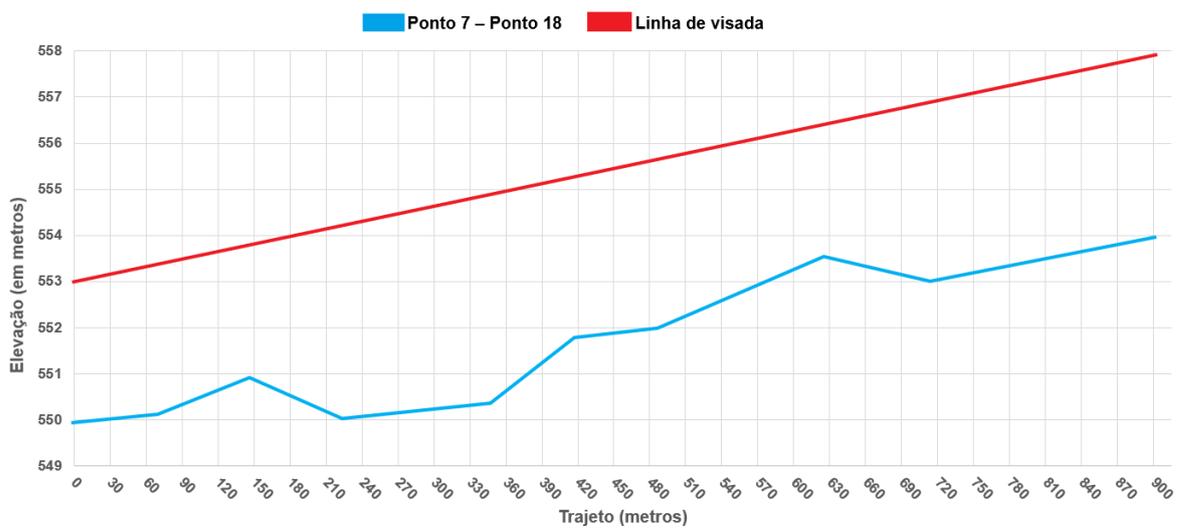
FONTE: O autor (2020).

FIGURA 16 – DISTÂNCIA DE UM ENLACE FORNECIDA PELO SOFTWARE



FONTE: O autor (2020).

FIGURA 17 – VISADA DE UM ENLACE E ALTURA DOS PONTOS FORNECIDAS PELO SOFTWARE



FONTE: O autor (2020).

Com o auxílio do *software* em questão, estabeleceu-se 30 enlaces para a realização das medições da perda do sinal, todos com linha de visada direta, cada um com uma distância diferente, sendo todas elas entre 100 e 4000 metros. Para cada um deles, realizaram-se 20 transmissões de um sinal LoRa (ora um módulo se comportando como transmissor, ora outro, cada um realizando metade do total), a uma frequência de 915 MHz, utilizando módulos do modelo LoRaMESH RD42C, da empresa Radioenge, com os seguintes parâmetros de rede: potência de transmissão de 10 dBm, SF de 7, CR de 4/5 e uma largura de banda de 500 kHz. Tal configuração de parâmetros utilizada compõe um padrão mais apropriado para a otimização da taxa de transmissão do que para o aumento da distância, escolhida propositalmente para não subestimar as perdas a serem definidas pelo modelo.

Para executar as transmissões com êxito, adaptaram-se os módulos em *cases* para garantir uma devida proteção e utilizaram-se antenas omnidirecionais de 5 dBi tanto no transmissor quanto no receptor, fixando o conjunto em mastros de 2,5 metros de altura, garantindo a linha de visada direta em todos os enlaces pré-estabelecidos (FIGURA 18).

FIGURA 18 – ADAPTAÇÃO FÍSICA DOS MÓDULOS LORA



FONTE: O autor (2021).

Para se obter a medição da perda de sinal em cada transmissão, utilizou-se um recurso do módulo em questão, capaz de extrair o indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI) de cada transmissão realizada, elemento correspondente à potência presente em um sinal recebido em dBm. Com esse valor coletado, a partir de equacionamentos (expostos na seção seguinte), é possível calcular a perda de caminho para cada execução realizada.

Além disso, aproximadamente 100 medições da potência do ruído também foram coletadas para serem utilizadas posteriormente em outras etapas do trabalho, obtendo um valor médio de -108 dBm. Então, após determinar o ruído médio e estabelecer os enlaces para as medições, as mesmas foram realizadas, obtendo um total de 600 amostras de RSSI, em diferentes distâncias e posições geográficas (TABELA 5).

TABELA 5 – VALORES MÉDIOS DE RSSI COLETADOS

Enlace (Ponto A - Ponto B)	Distância (metros)	RSSI média de 20 amostras (dBm)
2 - 1	115,03	-56,2
2 - 3	256,95	-81,4
2 - 4	679,13	-100,3
1 - 4	573,23	-85,8
1 - 3	183,08	-80
3 - 4	442,59	-89,65
4 - 7	1089,14	-96,45
4 - 18	1548,27	-88,2
4 - 8	1992,12	-102,75
4 - 19	1776,93	-95,9
4 - 9	2246,13	-87,8
5 - 9	2334,65	-97,15
5 - 19	1755,24	-93,1
5 - 8	1877,64	-94,6
5 - 18	1394,56	-91,2
5 - 7	656,12	-89,4
7 - 18	917,96	-91,1
7 - 19	1376,37	-103,35
7 - 9	2027,11	-94,25
17 - 11	550,54	-76,2
17 - 12	1109,64	-102,65
17 - 13	1276,72	-99,9
17 - 14	906,49	-99,7
17 - 16	3546,59	-96,1
12 - 16	3745,49	-105,7
12 - 15	2352,81	-101,7
12 - 14	1295,98	-104,65
12 - 10	1121,01	-111,55
12 - 11	561,04	-86,05
12 - 13	507,07	-91,9

FONTE: O autor (2021).

4.3 PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO DE PERDA DE CAMINHO

Após a obtenção dos valores de RSSI de todas as transmissões realizadas no ambiente de estudo, foi necessário calcular a perda de caminho utilizando tais medidas e a equação da referência (JORKE *et al.*, 2017), demonstrada a seguir,

$$PL[dB] = P_{TX}[dBm] - RSSI[dBm] + G_{TX}[dB] + G_{RX}[dB] \quad (22)$$

sendo PL a perda de caminho, P_{TX} a potência de transmissão, e G_{TX} e G_{RX} os ganhos da antena transmissora e receptora, respectivamente.

Outro tratamento de dados foi realizado, sendo ele a conversão da distância de cada enlace para quilômetros e normalizá-la dividindo-a pela distância de referência, determinada em 100 metros, valor este que atende todos os requisitos do modelo e respeita as condições das equações (12), (13) e (14). Por fim, fez-se a conversão da variável normalizada para a escala logarítmica.

Em seguida, utilizou-se a função *polyfit* da biblioteca Python *numpy*, capaz de realizar uma regressão linear de diferentes graus a partir de um conjunto de pontos, utilizando o método dos mínimos quadrados. Com isso, inserindo como parâmetro de entrada as distâncias normalizadas de cada enlace na escala logarítmica (coordenadas “x”), as perdas de caminho de cada transmissão realizada (coordenadas “y”) e o valor 1 (indicando o grau a ser considerado), realizou-se uma regressão linear simples de primeiro grau, gerando os coeficientes A e B de uma equação do tipo $y = A * x + B$, assumindo os valores aproximados de 2,1248 e 101,6868, respectivamente.

Ao comparar o resultado com a equação (15), padrão do modelo de perda de caminho log-distância, é possível estabelecer uma relação entre n e o coeficiente A, assim como entre $\overline{PL}(d_0)$ e o coeficiente B, fazendo com que seja possível conceber a equação (23), que representa a perda de caminho no ambiente de estudo relativa à distância, em Km.

$$\overline{PL}(d)[dB] = 101,6868 + 10 * 2,1248 * \log\left(\frac{d}{0.1}\right) \quad (23)$$

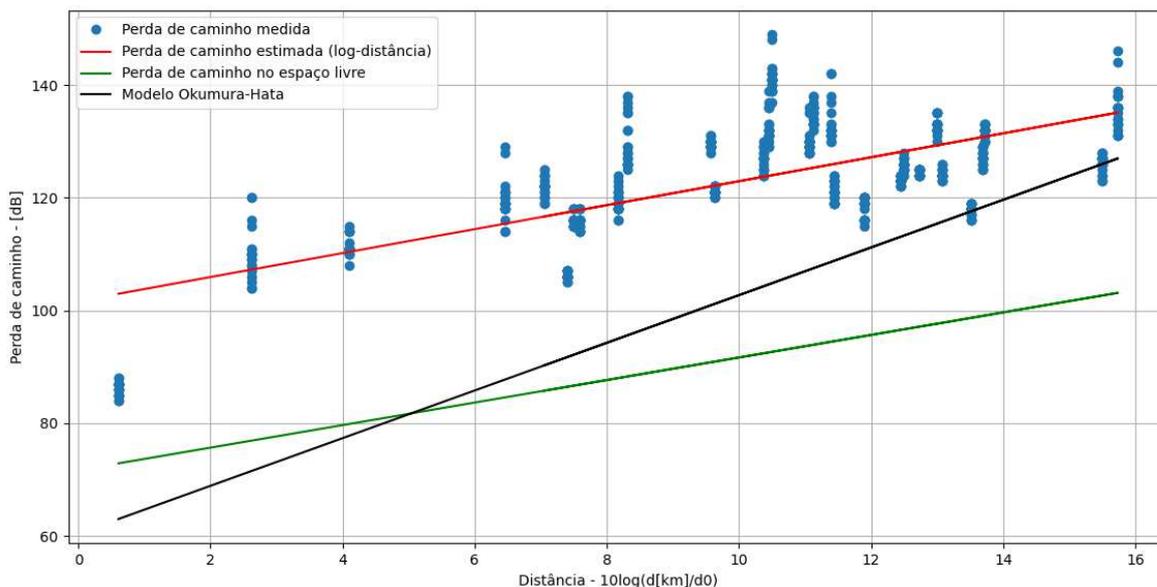
Com isso, pode-se concluir que, para ambientes que correspondem ao cenário de estudo em questão, a perda de caminho a uma distância equivalente à referência ($d_0 = 100m$) é de aproximadamente 101,68 dB e que o expoente de perda de caminho é de aproximadamente 2,12, o qual ao ser comparado com os valores da TABELA 3, assume um valor um pouco maior do que o utilizado para transmissões no espaço livre.

4.4 RESULTADO E COMPARAÇÕES COM OUTROS MODELOS

Ao finalizar a parametrização da perda de caminho para o ambiente rural de estudo através do modelo log-distância, foi possível comparar o resultado com outros já existentes (FIGURA 19), sendo eles a perda no espaço livre e o modelo Okumura-Hata. Em relação ao modelo desenvolvido, utilizou-se a representação gráfica da equação (15) considerando $n = 2,12$ e $\overline{PL}(d_0) = 101,68$ com uma precisão de 16 e 14 casas decimais respectivamente, sendo esses valores apresentados apenas uma aproximação. Para a perda no espaço livre, utilizou-se a equação (10) aplicada às distâncias dos enlaces analisados, porém sem considerar os termos de ganho das antenas $10 \log(G_T)$ e $10 \log(G_R)$, para avaliar apenas a perda intrínseca ao sinal, sem considerar condições específicas. Por fim, para o modelo Okumura-Hata, aplicou-se a equação (21) adequando os seus parâmetros de acordo com a TABELA 4 considerando um ambiente rural, também aplicada às mesmas distâncias do caso anterior.

É importante ressaltar que o modelo Okumura-Hata não é totalmente adequado para ser aplicado ao cenário de estudo, uma vez que o mesmo só é compatível com situações nas quais a distância varia de 1 km até 100 km e a altura da antena de transmissão varia de 30 até 200 metros e que, como realizado no experimento, a comunicação LoRa *Mesh* geralmente é utilizada em aplicações com distâncias menores que 1 km e com antenas localizadas entre dois e 10 metros. A inclusão desta referência foi feita apenas para avaliar como modelos não adequados para o tipo de comunicação em questão se comportam e se o resultado gerado é totalmente inválido ou não.

FIGURA 19 – COMPARAÇÃO DOS MODELOS DE PERDA DISTÂNCIA APLICADOS AO AMBIENTE RURAL DE ESTUDO



FONTE: O autor (2021).

Ao observar o resultado apresentado na FIGURA 19, percebe-se que tanto o modelo de perda no espaço livre quanto o modelo Okumura-Hata apresentaram valores de perda menores em relação às medidas realizadas em campo, para todas as distâncias consideradas. Com isso, observa-se que nenhum dos dois foi capaz de estimar a perda para transmissões de sinais de uma rede LoRa *Mesh* em um ambiente rural de uma forma aceitável. De forma oposta, o modelo desenvolvido se apresentou bem mais alinhado com o resultado prático, pelo fato deste utilizar as próprias medidas para ser elaborado. Com isso, confirma-se ainda mais a necessidade de seu desenvolvimento.

Uma análise mais detalhada da diferença de valores foi realizada, calculando as perdas de caminho para todas as 600 amostras coletadas utilizando os três modelos considerados e calculando a média da diferença relativa entre as mesmas, utilizando o modelo desenvolvido como referência (TABELA 6). Foi possível observar que a estimativa de Okumura-Hata apresentou uma diferença menor em relação à referência, porém ainda considerável (maior que 15%).

TABELA 6 – DIFERENÇA DE VALORES DE PERDA DE CAMINHO OBTIDOS UTILIZANDO MODELOS DIFERENTES

Modelos comparados	Diferença relativa média
Log distância e espaço livre	25.48%
Log-distância e Okumura-Hata	16.68%

FONTE: O autor (2021).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a aplicação do modelo de perda de caminho log-distância para transmissões de sinais LoRa em um ambiente tipicamente rural, sem urbanização, com vegetação natural, terrenos de plantio de culturas e presença de animais típicos de criação extensiva. Como passo inicial, realizou-se uma exposição de estudos relacionados acerca do tema, a fim de identificar quais são as modelagens de atenuação de sinal mais utilizadas para transmissões LoRa. Com este estudo, identificou-se que, para tal contexto, o modelo log-distância é a opção que geralmente apresenta melhores resultados.

Em seguida, o trabalho de campo realizado para coletar os dados necessários para a aplicação do modelo foi apresentado, através de uma descrição do processo de escolha das localizações para realizar as medições de intensidade de sinal, dos equipamentos utilizados e de todas as etapas realizadas para a execução do mesmo. Além disso, os resultados obtidos das medições de RSSI média de cada enlace também foram expostos.

A seguir, foi evidenciado como foi realizada a manipulação dos dados práticos obtidos para se adequarem às equações gerais do modelo log-distância. Ademais, após obter a relação de dados de atenuação de sinal e distância, aplicou-se o método teórico para a obtenção da equação de estimativa de perda de caminho em relação à distância de transmissão, considerando o ambiente rural em questão.

Por fim, uma comparação da modelagem aplicada com os modelos de propagação no espaço livre e Okumura-Hata foi estabelecida, evidenciando uma grande diferença entre as duas referências e o modelo prático, sendo este o que mais se aproximou das medidas reais obtidas.

Com a parametrização e a obtenção de uma modelagem da perda de caminho mais fiel ao cenário de estudo, é possível estimar a perda de caminho com uma maior confiabilidade, para ser utilizada no método de escolha de parâmetros LoRa. Agora, a dissertação prossegue com o próximo capítulo, a fim de expor uma apresentação teórica sobre algoritmos genéticos, técnica na qual tal método foi baseado. O foco do capítulo será nas principais operações e métodos de seleção utilizados em um AG.

5 ALGORITMOS GENÉTICOS

A proposta deste capítulo é apresentar a teoria de algoritmos genéticos, focando principalmente no seu funcionamento através da explicação de um passo-a-passo da aplicação de um AG básico.

Além disso, apresenta-se com mais detalhes os métodos de seleção e os operadores utilizados no desenvolvimento do método de otimização proposto no presente trabalho, sendo estes o método de seleção da roleta e de torneio, além das operações de cruzamento, mutação e elitismo. Para cada elemento citado, faz-se uma breve apresentação teórica, seguida de uma explanação sobre o seu funcionamento.

5.1 INTRODUÇÃO

Um dos ramos mais conhecidos da computação evolutiva são os algoritmos genéticos, definidos como algoritmos de otimização global, inspirados nos processos de seleção natural e na genética. Eles operam a partir de um procedimento estruturado, mas aleatório, que possui como foco a busca de pontos de alta aptidão, ou seja, pontos nos quais a função de interesse assume valores relativamente baixos (ou altos, dependendo da aplicação).

Mesmo com um caráter aleatório, algoritmos genéticos possuem direcionamento, uma vez que os mesmos utilizam dados históricos para encontrar novos pontos de busca que tendem a possuir uma aptidão maior. Isto é feito através de processos iterativos, sendo que cada iteração é chamada de geração. A cada geração, os princípios baseados na seleção natural e genética são aplicados a uma população de pontos, denominados indivíduos ou cromossomos. As técnicas aplicadas podem variar, pelo fato de existirem diversos métodos e técnicas de AG já criadas e estudadas, cada uma com focos e características diferentes.

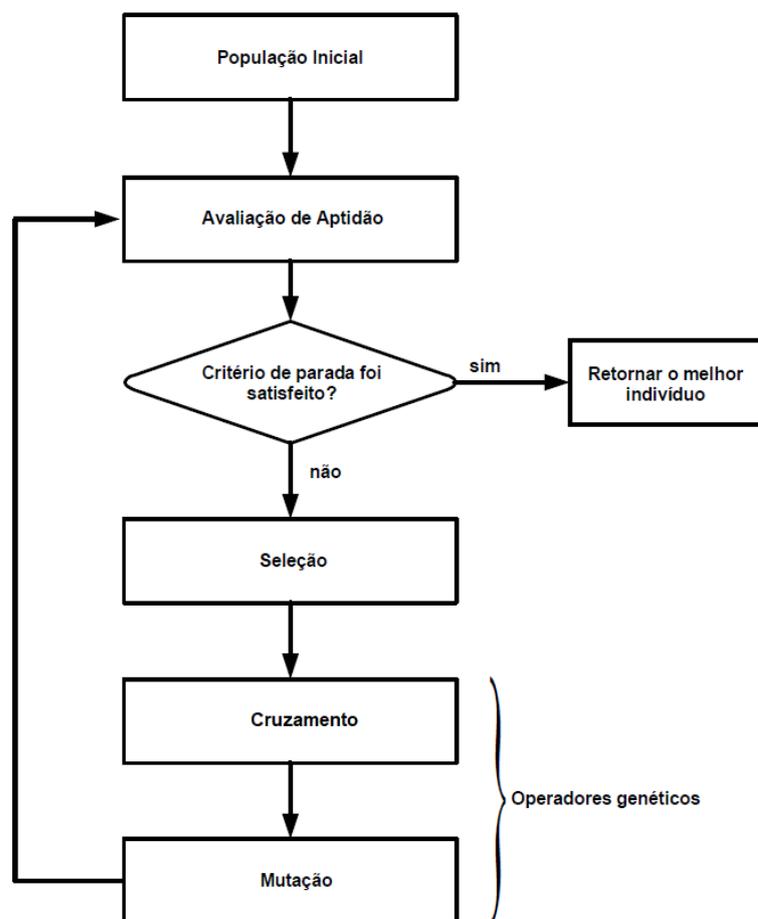
A aplicação do AG básico segue um determinado padrão (FIGURA 20). Primeiramente, é feita uma seleção, com a intenção de determinar quais indivíduos são mais aptos a passar pelo processo de reprodução. Tais indivíduos são escolhidos baseados no seu grau de adaptação relativa. Espera-se que, ao longo das gerações, o conjunto inicial de indivíduos gere candidatos cada vez mais aptos. Um bom método de seleção geralmente escolhe indivíduos com maiores aptidões, porém mesmo assim mantém a diversidade da população. Um método de seleção muito utilizado é

o método da roleta, no qual candidatos são escolhidos para fazer parte da próxima geração por meio de um sorteio de roleta. Outro método conhecido para este fim é o torneio, baseado em realizar “competições” entre um grupo aleatório composto por um determinado número de indivíduos, sendo que o mais apto deles é escolhido.

Após a seleção, alguns operadores são aplicados à população, com o intuito de gerar interações entre os seus indivíduos, fazendo com que os mesmos alterem suas características, podendo causar modificações pequenas ou até quase completas de si mesmos. Os dois operadores mais comuns aplicados em técnicas de AG são o cruzamento e a mutação. O primeiro deles consiste em realizar uma troca de parte de características, denominadas genes, entre o cromossomo selecionado e outro da população em questão. Já o operador de mutação se baseia em alterar um gene de um indivíduo por outro qualquer de forma aleatória.

Depois de todos os operadores serem aplicados, uma nova população terá sido formada e o contador de gerações é acrescido de um. Todos os procedimentos descritos acima são repetidos inúmeras vezes até que um número pré-determinado de gerações seja alcançado ou que algum critério de convergência seja alcançado (COLEY, 1999).

FIGURA 20 – ESTRUTURA BÁSICA DE UM ALGORITMO GENÉTICO



FONTE: Adaptado de Zini, Neto e Garbelini (2014).

5.2 MÉTODOS DE SELEÇÃO

Como já dito anteriormente, após verificar que o critério do algoritmo genético não foi satisfeito, a população de cromossomos passa por um método de seleção, a fim de definir quais deles são mais aptos a seguir para a próxima geração. Para isso, o método de seleção se baseia em técnicas de caráter aleatório, porém considerando as características do indivíduo em questão. Os métodos de seleção considerados para a construção do AG aplicado ao método de otimização desenvolvido são o método da roleta e a seleção por torneio.

5.2.1 Método da roleta

Um dos métodos de seleção mais difundidos e utilizados é o método da roleta. Tal alternativa é baseada em escolher os indivíduos que avançarão para os próximos

passos do algoritmo através de uma simulação de uma roleta, na qual os indivíduos com uma maior aptidão possuirão uma porção maior que os representarão neste processo. Com isso, o ato simulado de “girar a roleta” é executado n vezes, sendo n o tamanho da população inicial, escolhendo cada vez um cromossomo para compor o novo grupo de indivíduos.

Neste método, a aptidão do indivíduo de avançar no processo evolutivo a cada geração é representado pela *fitness*. Tal variável representa o elemento a ser otimizado pelo AG implementado, sendo que cada cromossomo está relacionado a um *fitness* próprio. Desta forma, o indivíduo é considerado mais apto que o outro quando o seu *fitness* está mais próximo do valor ótimo do que o *fitness* do seu concorrente. Este valor é encontrado através da função de aptidão, utilizada para calcular o *fitness* de cada cromossomo da população.

Para realizar as seleções através do método da roleta, primeiramente calcula-se a soma das *fitness* de todos os indivíduos da geração atual, considerada a *fitness* total da população (TOMASSINI, 1995).

$$soma_fitness = \sum_{i=1}^{tamanho\ pop} fitness_i \quad (24)$$

Em seguida, calcula-se a contribuição da *fitness* de cada cromossomo (p_i) relativa à *fitness* total da população, representando a probabilidade de cada indivíduo, ou seja, a porção absoluta que cada um deles possuirá na roleta (TOMASSINI, 1995).

$$p_i = \frac{fitness_i}{soma_fitness} \quad (25)$$

Então, calcula-se uma probabilidade cumulativa (c_i) para cada indivíduo através de uma soma recursiva das contribuições p_i anteriormente obtidas (TOMASSINI, 1995).

$$c_i = \sum_{k=1}^i p_k, \quad i = 1, 2, \dots, tamanho\ pop \quad (26)$$

Por fim, gera-se um número aleatório uniformemente distribuído no intervalo de 0 a 1. O intervalo entre c_{i-1} e c_i (com c_i incluso) em que tal número se encontrar representará qual indivíduo foi selecionado pelo método em questão, sendo que, caso o número aleatório for menor que c_1 , o primeiro indivíduo é escolhido. Como já dito anteriormente, este processo é repetido n vezes, sendo n o tamanho da população inicial, para assim formar uma população nova, criada de uma forma aleatória, porém obedecendo uma proporção de cada indivíduo relativa ao grau de aptidão de cada um deles.

5.2.2 Seleção por torneio

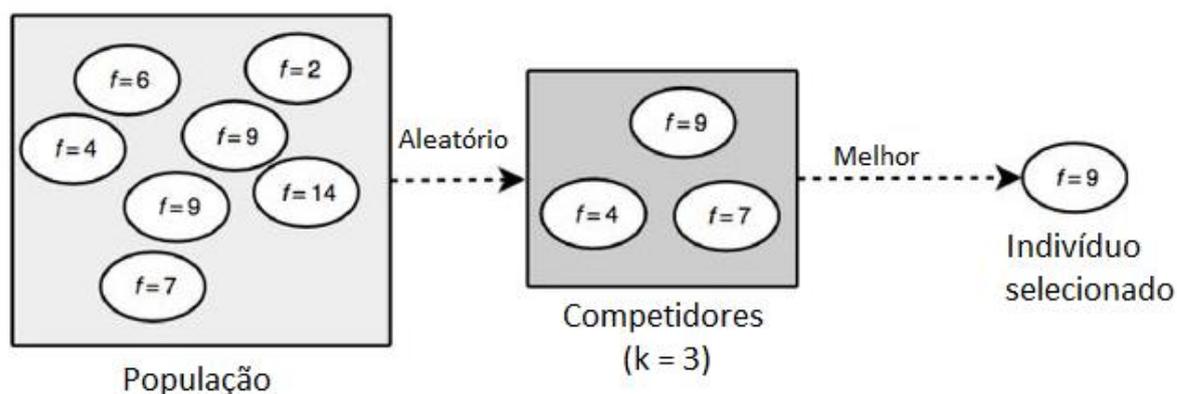
A utilização do método da roleta pode causar alguns problemas indesejáveis para o processo de evolução de um algoritmo genético. Um deles é que, com o passar das iterações, cada vez mais os indivíduos mais aptos vão se repetindo na população e, com isso, a diferença entre os valores de *fitness* dos mesmos se tornam cada vez menores (TOMASSINI, 1995). Devido a este fenômeno, métodos de seleção proporcionais à aptidão, como o caso da opção citada, se tornam ineficazes, uma vez que os indivíduos tenderão a possuir uma porção quase idêntica na roleta, deixando o processo cada vez mais aleatório, não priorizando com eficácia os melhores cromossomos.

Outro possível problema gerado pela utilização do método da roleta é a presença de “super indivíduos”. Estes elementos destoantes possuem valores de *fitness* muito otimizados e incomuns. Inicialmente, tais indivíduos podem se mostrar como ótimos candidatos para prosseguirem para as próximas gerações. Porém, os mesmos podem se revelar apenas como cromossomos com uma aptidão que representa um ponto ótimo local, e não o valor de interesse do algoritmo, ou seja, o ponto mais otimizado possível, denominado ponto ótimo global. A aparição deste tipo de candidato em iterações iniciais de processos baseados no método da roleta pode causar uma geração excessiva de cópias do mesmo para as gerações futuras, uma vez que este baseia a sua escolha proporcionalmente ao *fitness* dos cromossomos. Sendo assim, o algoritmo genético em questão rapidamente convergiria para os pontos ótimos locais, e não para os globais.

Ao utilizar outros métodos de seleção que não relacionam a escolha do indivíduo com a sua respectiva *fitness*, por exemplo a seleção por torneio, torna-se

possível mitigar estes dois efeitos indesejados citados. Como apresentado na FIGURA 21, essa técnica se baseia em selecionar um determinado número k de cromossomos da população atual de forma aleatória, uniformemente distribuída, e então escolher o mais apto entre eles para prosseguir (ou também realizar tal escolha de forma aleatória), repetindo tal processo n vezes, sendo n o tamanho da população inicial.

FIGURA 21 – SELEÇÃO POR TORNEIO



FONTE: Adaptado de Population (2021).

Uma das variáveis que a seleção por torneio é capaz de controlar de uma forma mais eficiente do que o método da roleta é o favorecimento aos indivíduos mais aptos, denominada pressão de seleção. Esta característica pode ser definida como o grau indicativo de beneficiamento dado aos indivíduos com maior grau de aptidão, sendo facilmente ajustada na seleção por torneio pela quantidade k de cromossomos escolhidos para a pré-seleção (MILLER; GOLDBERG, 1995). A relação é diretamente proporcional: quanto maior o valor de k , maior será a pressão de seleção.

A pressão de seleção está diretamente relacionada à velocidade de conversão, sendo que, para situações em que tal parâmetro assume valores muito baixos, a taxa de convergência será muito lenta. Já em situações caracterizadas por valores de pressão de seleção excessivamente grandes, as chances de o algoritmo genético convergir para um ponto ótimo local aumentarão.

5.3 OPERAÇÕES

Após o processo de seleção de um AG, os indivíduos escolhidos passam por operadores genéticos, responsáveis por causar variações nos cromossomos em questão, sendo elas pequenas ou muito consideráveis. A aplicação destes operadores possui a função de intensificar a variedade dos candidatos do processo, para assim aumentar a chance de encontrar o indivíduo que alcance o nível de aptidão ótimo desejado. Tais ferramentas devem ser aplicadas a taxas corretas, encontradas normalmente com testes práticos, uma vez que, a utilização das mesmas em excesso pode causar um aumento na variabilidade tão grande a qual impossibilite a convergência do algoritmo para a otimização.

Alguns operadores genéticos podem ser relacionados aos fenômenos contemplados pelo processo evolutivo, como o operador de cruzamento, que possui semelhanças com a reprodução entre dois seres da mesma espécie, ou o operador de mutação, podendo ser relacionado com a alteração do material genético de um ser vivo. Outros possuem a sua teoria e funcionamento baseados em características de relações humanas, como é o caso do operador de elitismo.

5.3.1 Cruzamento

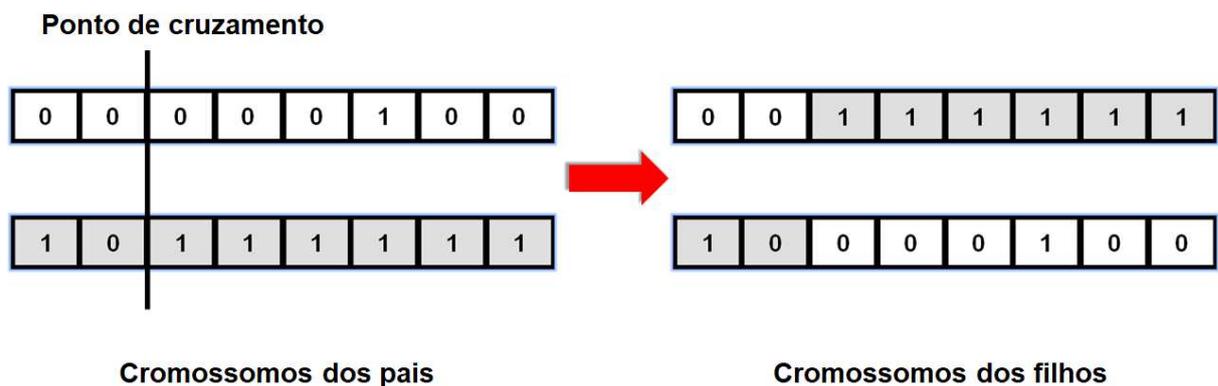
Como citado anteriormente, o operador genético de cruzamento pode ser comparado com o fenômeno biológico da reprodução, baseado na geração de um novo ser vivo a partir de dois outros, herdeiro de características genéticas de ambos os progenitores. Na teoria de algoritmos genéticos, dois indivíduos da geração atual trocam características intrínsecas a cada um deles, denominadas genes, dando origem a novos cromossomos compostos de genes de ambos os herdeiros. Essas características podem ser representadas por inúmeras formas, por exemplo *bits* de uma sequência, um número inteiro de um vetor, um par de coordenadas de um conjunto delas, entre outras.

A forma original deste operador é o cruzamento de ponto único, a qual se baseia em realizar uma troca de uma determinada cadeia de genes entre dois indivíduos da população, iniciada a partir de um determinado ponto do conjunto que compõe cada cromossomo (FIGURA 22). A sua aplicação se inicia com a definição do valor da probabilidade de cruzamento p_c , variável responsável por condicionar a

ocorrência da aplicação do cruzamento, podendo assumir um valor entre 0 e 1. Geralmente, o valor típico escolhido para p_c varia entre 0,4 e 0,9, sendo que, para se aplicar o cruzamento na metade dos cromossomos que compõe a população (em média), utiliza-se o valor de 0,5 (COLEY, 1999).

Em seguida, é realizada a escolha de dois indivíduos originais da população da geração atual e, após isso, gera-se um número aleatório entre 0 e 1. Caso tal número for menor ou igual ao valor de p_c anteriormente definido, aplica-se o operador em questão, realizando a troca da cadeia de genes iniciada de um determinado ponto da sequência que compõe os dois indivíduos. Com isso, dois novos cromossomos filhos são criados, substituindo ambos os pais na população. Já se o número aleatório gerado for maior que p_c , o cruzamento de ponto único não é aplicado e os dois indivíduos previamente selecionados são mantidos, avançando no processo evolutivo.

FIGURA 22 – CRUZAMENTO DE PONTO ÚNICO



FONTE: Adaptado de Kaya, Uyar e Tekin (2011).

Além da técnica de ponto único, existem outras variações do operador de cruzamento as quais podem ser utilizadas. Uma delas é a variação multiponto, em que se determina mais de um ponto de corte para se definir a cadeia de genes a ser trocada entre os indivíduos pais, sendo a opção mais comum a escolha de dois pontos.

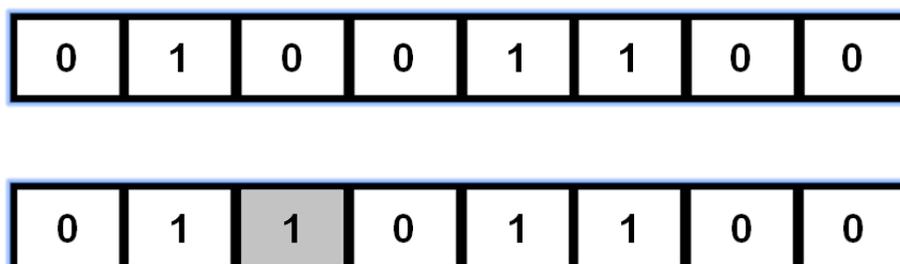
5.3.2 Mutação

O operador genético de mutação é baseado em realizar pequenas alterações em um indivíduo, a partir de trocas de valores de alguns genes de sua cadeia por

algum outro aleatório das opções possíveis. A realização ou não da troca desse valor está associada a uma taxa de mutação p_m , a qual geralmente assume valores muito pequenos (0,001, por exemplo). Há alguns padrões que podem ser seguidos para determinar este valor, por exemplo utilizar $p_m = 1 / L$ ou $p_m = 1 / (N\sqrt{L})$, sendo N o tamanho da população e L a quantidade de genes por indivíduo (COLEY, 1999). O papel deste operador é propagar pequenas aleatoriedades no processo de evolução do algoritmo genético, então por isso a taxa aplicada ao mesmo deve assumir um valor pequeno. Caso o contrário, há chances do resultado se tornar aleatório o suficiente para impedir a convergência para a otimização.

O modo mais comum de se aplicar a mutação é considerá-la para cada gene de cada cromossomo, gerando um número aleatório entre 0 e 1 em cada evento. Então, caso este número possuir o valor menor ou igual a p_m , o operador é aplicado especificamente no gene em questão, alterando o seu valor para outro aleatório, ou para o único outro possível, como em ocasiões em que o gene é binário, ou seja, só possui duas opções para assumir (0 e 1, por exemplo), cenário este representado pela FIGURA 23.

FIGURA 23 – MUTAÇÃO EM UM GENE BINÁRIO



FONTE: Adaptado de Ikeda (2009).

Uma das contribuições que a aplicação desse operador pode gerar é a diminuição das chances de convergência do AG para um ponto ótimo local. Existem situações em que os outros recursos do algoritmo podem induzi-lo a considerar um ponto com uma melhor aptidão como um falso ponto ótimo global. Porém, com a aplicação da mutação, é possível que as pequenas aleatoriedades geradas em algum indivíduo façam com que o mesmo receba características do verdadeiro ponto de ótimo global, fazendo com que o algoritmo passe a priorizá-lo ao invés dos outros candidatos.

5.3.3 Elitismo

O operador genético de elitismo consiste em conservar os melhores indivíduos para as novas gerações do processo evolutivo do algoritmo genético, função esta que os outros recursos anteriormente citados, sendo eles operadores ou métodos de seleção, não são capazes de garantir sempre. Ao assegurar que os cromossomos com os maiores *fitness* avancem, o algoritmo tende a convergir mais rapidamente para a otimização desejada.

Para manter a integridade dos melhores indivíduos, o operador de elitismo é executado anteriormente ao cruzamento e à mutação, fazendo com que os mesmos prossigam para a próxima geração sem nenhuma alteração em seus genes e que não sejam substituídos.

A quantidade de indivíduos priorizados pelo elitismo pode ser variada, determinada por um índice k . Por exemplo, caso k assumir o valor 2, os dois cromossomos com os melhores *fitness*, ou seja, os mais aptos, serão separados e direcionados para a nova população que avançará para a próxima iteração do processo evolutivo, não sendo submetidos aos operadores de cruzamento e mutação. É importante observar que k não pode assumir um valor muito grande, uma vez que, caso muitos indivíduos tiverem garantia para a próxima geração, a ação do operador em questão perde o caráter de prioridade aos mais aptos, tornando-se um recurso mais generalista do que elitista, além de aumentar a probabilidade de o algoritmo convergir para um ponto ótimo local.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse capítulo realizou uma exposição teórica sobre a técnica de algoritmos genéticos, a fim de embasar a utilização da mesma para o desenvolvimento do método de escolha de parâmetros LoRa. Inicialmente, apresentou-se uma introdução sobre o tema, explicando o funcionamento básico de um algoritmo genético, expondo suas principais características e suas aplicabilidades.

Em seguida, apresentou-se os dois principais métodos de seleção utilizados pelos algoritmos genéticos, sendo eles o método da roleta e a seleção por torneio. Para cada um deles, explicou-se o seu funcionamento através da definição da função

de cada uma de suas variáveis e da realização de um passo-a-passo de como é feita a sua aplicação. Além disso, comentou-se sobre o contexto em que os mesmos são geralmente aplicados, indicando suas vantagens e desvantagens nestas situações.

Por fim, uma explanação sobre os três operadores mais básicos de um AG foi realizada, sendo eles o cruzamento, a mutação e o elitismo. O funcionamento de cada um deles também foi apresentado em detalhes, além de uma instrução de como definir os valores de suas variáveis para se obter um bom resultado de otimização.

Após a definição desses pontos, o trabalho prossegue com o próximo capítulo, apresentando o desenvolvimento do método de escolha de parâmetros LoRa baseado em AG, expondo desde a justificativa e embasamento para a criação deste, até a explicação do funcionamento de seu algoritmo.

6 MÉTODO DE SELEÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO DE UMA REDE LORA MESH DE GATEWAY SINGLE CHANNEL EM AMBIENTES RURAIS

A proposta deste capítulo é apresentar o método de escolha de parâmetros LoRa desenvolvido, o qual tem como foco redes *mesh* de *gateway single channel* situadas em ambientes rurais. Inicialmente, realizou-se uma revisão da literatura sobre o tema em questão, seguida da apresentação da parametrização e modelagem do método desenvolvido, focando em expor e detalhar os principais parâmetros do cenário de transmissão considerado, sendo eles a estrutura da rede, a quantidade e o tamanho dos pacotes enviados e o consumo energético dos transmissores.

Em seguida, explica-se como a avaliação de desempenho do método em questão foi realizada, através da explanação de duas técnicas de referência desenvolvidas, sendo elas a seleção aleatória e a seleção aleatória repetida.

Por fim, faz-se uma apresentação do algoritmo elaborado, responsável por realizar a operação do método desenvolvido, detalhando todas as suas etapas, além de expor ou referenciar o embasamento teórico de cada uma delas.

6.1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de encontrar candidatos para comparar os resultados gerados ao utilizar a metodologia desenvolvida, realizou-se uma pesquisa sobre os principais métodos utilizados para a definição de parâmetros de rede LoRa. Como resultado, foi possível notar que, para aplicações baseadas em protocolo *mesh* e utilização de um *gateway single channel*, não há uma proposta que seja capaz de otimizar a escolha de todos os parâmetros de configuração (*spreading factor*, taxa de código, largura de banda e potência de transmissão) dos dispositivos atuantes neste tipo de cenário.

A maioria dos métodos existentes que possuem o propósito de escolha de parâmetros LoRa são focados em aplicações de redes baseadas no protocolo LoRAWAN, as quais operam utilizando a topologia do tipo estrela e *gateway multi-channel*. Dentre eles, o mais difundido é o algoritmo ADR, encontrado em diferentes variações, porém sendo a principal delas oferecida pela Semtech, na referência disponibilizada pela própria empresa (SEMTECH LORAWAN, 2016).

O algoritmo citado foi projetado para dispositivos LoRa estáticos operando na banda de 868 MHz e é implementado no *gateway* da rede, um equipamento mais

robusto e de característica *multi channel*. Além disso, o mesmo limita a escolha da configuração a ser utilizada por cada *end node* a apenas seis opções (TABELA 7), todas elas utilizando uma largura de banda de 125 KHz e não especificando a taxa de código.

TABELA 7 – TAXAS DE TRANSMISSÃO UTILIZADAS PELO ALGORITMO ADR

Taxa de transmissão	Configuração	SNR necessária
D0	SF 12, BW 125 kHz	-20
D1	SF 11, BW 125 kHz	-17.5
D2	SF 10, BW 125 kHz	-15
D3	SF 9, BW 125 kHz	-12.5
D4	SF 8, BW 125 kHz	-10
D5	SF 7, BW 125 kHz	-7.5

FONTE: O autor (2021).

Nessa principal variação do algoritmo ADR, a escolha dos parâmetros utilizados pelos nós da rede é feita baseada nos últimos 20 envios *uplink* de cada um deles, mais especificamente nas medições de SNR apresentadas em cada transmissão. Com isso, através da equação (27), calcula-se a margem SNR (SNR_{margin}) através da subtração entre a SNR máxima obtida dentre os últimos 20 envios *uplink* citados (SNR_m), a SNR necessária para demodular um sinal em função da taxa de transmissão utilizada pelo nó ($SNR(DR)$, valor retirado da TABELA 7) e a margem aceita pela rede ($margin_db$), a qual geralmente assume o valor de 10 dB (SEMTECH LORAWAN, 2016).

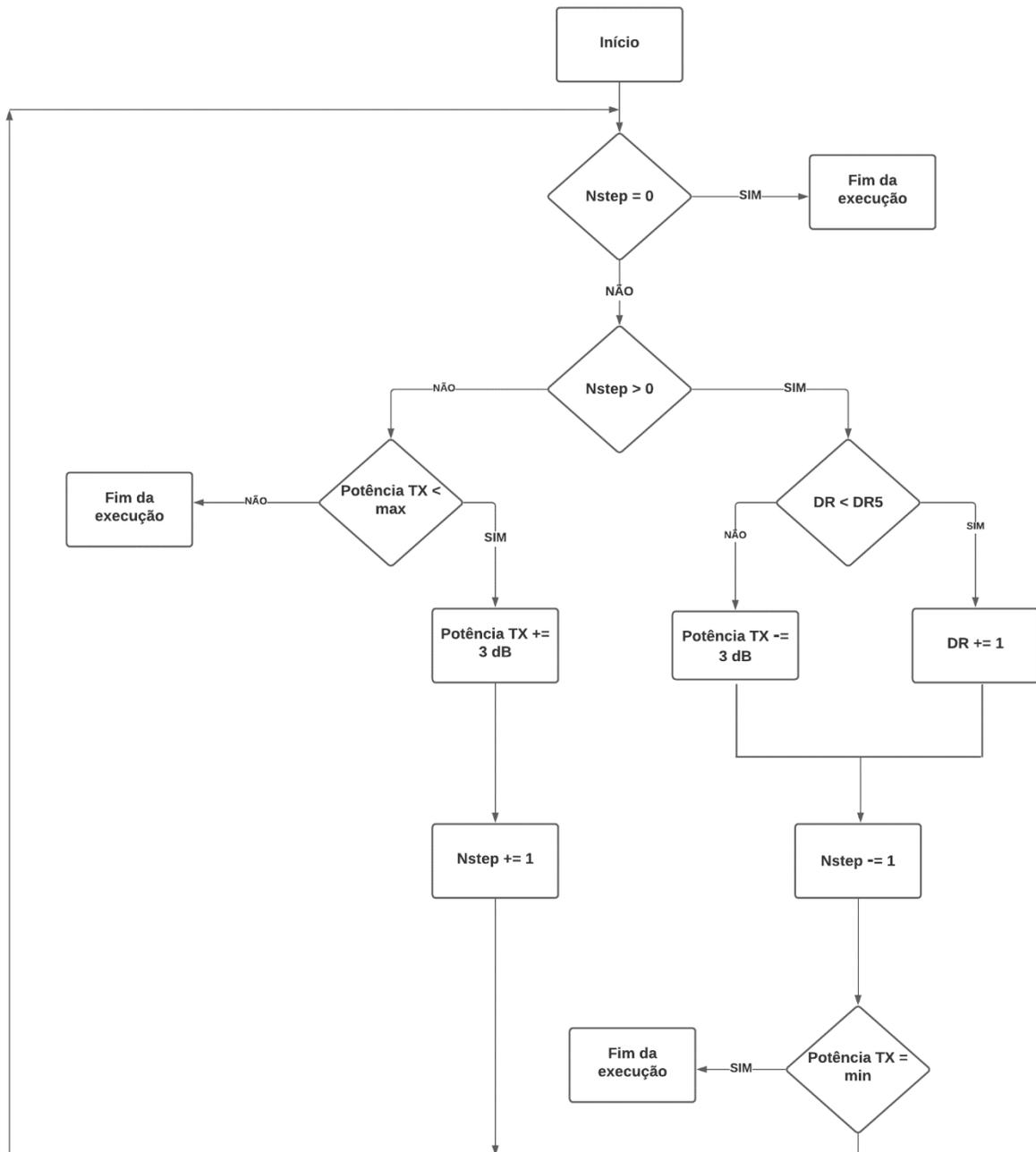
$$SNR_{margin} = SNR_m - SNR(DR) - margin_db \quad (27)$$

Posteriormente, com o valor da margem SNR, calcula-se a variável $NStep$ através da equação (28), que corresponde ao número de vezes em que o algoritmo é executado. O valor da mesma é sempre arredondado para baixo e sempre corresponde a um número inteiro, negativo ou positivo (GARG, 2019).

$$NStep = \text{inteiro}\left(\frac{SNR_{margin}}{3}\right) \quad (28)$$

Por fim, o ciclo de operação do algoritmo (FIGURA 24) é iniciado, sendo este baseado em alterar a configuração e a potência de transmissão utilizadas pelo *end node*, de acordo com as suas condições iniciais e com o valor de *NStep*.

FIGURA 24 – CICLO DE OPERAÇÃO DO ALGORITMO ADR



FONTE: Adaptado de Semtech LoRaWAN (2016).

Além do algoritmo ADR, outros métodos de escolha de parâmetros para redes LoRaWAN foram desenvolvidos pelo meio acadêmico, através de trabalhos e pesquisas. Dois exemplos são os métodos apresentados na referência (CUOMO *et al.*, 2017), denominados EXPLoRa-SF e EXPLoRa-AT, baseados em distribuir os *spreading factors* para todos os nós da rede que estão na área de cobertura do *gateway* de uma forma balanceada, sendo que o primeiro citado utiliza como base principalmente os valores de RSSI medidos e o segundo embasa a distribuição desse parâmetro no *time on air* das transmissões recebidas. No trabalho em questão, os autores evidenciam, através de simulações, que os dois métodos desenvolvidos apresentam uma alocação do *spreading factor* entre os nós da rede mais eficiente do que ao utilizar o algoritmo ADR, os quais otimizam a vazão e a taxa de extração de dados (DER) realizada pelo concentrador.

Em outros casos, foram utilizados recursos da computação evolutiva, mais especificamente as técnicas de algoritmos genéticos, para realizar a escolha dos parâmetros de transmissão de uma rede LoRaWAN. Através do trabalho “Performance optimization of LoRa nodes for the future smart city/industry”, os autores apresentaram um método de otimização da vazão de uma rede LoRaWAN de 500 *end nodes* através de uma seleção otimizada de três parâmetros destes dispositivos (*spreading factor*, taxa de código e potência de transmissão). Tal procedimento foi realizado através de uma simulação computacional, na qual se considerou os *end nodes* a uma distância de 500 metros até sete quilômetros do *gateway multi channel*, em um ambiente genérico, aonde não foi considerado a perda de caminho. Como resultado, o método proposto proporcionou um aumento da vazão média dos *end nodes* de aproximadamente 30% quando comparado com a técnica ADR (SANDOVAL; SANCHEZ; HARO, 2019).

Em relação às redes LoRa *Mesh*, baseadas na topologia do tipo malha e que operam comumente com um *gateway single channel* (fazendo com que geralmente todos os dispositivos operem com o mesmo *spreading factor* e largura de banda), após a realização da pesquisa não se encontrou métodos capazes de definir os parâmetros de transmissão de uma forma eficaz. A maiorias das contribuições acadêmicas relativas a esse tipo de rede tem como foco o desenvolvimento de protocolos de roteamento que otimizem a operação do sistema de transmissões de dados dos *end nodes*, e não quais configurações utilizar em cada um deles.

Um exemplo é o trabalho “LoRa for the Internet of Things”, em que os autores apresentaram um protocolo de roteamento baseado em sincronização no domínio do tempo entre *end nodes* e envio de *beacons* entre os dispositivos da rede, denominado “LoRaBlink”. Como resultado, foi apresentado através de experimentos práticos que a rede LoRa *Mesh* em questão considerada conseguiu garantir em média a entrega de 80% dos pacotes de todos os seus nós ao utilizar o protocolo desenvolvido (BOR; VIDLER; ROEDIG, 2016). Outra pesquisa (LIAO *et al.*, 2017) se propôs a desenvolver um protocolo de roteamento baseado em inserções de tempos de espera em retransmissões. Como conclusão, a proposta apresentou um aumento na taxa de recepção de pacote (PRR) comparado a um protocolo mais simples baseado em *concurrent transmission* (CT).

Alguns protocolos desenvolvidos têm como proposta alterações mais significativas, prevendo mudanças em conceitos básicos na operação da rede LoRa *Mesh*. Um exemplo pode ser encontrado na referência (KIM; LEE; JEON, 2020), na qual é apresentado o desenvolvimento de um algoritmo aplicado aos repetidores da rede, que permite os mesmos receberem sinais configurados em diferentes *spreading factors*, alterando tal configuração de acordo com o *end node* que necessita realizar uma transmissão. Tal esquema denominado “Adaptive Spreading Factor Selection” (ASFS) permite os dispositivos da rede *mesh* serem configurados de uma forma mais flexível, possibilitando que cada um deles seja capaz de operar com o *spreading factor* mais adequado a sua respectiva necessidade, alterando o funcionamento padrão de como geralmente a maioria das aplicações deste tipo operam. Neste trabalho, para a realização de experimentos práticos, configurou-se os *end nodes* com o SF assumindo o valor mínimo que permitisse a comunicação com o repetidor.

Após a realização da pesquisa apresentada, observou-se que não foi encontrado um método de escolha de parâmetros de transmissão de redes LoRa *Mesh* de *gateway single channel*, tampouco um método que considerasse um ambiente rural. Com isso, foi feita uma análise do cenário em questão, para assim propor uma alternativa capaz de cumprir tal objetivo.

Como conclusão desta análise, notou-se que o processo de escolha de dois conjuntos de parâmetros LoRa pode ser definido como um problema de otimização de 3732624 combinações possíveis. Então, para a sua solução, foi proposto o desenvolvimento de um método baseado nas técnicas de algoritmos genéticos,

técnicas essas capazes de solucionarem problemas clássicos de otimização de grau de complexidade NP-difícil (PANCHAL *et al.*, 2015).

Além disso, devido à ausência de referências, desenvolveu-se mais dois métodos de escolha de parâmetros para dispositivos LoRa, detalhados na Seção 6.3. Os mesmos foram elaborados para serem utilizados como comparação relativa a tempo de processamento e otimização de taxa de transmissão, quando contraposto à metodologia desenvolvida baseada em algoritmos genéticos.

6.2 PARAMETRIZAÇÃO E MODELAGEM

Com o intuito de elaborar um método de escolha de parâmetros de transmissão de uma rede LoRa *Mesh* de *gateway single channel* localizada em um ambiente rural, capaz de otimizar a taxa de transmissão sem exceder um limite máximo de consumo energético, desenvolveu-se uma aplicação baseada em algoritmos genéticos capaz de cumprir a proposta em questão. Paralelamente, criou-se dois métodos para a mesma função, porém baseados em um funcionamento de cunho “aleatório” e bem mais simples, com o intuito de servir como comparações ao procedimento principal. Todos os três métodos possuem como restrição gerar configurações para todos os nós da rede com o mesmo *spreading factor* e largura de banda, limitação imposta pela utilização do concentrador de canal único.

Para tal desenvolvimento, escolheu-se como ferramenta de trabalho a linguagem de programação Python e o ambiente de desenvolvimento integrado PyCharm®, como já comentado no capítulo introdutório. Em relação ao programa criado, o mesmo simula uma operação de uma rede LoRa *Mesh* em um ambiente rural (caracterizado na Seção 4.2), composta por um *gateway single channel* e por um número variável de *end nodes*, posicionados a diferentes distâncias do dispositivo central. O código foi projetado para que tanto a quantidade de nós quanto a localização de cada um deles pudesse assumir qualquer valor, adequando a aplicação a diferentes cenários, de acordo com a necessidade do usuário.

Em mais detalhes, a operação simulada se baseia no envio de dois pacotes de dados de determinados tamanhos (em *bytes*), também podendo assumir qualquer valor que seja condizente, por *end node*, para o *gateway*, assim representando uma transmissão de um envio de um período de dados de uma aplicação típica baseada em comunicação LoRa. Sabendo que o tamanho máximo de um pacote LoRa é de

255 bytes (SEMTECH SX1276/77/78/79, 2016), ou menor que isto ao considerar as camadas superiores, o envio de dois pacotes representa um caso crítico de uma transmissão de dados de uma aplicação IoT comum.

Para a realização de alguns cálculos, por exemplo o consumo energético de uma transmissão de dados, foi necessário considerar um módulo transmissor LoRa *Mesh* como referência, escolhendo assim o dispositivo do modelo LoRaMESH RD42C, da empresa Radioenge, sendo o mesmo utilizado no trabalho de campo realizado para a criação do modelo de perda de caminho descrito no Capítulo 4. Com isso, foi possível determinar valores condizentes para todas as variáveis relevantes para o contexto em questão, sendo elas os tamanhos dos pacotes, o consumo máximo pré-determinado para realizar as duas transmissões, o ruído médio e as atenuações do sinal da transmissão de cada *end node* (sendo os dois últimos fatores obtidos pelo modelo de perda de caminho desenvolvido já citado). Então, com a definição destes valores, a partir da técnica desenvolvida baseada em algoritmos genéticos e das outras duas técnicas comparativas, determinou-se os parâmetros de rede para cada nó, que otimizassem a taxa de transmissão respeitando o consumo energético escolhido e algumas limitações do protocolo *mesh*, os quais serão citados posteriormente.

Como já mencionado, a métrica utilizada relativa ao consumo energético é um limite pré-determinado para realizar as transmissões dos dois pacotes de dados, limite este definido em Joules (J), sendo que para cada uma das duas transmissões, uma configuração de rede diferente é utilizada. Tal cenário não representa fielmente a aplicação de uma rede LoRa *Mesh*, pois geralmente o *end node* realiza todas as suas transmissões utilizando a mesma configuração. A escolha desta métrica foi feita para garantir diferentes opções de configurações para serem utilizadas pelos dispositivos da rede, cada uma mais bem otimizada para um determinado tamanho de pacote. Tal escolha garante que, ao realizar uma transmissão com qualquer uma das condições previstas (conjunto de um determinado tamanho de pacote de dados e configuração de rede), o nó não irá ultrapassar o limite máximo de consumo de energia imposto previamente.

6.3 MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Como mencionado e justificado na Seção 6.1, foram desenvolvidos dois métodos de escolha de parâmetros para dispositivos de uma rede LoRa *Mesh* localizada em um ambiente rural, a fim de serem utilizados como comparação em relação à metodologia desenvolvida, baseada em algoritmos genéticos. Ambos os métodos de referência elaborados seguem a mesma regra de obedecer o limite de consumo energético imposto e a exigência de que todos os dispositivos da rede devem estar configurados com o mesmo valor de *spreading factor*.

O primeiro deles, denominado seleção aleatória, é baseado em uma escolha aleatória e simples, em que uma configuração randômica de parâmetros de rede (SF, CR, BW e potência de transmissão) para cada tamanho de pacote transmitido é gerada. Em seguida, simula-se a vazão e o consumo energético gerados na transmissão dos dois pacotes utilizando as respectivas configurações estipuladas, por meio da função *calcularVazaoConsumo*, detalhada na Seção 6.4 e apresentada no APÊNDICE A. Além disso, tal função também oferece como saída os valores de SNR dos sinais transmitidos por cada *end node* e para cada configuração utilizada. Caso o limite de consumo de energia imposto não seja atingido e os valores de SNR indiquem que seja possível realizar a transmissão dos dados de cada nó ao *gateway*, o par de configurações é escolhido. Caso algum desses requisitos não seja atendido, o processo se repete seguidamente até que algum par de configurações que respeite as duas regras mencionadas seja encontrado.

O segundo método de referência criado, denominado seleção aleatória repetida, consiste na execução do primeiro citado, porém realizada repetidas vezes, assim assumindo como par de configurações escolhido aquele que oferecer a maior taxa de transmissão. O número de repetições executadas pode assumir qualquer valor, mas, para se obter valores de referência, utilizou-se 100 e 1000 execuções.

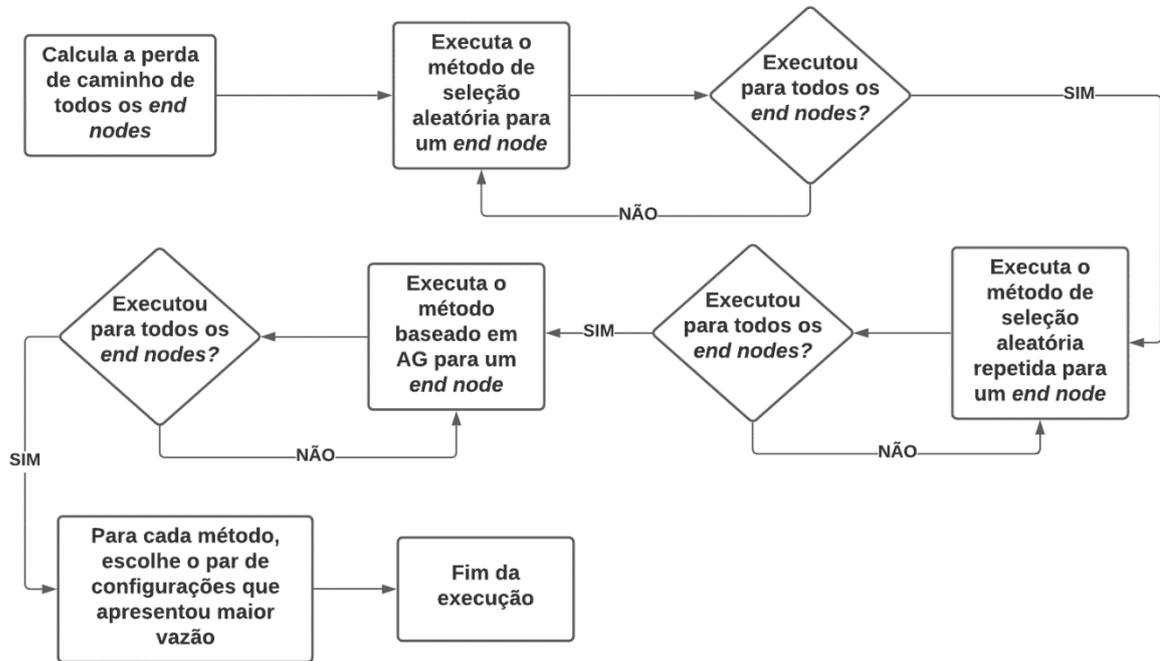
Todo o procedimento de ambos os métodos são apresentados em mais detalhes na Seção 6.4, responsável por expor e explicar de forma completa o algoritmo desenvolvido que, além de implementar a seleção aleatória e a seleção aleatória repetida, executa o método desenvolvido baseado em algoritmos genéticos.

6.4 ALGORITMO PROPOSTO

Como proposto, desenvolveu-se um algoritmo capaz de definir os parâmetros de transmissão de todos os *end nodes* de uma rede LoRa *Mesh* de *gateway single channel* localizada em um ambiente rural, o qual otimize a taxa de transmissão de cada dispositivo, condicionado a não ultrapassar um determinado limite máximo de consumo energético.

A série de instruções do algoritmo de seleção de parâmetros é representada pela FIGURA 25. O mesmo tem como primeiro passo calcular a perda de caminho referente às distâncias de cada *end node* referente ao *gateway*, através da função *calcularPerdaPorDistancia*, presente no APÊNDICE B. Tal função possui como valores de entrada a distância de propagação do sinal, em km, e o modelo de perda de caminho a ser utilizado para o cálculo, podendo ser o modelo de propagação no espaço livre ou o modelo desenvolvido específico para transmissões em 915 MHz em um ambiente rural. Caso a primeira opção for selecionada, a função retorna como saída a perda de caminho relativa à distância em questão, em dB, obtida através da aplicação da equação (10). Caso a segunda for escolhida, retorna-se como saída a mesma variável, porém através da aplicação da equação (23), obtida através modelo de perda de caminho para comunicações LoRa em ambientes rurais, apresentado no Capítulo 4.

FIGURA 25 – FLUXOGRAMA DO ALGORITMO DESENVOLVIDO



FONTE: O autor (2021).

Posteriormente, para cada *end node* é realizada a escolha dos parâmetros de transmissão utilizados através de três métodos, sendo eles a seleção aleatória, a seleção aleatória repetida (ambos já mencionados na Seção 6.3) e a metodologia desenvolvida baseada em algoritmos genéticos.

O primeiro método a ser aplicado é a seleção aleatória. Como já mencionado anteriormente, o mesmo inicia o processo escolhendo randomicamente dois pares de configuração de parâmetros, compostas por um SF (entre 7 a 12), um CR (entre 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8), uma BW (125, 250 ou 500 KHz) e uma potência de transmissão (entre -2 a 20 dBm).

Após a seleção inicial, calcula-se a SNR mínima necessária para a recepção de um sinal de acordo com as condições específicas propostas. Para isso, utilizou-se como base a equação do cálculo da sensibilidade do receptor, apresentada na referência (KOWALSKI, 2007),

$$S_{min} = (S/N)_{min} K T_o B N_F \quad (29)$$

sendo $(S/N)_{min}$ a SNR mínima, K a constante de Boltzmann (em Joule/K), T_o a temperatura absoluta da entrada do receptor (em K), B a largura de banda do receptor (em Hz) e N_F a figura de ruído do receptor. Então, após definir os valores de algumas variáveis, realizar a conversão para a escala logarítmica e isolar o termo da SNR mínima, adaptou-se a equação (29) para o seguinte formato,

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{min} [dBm] = S_{min}[dBm] + 174 - 10 \log(B_{Hz}) - N_F + \text{tolerância} \quad (30)$$

sendo 174 os valores da constante de Boltzmann ($K = 1.38 * 10^{-23}$ Joule/°K) e da temperatura absoluta ($T_o = 290^\circ\text{K}$) somados na escala logarítmica. O valor de B é a largura de banda definida pela configuração escolhida, o valor de $S_{min}[dBm]$ é definido pelo *datasheet* do módulo LoRa utilizado, o qual varia de acordo com a largura de banda e *spreading factor* definidos pela configuração em questão, e o valor de N_F é 6 dB, sendo este justificado posteriormente na Seção 7.1.

Portanto, após o par de configurações ser gerado randomicamente, os valores mínimos de SNR que permitem a recepção do sinal transmitido por um dispositivo configurado de acordo com cada uma das duas opções são calculados através da equação (30).

Em seguida, considerando a transmissão de dois pacotes de dados, cada uma utilizando um conjunto de parâmetros do par de configurações selecionado, calcula-se a vazão teórica, o consumo energético e a SNR de cada uma delas, através da função *calcularVazaoConsumo*.

Como citado na Seção 6.3, tal função possui como parâmetros de entrada os pares de configuração gerados, o ruído médio, os tamanhos dos pacotes e as perdas de caminho previamente calculadas, retornando como saída a soma das vazões de cada transmissão, em *bits* por segundo (bps), a soma dos consumos energéticos e a SNR de cada uma delas, separadamente. Para o cálculo da vazão, aplica-se a equação (1), utilizando os respectivos valores de SF, CR e BW.

Em seguida, calcula-se o *time on air* de cada transmissão através da aplicação das equações (2), (3), (4), (5) e (6). Em relação ao consumo energético, determina-se primeiramente a corrente consumida pelo módulo LoRa, em miliampere (mA), ao

transmitir dados de acordo com a potência utilizada, valor este que segue a referência (SEMTECH SX1272/73, 2017). Posteriormente, realiza-se o produto da tensão de operação do módulo, da corrente consumida e do *time on air*, obtendo como resultado o consumo de energia, em Joules, ao realizar a transmissão de um determinado pacote de dados.

Para o cálculo da SNR, aplica-se a equação (31),

$$SNR = PTX - \text{ruído} - \overline{PL}(d) + G_T + G_R \quad (31)$$

sendo PTX a potência de transmissão escolhida, em dBm, $\overline{PL}(d)$ a perda de caminho em relação à distância (anteriormente calculada), em dB, e G_T e G_R os ganhos das antenas transmissora e receptora, em dBi, respectivamente. Este passo é repetido para todas as distâncias consideradas, para posteriormente verificar se a potência de transmissão selecionada para o *end node* atual seria capaz de possibilitar a transmissão presumindo as outras distâncias de transmissão.

Por fim, ainda no método de seleção aleatória, realiza-se a decisão de escolher ou não o par de conjuntos de parâmetros gerado, através do cumprimento de duas condições. A primeira delas é a obrigatoriedade da soma dos consumos energéticos da transmissão dos dois pacotes de dados não atingir o limite imposto. A segunda é a imposição dos valores de SNR calculados, considerando todas as distâncias de transmissão e utilizando qualquer um dos dois conjuntos de parâmetros escolhidos, não ultrapassem os limites $(S/N)_{min}[dBm]$ obtidos anteriormente. Caso estas duas condições sejam atendidas, o par de configurações é escolhido. Caso contrário, o processo se repete seguidamente até que algum par que respeite as duas regras mencionadas seja encontrado.

O processo completo de escolha dos conjuntos de parâmetros LoRa descrito acima é apresentado de forma resumida no pseudocódigo a seguir, nomeado como algoritmo 1. Além de ser utilizado na seleção aleatória, esta rotina também é utilizada na seleção aleatória repetida e no método proposto baseado em AG.

Algoritmo 1 Escolha dos conjuntos de parâmetros LoRa

```

1: repeat
2:   Selecione aleatoriamente um par de conjuntos de parâmetros LoRa
3:   Calcule  $\left(\frac{S}{N}\right)_{min}$  a partir da equação (30)
4:   Calcule  $R[bps]$  a partir da equação (1), para cada conjunto de parâmetros
5:    $R_{soma}[bps] \leftarrow R_1 + R_2$ 
6:   Calcule  $ToA$  a partir das equações (2), (3), (4), (5) e (6), para cada conjunto de
   parâmetros
7:    $consumo_{soma} \leftarrow 3,3 \cdot I_1 \cdot ToA_1 + 3,3 \cdot I_2 \cdot ToA_2$ 
8:   for all distância de cada end node do
9:     Calcule  $SNR$  a partir da equação (31), para cada conjunto de parâmetros
10:  end for
11: until par de conjuntos de parâmetros LoRa atender as duas condições

```

O segundo método a ser aplicado é a seleção aleatória repetida, o qual consiste na execução do algoritmo 1, porém reproduzido repetidas vezes, assim assumindo o par de configurações final aquele que oferecer a maior taxa de transmissão. O número de repetições executadas pode assumir qualquer valor, mas, como já citado na Seção 6.3, utilizou-se 100 e 1000 execuções para se obter valores de referência.

Por fim, o último método baseado em algoritmos genéticos é executado, o qual possui como primeiro passo a criação de uma população inicial de “indivíduos” ou cromossomos (FIGURA 26), em que cada um deles é representado por um par de configurações LoRa, compostas pelos mesmos parâmetros utilizados na seleção aleatória. Para gerar indivíduos válidos, realiza-se a execução do algoritmo 1, adicionando o candidato na população sempre que os requisitos de limite de consumo energético e SNR forem atendidos. Após a quantidade desejada ser atendida, ou seja, quando se completar uma população completa, seleciona-se quais dos candidatos avançarão para as próximas etapas do processo através do método de seleção da roleta ou seleção por torneio, ambos já detalhados no Capítulo 5.

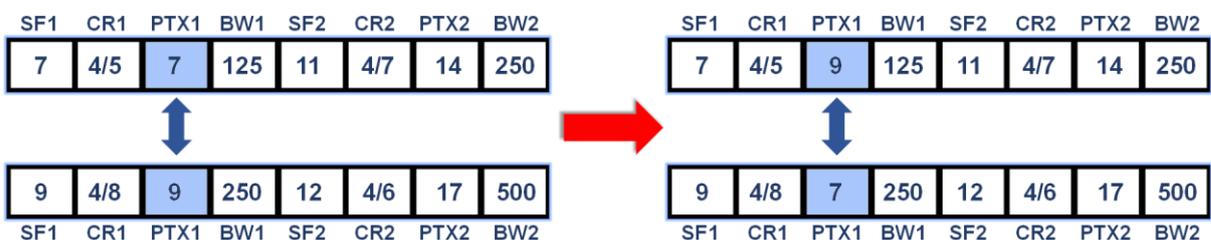
FIGURA 26 – REPRESENTAÇÃO DO CROMOSSOMO



FONTE: O autor (2021).

Em seguida, ainda no método baseado em AG, executa-se o operador elitismo, com o objetivo de garantir que um determinado número de indivíduos (configurações que gerarem as maiores taxas de transmissão) avançará para a próxima geração. Então, executa-se o operador de cruzamento e mutação no restante dos candidatos para causarem alterações nos valores dos parâmetros das configurações, ambos os procedimentos condicionados a determinadas probabilidades de serem aplicados. O cruzamento aplicado se baseia em realizar uma troca de valores de parâmetros entre o indivíduo selecionado e outro aleatório da população em questão, sendo que para cada parâmetro há uma probabilidade de 50% de realizar a troca ou não (FIGURA 27).

FIGURA 27 – OPERAÇÃO DE CRUZAMENTO NO PARÂMETRO PTX1



FONTE: O autor (2021).

Já o processo de mutação utilizado é baseado na troca de cada um dos parâmetros do indivíduo selecionado, condicionada à taxa de mutação, por outro valor aleatório dentre as opções possíveis (FIGURA 28). É importante observar que o indivíduo modificado por esses dois operadores só é incluído na população se o

mesmo obedecer aos requisitos de limitações de consumo e SNR já mencionados. Caso contrário, as alterações são revertidas e o candidato é mantido.

FIGURA 28 – OPERAÇÃO DE MUTAÇÃO NO PARÂMETRO SF2



FONTE: O autor (2021).

Com isso, todos os três operadores são executados a cada iteração e, quando o limite de gerações determinado for alcançado, o candidato (par de configuração LoRa) da população da última geração que possuir o maior valor de *fitness* é apresentado como a opção escolhida pelo método. Em relação a este valor, o mesmo é dado pela soma das taxas de transmissão das duas configurações, calculado pela função de avaliação representada pela equação (32).

$$fitness [bps] = SF1 * \frac{BW1 * 10^3}{2^{SF1}} * CR1 + SF2 * \frac{BW2 * 10^3}{2^{SF2}} * CR2 \quad (32)$$

Após a execução dos três métodos de seleção para cada *end node* da rede, define-se como a configuração utilizada por todos os dispositivos aquela que apresentar uma maior vazão teórica, realizando este passo separadamente para cada método apresentado. Tal procedimento pode ser realizado, pois qualquer uma das configurações geradas obedece aos requisitos de consumo energético e SNR, independente da distância de transmissão considerada, dentre as contempladas no início do algoritmo. Com isso, todos os *end nodes* estarão configurados com a mesma largura de banda e *spreading factor*, requisito este necessário para a operação de uma rede LoRa *Mesh* de *gateway single channel* convencional.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo expor o desenvolvimento do método de escolha de parâmetros de uma rede LoRa *Mesh* de *gateway single channel* localizada em um

ambiente rural, o qual foi baseado em algoritmos genéticos. Inicialmente, apresentou-se uma pesquisa realizada sobre os estudos relacionados ao tema proposto, para identificar quais pontos já foram contemplados pelo meio acadêmico e de como os objetivos propostos foram realizados. Como resultado da pesquisa, não se encontrou um trabalho que buscou como propósito desenvolver um método de otimização de escolha de parâmetros de uma rede LoRa *Mesh*.

Posteriormente, a parametrização e a modelagem da aplicação do método de escolha foram evidenciadas, através de uma descrição do cenário simulado considerado e das escolhas das variáveis que envolvem tal processo, como as ferramentas de desenvolvimento, o modelo do módulo transmissor, o número de transmissões realizadas por *end node*, entre outros. Além disso, a justificativa para tais escolhas também foram apresentadas.

Em seguida, a maneira de avaliação de desempenho do método desenvolvido foi exposta. Para isso, apresentou-se os dois métodos de referência também desenvolvidos em detalhes, focando no funcionamento de cada um deles. Tais referências precisaram ser elaboradas devido à falta de propostas para a otimização de parâmetros de transmissão de redes LoRa *Mesh*, como mencionado na Seção 6.1 deste capítulo.

Por fim, o algoritmo do programa que contempla a execução do método proposto e dos métodos de referência foi apresentado. Para isso, detalhou-se cada passo do mesmo, evidenciando todos os cálculos realizados em cada um deles, explicando sobre as funções criadas e toda a lógica do funcionamento geral do código. Especificamente para o método baseado em AG, explicou-se as operações de todos os seus elementos relativos às técnicas de algoritmos genéticos, como os operadores de cruzamento e mutação.

Com o intuito de avaliar a proposta, o capítulo seguinte apresentará todos os resultados alcançados ao executar os três métodos de escolha de parâmetros LoRa desenvolvidos, evidenciando o desempenho de cada um deles e apresentando uma conclusão do que se foi obtido.

7 AVALIAÇÃO DA PROPOSTA

Este capítulo tem como proposta apresentar os resultados obtidos ao utilizar os dois métodos de referência e o método proposto baseado em algoritmos genéticos para a seleção de parâmetros de transmissão de redes LoRa *Mesh* de *gateway single channel* localizadas em um ambiente rural, inicialmente expondo todos os cenários e parâmetros de simulação, bem como a justificativa da composição e configuração de cada um deles.

Em sequência, evidencia-se como é realizada a avaliação de desempenho do algoritmo genético utilizado e, de uma forma mais geral, a análise de performance de cada um dos métodos citados.

Em seguida, expõe-se uma comparação de desempenho de variações do algoritmo genético utilizado em relação à capacidade de otimização e tempo de processamento, para assim justificar a utilização da alternativa escolhida.

Por fim, é apresentada uma comparação de desempenho dos três métodos citados, mais detalhadamente em relação ao tempo de processamento de cada um deles e à otimização do consumo energético e da vazão teórica de dados de cada *end node* da rede.

7.1 INTRODUÇÃO

O método de seleção de parâmetros de transmissão LoRa proposto, baseado em algoritmos genéticos, possui inúmeras variáveis que podem assumir diferentes valores. Ao modificar os valores de algumas delas, como o tamanho da população inicial, o número de gerações e a taxa de elitismo, o desempenho do processo pode ser diretamente alterado. Devido a este fator, é necessário encontrar valores adequados para tais parâmetros que gerem um resultado satisfatório de desempenho geral do AG.

Para isso, após diversas execuções e testes considerando diferentes variações, definiu-se dois cenários como melhores candidatos (TABELA 8), com valores distintos para as três variáveis citadas, para avaliar qual deles apresenta um melhor desempenho, considerando o ponto de otimização alcançado, bem como o tempo de processamento obtido. O primeiro deles é de caráter mais simples, pelo fato de utilizar uma configuração que demanda um menor tempo e nível de

processamento. Já a outra alternativa é mais complexa, sendo um pouco mais custosa em relação a esses dois aspectos.

TABELA 8 – CONFIGURAÇÕES UTILIZADAS NO ALGORITMO GENÉTICO

Variáveis	Configuração simples	Configuração complexa
Tamanho da população inicial	50	100
Número de gerações	60	30
Elitismo	5	10
Probabilidade de cruzamento	0.7	0.7
Probabilidade de mutação	0.1	0.1

FONTE: O autor (2021).

Além disso, também foram considerados dois métodos de seleção distintos, sendo eles o método da roleta e a seleção por torneio, com o mesmo fim de observar o impacto de cada um deles nos mesmos elementos já citados. Em relação à probabilidade de cruzamento e à probabilidade de mutação, foram escolhidos valores típicos geralmente utilizados para tais variáveis, indicados pela referência (COLEY, 1999). Nos dois cenários, os valores escolhidos foram iguais, pois, através de procedimentos empíricos, foi possível perceber que, independentemente do contexto, os valores para tais variáveis que otimizam o resultado do AG são os mesmos.

Para realizar uma avaliação e comparação tanto das variações de algoritmo genético quanto dos três modelos de escolha dos parâmetros de rede LoRa, foi necessário fixar valores para algumas variáveis, para assim gerar um cenário padrão a todas as propostas. Então, escolheu-se tais valores baseados na aplicação utilizada pela empresa Zeus Agrotech, a qual implementa redes LoRa *Mesh* com *gateways single channel* em propriedades rurais de diversos clientes em todo o território brasileiro. Com isso, é assegurado que tais escolhas estão condizentes e fiéis com a proposta do trabalho.

Então, baseando-se no contexto mencionado, definiu-se o cenário padrão utilizado (TABELA 9). O mesmo é definido por uma rede LoRa composta por quatro *end nodes* LoRaMESH RD42C conectados a antenas omnidirecionais de 5 dBi localizados em um ambiente rural a uma distância de três, cinco, 10 e o último a 12

quilômetros do *gateway* (mesmo modelo de módulo e antena utilizados nos nós), todos realizando uma transmissão de um pacote de dados de 160 *bytes* e outro de 120 *bytes*, com frequência de operação de 915 MHz.

TABELA 9 – PARÂMETROS DO CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

Parâmetros	
Número de nós	4
Distância entre nós e <i>gateway</i>	3, 5, 10 e 12 km
Ganho das antenas	5 dBi
Tamanho dos pacotes	160 e 120 <i>bytes</i>
Potência do ruído médio	-108 dBm
Frequência de operação	915 MHz
Consumo energético máximo	0,5 J
Margem de segurança da SNR	3 dB
Tensão do módulo transmissor	3,3 V
Figura de ruído	6 dB

FONTE: O autor (2021).

Em relação ao número de nós presente na rede, pode-se dizer que tal parâmetro não influencia diretamente no processo de escolha de parâmetros, e sim na quantidade de execuções deste processo. Sobre as distâncias escolhidas, as mesmas conseguem abranger os cenários práticos típicos de redes LoRa *Mesh*, nos quais a distância entre dispositivos da rede geralmente não ultrapassa 12 km.

Sobre o ganho das antenas dos dispositivos, definiu-se um valor normalmente utilizado para antenas presentes neste tipo de aplicação, além de serem facilmente encontradas no mercado. Em relação ao tamanho dos dois pacotes a serem transmitidos por cada nó, os valores escolhidos representam situações críticas ao considerar uma rede LoRa *Mesh*, cenário o qual é indicado utilizar pacotes consideravelmente menores do que o limite máximo imposto pela tecnologia LoRa (255 *bytes*).

Em relação à potência do ruído médio de um ambiente rural, o valor foi determinado pelos experimentos práticos da modelagem de perda de caminho de transmissões LoRa em ambientes rurais, conforme mencionado no Capítulo 4.

Quanto ao consumo energético para realizar as duas transmissões, estipulou-se um limite máximo de 0,5 J por *end node*. Realizando algumas análises, concluiu-

se que esse valor determinado não permite a transmissão de nenhum dos dois pacotes utilizando configurações com um alto *time on air* (valores maiores de SF e CR), muito menos para ambos, concluindo que o limite de 0,5 J obrigará a escolha de configurações de rede LoRa mais relacionadas a um baixo consumo de energia, o que prolongará o tempo de operação dos dispositivos em campo.

Adicionou-se também uma margem de segurança de 3 dB acrescida no limite mínimo em que a SNR da transmissão de dados pode assumir, a fim de considerar uma pequena diferença que venha a existir entre os valores teóricos e reais. Quanto à tensão de operação dos módulos de 3,3 V, seguiu-se o valor da referência (SEMTECH SX1276/77/78/79, 2016). Em relação à figura de ruído, variável a qual representa a degradação da SNR causada pelos componentes e pela estrutura física do transmissor/receptor, assume-se o valor de 6 dB, também baseado na referência (SEMTECH AN1200.22, 2015).

Com isso, definiu-se um cenário único em que diferentes situações são consideradas (ao utilizar diferentes distâncias, por exemplo), em que os casos críticos relativos à operação de uma rede LoRa *Mesh* são contemplados e que esteja alinhado com o padrão de aplicações IoT, principalmente em relação à característica de se priorizar um baixo consumo energético.

Após a definição do cenário de simulação, foi possível realizar as comparações propostas. Inicialmente, para avaliar o desempenho das variações de algoritmo genético, submeteu-se todas elas a 100 execuções para avaliar a repetibilidade de cada variação. Nesta etapa, calculou-se a média das taxas de transmissão das configurações geradas por cada uma delas, bem como o valor médio dos tempos de processamento obtidos por *end node*. Para uma análise mais conclusiva, obteve-se o desvio-padrão para cada situação para ambas as variáveis, além de um intervalo de 95% de confiança. Este último parâmetro indica que há a probabilidade de 95% de que, em execuções futuras do algoritmo, a vazão teórica obtida se encontre entre o limite inferior e o limite superior do intervalo apresentado. Além disso, após a primeira análise, submeteu-se todas elas a 10 execuções apenas para o *end node* mais distante do *gateway* (a 12 Km). Com isso, foi possível estabelecer gráficos da relação do número de gerações com as médias e o valor máximo de *fitness* (vazão teórica, em bps) e assim, comparar todas as variações em relação à velocidade de otimização e tempo de processamento.

Após a definição de qual das variantes do método baseado em algoritmos genéticos obteve o melhor resultado, esta foi comparada com os dois métodos de referência contemplados pelo presente trabalho. Como citado anteriormente, todos os três métodos possuem como objetivo encontrar dois conjuntos de parâmetros de transmissão de dispositivos LoRa *Mesh* que otimizarão a taxa de transmissão sem ultrapassar o limite de consumo energético para transmitir uma determinada quantidade de dados.

Para realizar a comparação de desempenho entre os três métodos, semelhante ao cenário anterior, os mesmos foram submetidos a 100 execuções sob as mesmas condições, realizando a mesma estratégia de calcular a média das taxas de transmissão, dos tempos de processamento obtidos por *end node* e, adicionalmente, do consumo energético, além do desvio-padrão e de um intervalo de 95% de confiança para todas as variáveis.

7.2 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DE VARIAÇÕES DO ALGORITMO GENÉTICO

Como mencionado na seção anterior, submeteu-se todas as variações do algoritmo genético consideradas a 100 execuções, a fim de avaliar a repetibilidade de cada uma delas, calculando a média das taxas de transmissão das configurações geradas e o valor médio dos tempos de processamento obtidos por *end node*, além dos respectivos desvios-padrão (σ) e intervalos de confiança (IC) de 95%. Os resultados são apresentados na TABELA 10.

TABELA 10 – COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM ALGORITMOS GENÉTICOS (100 EXECUÇÕES)

Varição	Taxa de transmissão $\pm \sigma$ [bps]	Varição do IC	Tempo de processamento $\pm \sigma$ [s]	Varição do IC
1 - Configuração simples e método da roleta	14062,5 \pm 0	-	0,3089 \pm 0,0189	0,0037
2 - Configuração simples e seleção por torneio	14062,5 \pm 0	-	0,3026 \pm 0,0211	0,0041
3 - Configuração complexa e método da roleta	14062,5 \pm 0	-	0,5543 \pm 0,0325	0,0064
4 - Configuração complexa e seleção por torneio	14062,5 \pm 0	-	0,5380 \pm 0,0314	0,0062

FONTE: O autor (2021).

Ao analisar os resultados obtidos, percebe-se que as configurações LoRa obtida gerada por todas as variações proporcionaram uma alta taxa de transmissão para cenários LoRa de 14062,5 bps em todas as 100 execuções do método, uma vez que o desvio-padrão encontrado para as quatro situações foi nulo. Já em relação ao tempo de processamento, as variações que utilizaram a configuração simples obtiveram um valor consideravelmente menor ao comparar com as configurações complexas. Dentre as opções avaliadas, a alternativa a qual apresentou um menor tempo de processamento médio foi a variação utilizando a configuração simples e a seleção por torneio, com um desvio-padrão de 0,0211 e um intervalo de confiança de 95% de $0,3026 \pm 0,0041$.

Considerando apenas a análise anterior, conclui-se que qualquer variação considerada possui como resultado um par de parâmetros de transmissão LoRa a qual gere a mesma taxa de transmissão. Porém, as que utilizam a configuração simples de algoritmo genético alcançam tal resultado com um tempo de processamento menor.

Avançando para o segundo cenário, realizou-se as 10 execuções de todas as variações, porém considerando apenas um *end node* a 12 Km de distância do *gateway* (caso mais crítico do cenário padrão). Os resultados apresentados pela TABELA 11 mostram que todas as variações alcançaram o mesmo valor de taxa de transmissão média da etapa anterior, exceto a qual utilizou a configuração simples e a seleção por torneio, apresentando uma vazão média com intervalo de confiança de 95% de $13984 \pm 247,0529$ bps. Em relação ao tempo de processamento médio por *end node*, os valores obtidos foram maiores ao serem comparados com a etapa anterior, devido ao fato de terem sido realizadas menos execuções, fazendo com que os valores componham uma média não muito fiel ao experimento.

Já em relação à taxa de transmissão, é condizente que o valor supostamente ótimo não tenha sido alcançado em todas as execuções de todos os métodos, como ocorrido anteriormente. Tal fato pode ser justificado pela diferença de cenário entre as duas situações, uma vez que, ao considerar apenas um *end node* (sendo este o caso mais crítico, a 12 Km do *gateway*), o algoritmo é executado apenas uma vez, possuindo apenas uma chance de encontrar o ponto máximo global de otimização. Já no contexto anterior, executa-se o algoritmo quatro vezes (número de *end nodes* na rede) e define-se como par de parâmetros LoRa escolhido aquele que apresentar a

maior vazão teórica e que permita a transmissão de dados de todas as distâncias em questão.

TABELA 11 – COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DO MÉTODO BASEADO EM ALGORITMOS GENÉTICOS (10 EXECUÇÕES)

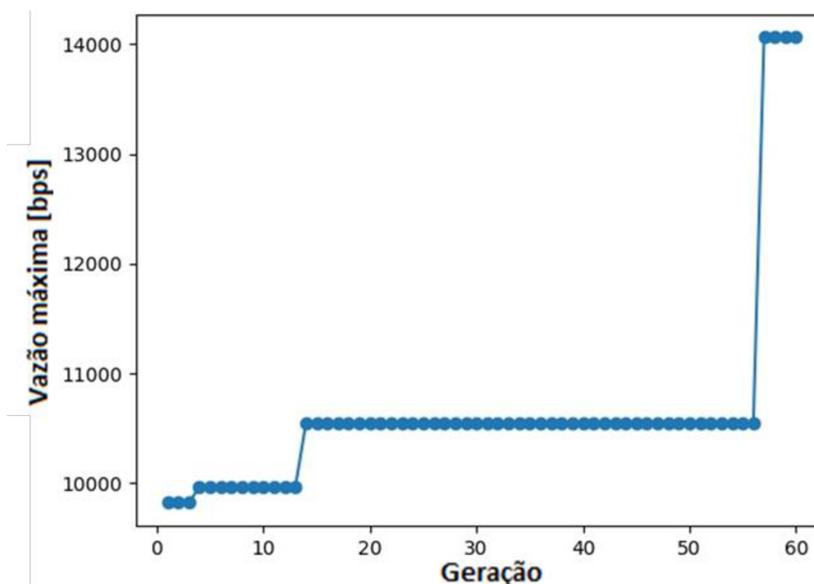
Variação	Taxa de transmissão $\pm \sigma$ [bps]	Variação do IC	Tempo de processamento $\pm \sigma$ [s]	Variação do IC
1 - Configuração simples e método da roleta	14062,5 \pm 0	-	0,4437 \pm 0,1410	0,0276
2 - Configuração simples e seleção por torneio	13984 \pm 247,0529	48,4215	0,4194 \pm 0,0284	0,0056
3 - Configuração complexa e método da roleta	14062,5 \pm 0	-	0,6649 \pm 0,0435	0,0085
4 - Configuração complexa e seleção por torneio	14062,5 \pm 0	-	0,6198 \pm 0,0314	0,0062

FONTE: O autor (2021).

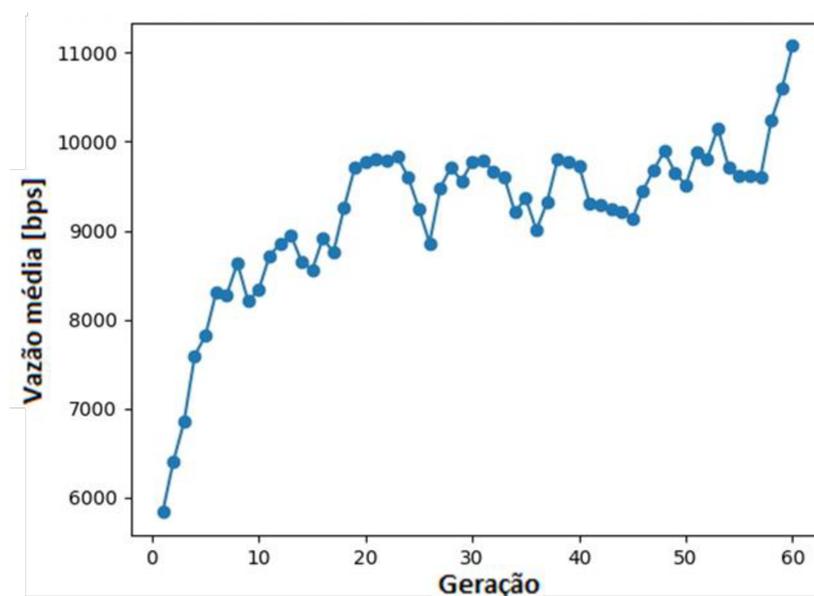
Nesta etapa, também se analisou minuciosamente o desempenho do algoritmo genético em relação ao valor médio e máximo da *fitness* (vazão teórica/taxa de transmissão) ao decorrer das gerações do processo evolutivo do algoritmo. Das 10 execuções realizadas para cada variação, escolheu-se apenas o resultado daquela que gerou o pior desempenho para efetuar tal análise.

Em relação à variação a qual utilizou a configuração simples e o método da roleta (variação 1), na pior execução, foram necessárias 57 gerações para se alcançar uma taxa de transmissão máxima de 14062,5 bps. Já em relação à média de todos os indivíduos da geração de tal variável, percebe-se que, no mesmo momento citado, o valor sofre um acréscimo considerável (FIGURA 29).

FIGURA 29 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 1)



(a)

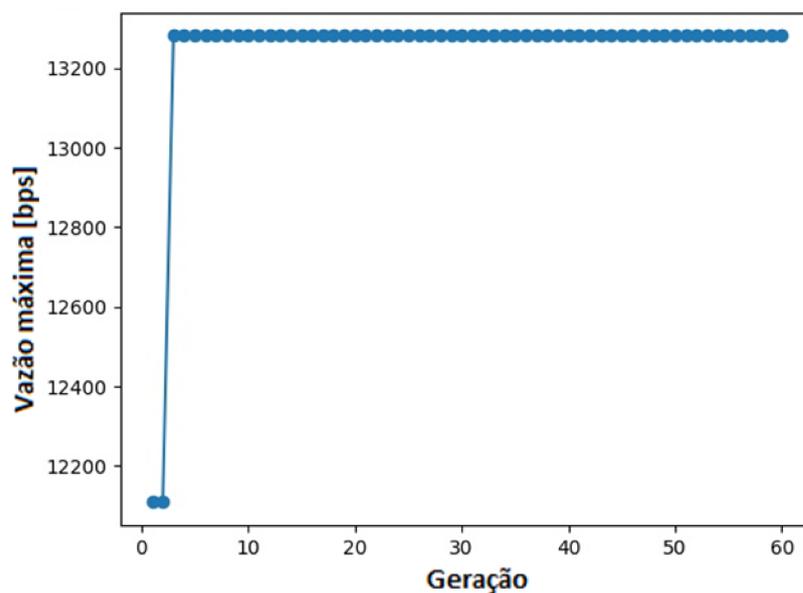


(b)

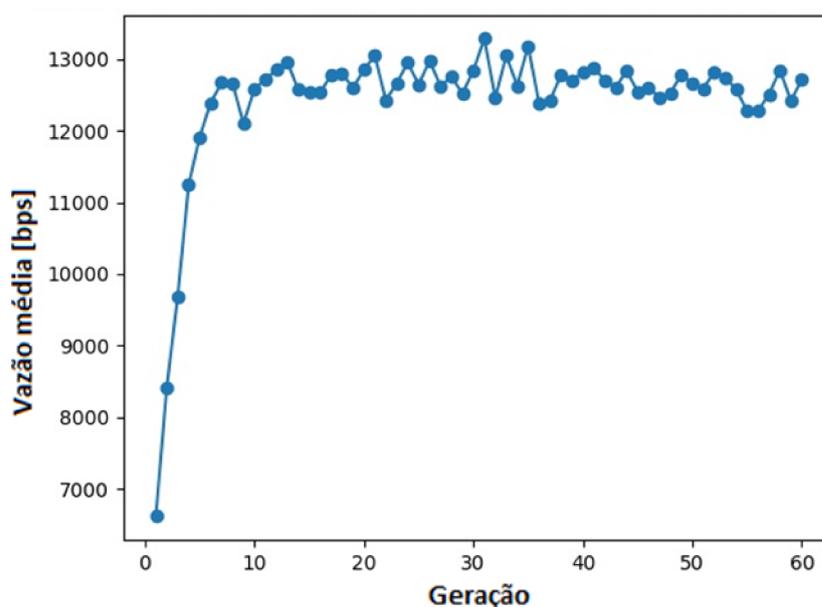
FONTE: O autor (2021).

Em relação à variação baseada na configuração simples e na seleção por torneio (variação 2), na pior execução, alcançou-se o valor máximo de vazão de 13281 bps, atingido na terceira geração, se mantendo até o fim do processo. O valor médio da vazão se manteve entre os 12000 e 13000 bps praticamente em quase todas as gerações (FIGURA 30).

FIGURA 30 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 2)



(a)

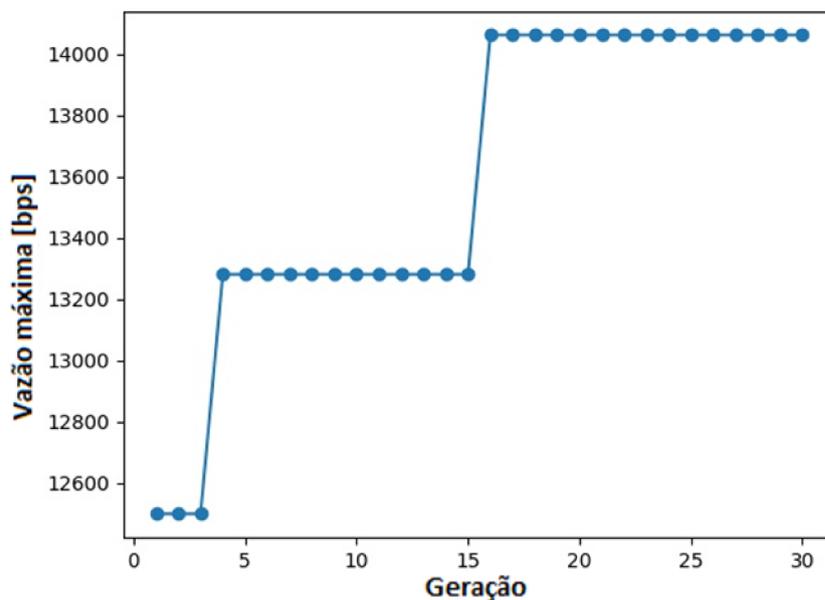


(b)

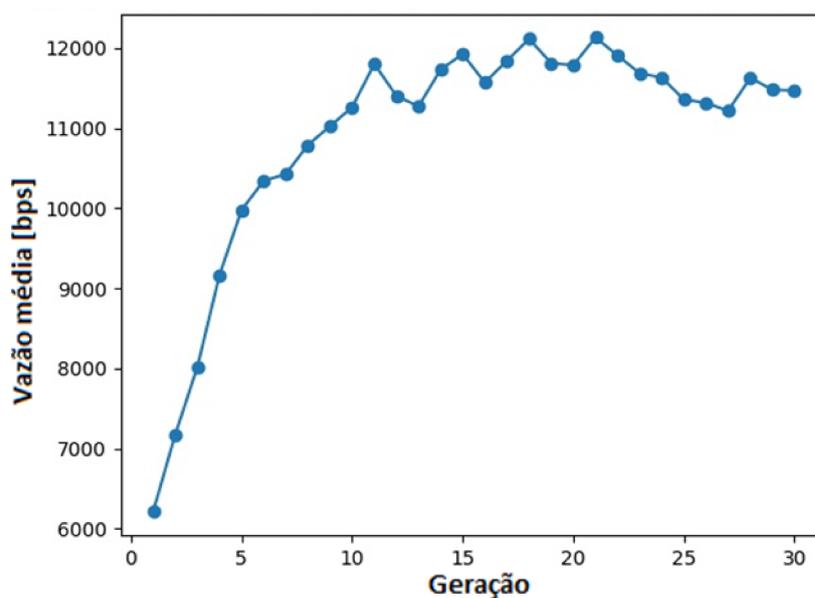
FONTE: O autor (2021).

Em relação à variação a qual utilizou a configuração complexa e o método da roleta (variação 3), na pior execução, foram necessárias 16 gerações para se alcançar uma taxa de transmissão máxima de 14062,5 bps. Já o valor médio desta variável manteve-se em bons níveis apenas a partir da geração 11 (FIGURA 31).

FIGURA 31 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 3)



(a)

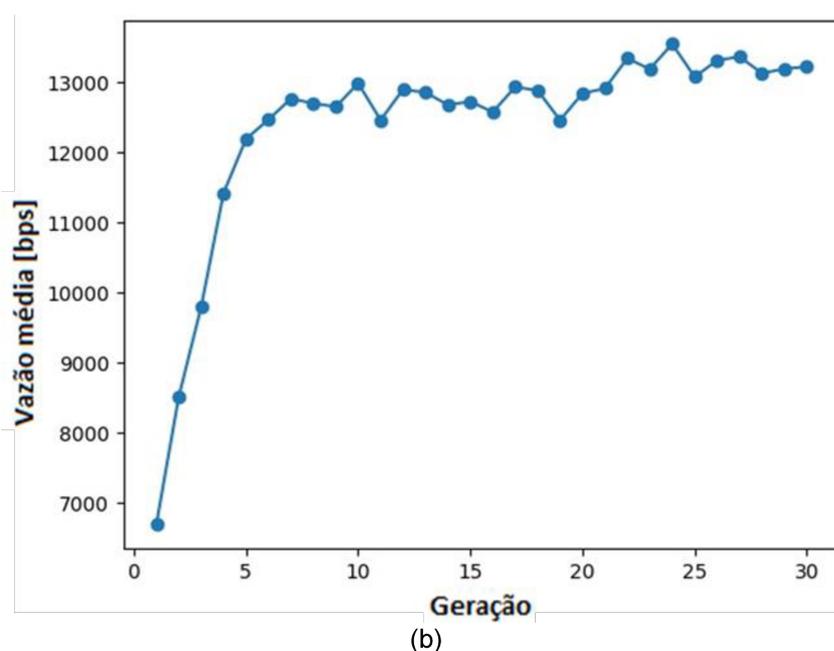
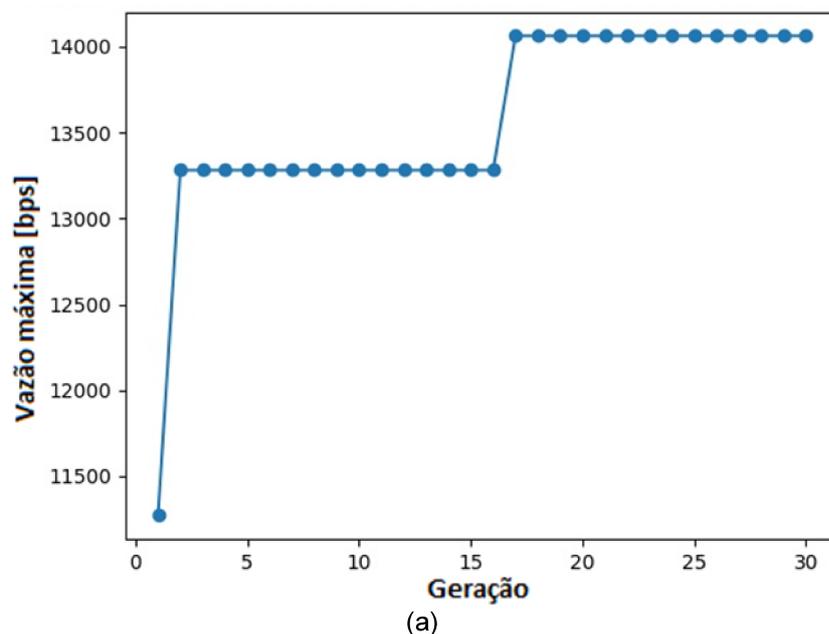


(b)

FONTE: O autor (2021).

Por fim, ao utilizar a variação com configuração complexa e seleção por torneio (variação 4), em sua execução de pior desempenho, foram necessárias 17 gerações para se alcançar uma taxa de transmissão máxima de 14062,5 bps. Já em relação ao valor médio desta variável, em apenas sete gerações o mesmo passou a se manter em níveis mais altos (FIGURA 32).

FIGURA 32 – (a) VAZÃO MÁXIMA E (b) MÉDIA POR GERAÇÃO (VARIAÇÃO 4)



FONTE: O autor (2021).

Com isso, ao avaliar as quatro variações detalhadamente, escolheu-se a opção 1 (configuração simples e método da roleta) como o método baseado em algoritmos genéticos proposto, a fim de compará-lo com os outros métodos de referência. Tal escolha foi feita devido ao fato de tal variação ter apresentado um comportamento semelhante às opções de configuração complexa, alcançando uma vazão teórica de 14062,5 bps em 100% das execuções em ambos os cenários analisados, além de demandar um tempo de processamento menor do que estas alternativas.

7.3 COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO DOS 3 MÉTODOS

Após a definição da variação do AG a ser utilizada, o método proposto baseado em algoritmos genéticos foi submetido a uma comparação de desempenho com os métodos de referência considerados, sendo eles a seleção aleatória e a seleção aleatória repetida, sendo que, para o último método citado, considerou-se uma variação com 100 repetições e outra com 1000.

Como mencionado na Seção 7.1, os três métodos foram sujeitos a 100 execuções sob as mesmas condições e mesmo cenário, os quais foram anteriormente expostos. Como resultado, cada execução de cada método apresenta um par de conjuntos de parâmetros de transmissão da rede LoRa *mesh* em questão que otimizam a taxa de transmissão sem exceder o limite máximo de consumo energético considerado. A média das taxas de transmissão, dos tempos de processamento obtidos por *end node* e do consumo energético de cada método é apresentada pela TABELA 12, além dos valores de desvio-padrão e da variação do intervalo de confiança de 95% para todas as variáveis.

TABELA 12 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS MÉTODOS ANALISADOS EM RELAÇÃO À (a) TAXA DE TRANSMISSÃO, TEMPO DE PROCESSAMENTO E (b) CONSUMO ENERGÉTICO

Método	Taxa de transmissão $\pm \sigma$ [bps]	Varição do IC	Tempo de processamento $\pm \sigma$ [s]	Varição do IC
Seleção aleatória	6755,2781 \pm 1332,7036	261,2051	0,0047 \pm 0,0021	0,0004
Seleção aleatória repetida (100 repetições)	11862,5837 \pm 1004,3841	196,8557	0,4427 \pm 0,0235	0,0046
Seleção aleatória repetida (1000 repetições)	13554,6875 \pm 541,6265	106,1568	4,4377 \pm 0,1296	0,0254
Seleção baseada em AG	14062,5 \pm 0	-	0,2953 \pm 0,0155	0,0030

(a)

Método	Consumo energético $\pm \sigma$ [J]	Varição do IC
Seleção aleatória	0,3630 \pm 0,0757	0,0148
Seleção aleatória repetida (100 repetições)	0,1961 \pm 0,0219	0,0043
Seleção aleatória repetida (1000 repetições)	0,1692 \pm 0,0070	0,0014
Seleção baseada em AG	0,1628 \pm 0	-

(b)

FONTE: O autor (2021).

Ao analisar o resultado alcançado, nota-se que o método proposto baseado em algoritmos genéticos é o que apresenta uma escolha de parâmetros de transmissão LoRa que oferece a maior taxa de transmissão média dentre as opções, além de oferecer o menor consumo energético e um dos menores tempos de processamento. Em relação à taxa de transmissão e ao consumo energético, o mesmo valor de 14062,5 bps e 0,1628 J, respectivamente, foi obtido para todas as execuções, justificando o desvio-padrão nulo e uma variação no intervalo de 95% de confiança também nula, o que confirma uma excelente repetibilidade e precisão do método. Quanto ao tempo de processamento, registrou-se um desvio-padrão de 0,0155 s e um valor médio com intervalo de 95% de confiança de 0,2953 \pm 0,0030 s, demonstrando um desempenho satisfatório em relação a este parâmetro.

Em comparação, percebe-se que o método de seleção aleatória repetida em 1000 vezes oferece uma taxa de transmissão menor do que a opção principal proposta, porém satisfatória, apresentando um valor médio com intervalo de 95% de confiança de 13554,6875 \pm 106,1568 bps. No entanto, ainda realizando a mesma comparação, tal método necessita de um tempo de processamento aproximadamente 15 vezes maior para definir os parâmetros de transmissão a serem utilizados, além de apresentar um consumo energético médio um pouco maior de 0,1692 J.

Em relação ao método de seleção aleatória repetida em 100 vezes, o mesmo é capaz de encontrar configurações LoRa utilizáveis com um tempo médio de processamento menor que 0,5 s, o que ainda é inferior ao desempenho do método proposto. Além disso, tal candidato oferece escolhas atreladas a uma taxa de

transmissão média menor que 12000 bps e um consumo energético bem semelhante ao método de seleção aleatória repetida em 1000 vezes.

Por fim, o método de seleção aleatória obteve o pior desempenho, pelo fato de ser o método mais simples e menos elaborado dos considerados. Mesmo sendo capaz de definir o conjunto de parâmetros de transmissão rapidamente (um valor médio com intervalo de 95% de confiança de $0,0047 \pm 0,0004$ s), as taxas de transmissão e o consumo energético alcançaram valores médios muito inferiores quando comparados com qualquer uma das outras opções.

Em síntese, o par de configurações LoRa escolhido em todas as execuções para os quatro nós da rede pelo método baseado em AG oferece uma taxa de transmissão somada de 14062,5 bps, o qual é o maior valor encontrado considerando todas as execuções realizadas utilizando todos os métodos. Ao observar os resultados, nota-se que o par de configurações ótimo citado, específico para o cenário considerado, foi escolhido em todas as 100 execuções utilizando o método baseado em AG, comprovando que tal opção possui uma alta precisão e repetibilidade.

7.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados obtidos pela aplicação do método proposto baseado em algoritmos genéticos, o qual possui como objetivo definir os parâmetros de transmissão de todos os *end nodes* de uma rede LoRa *mesh* de *gateway single channel* localizada em um ambiente rural, que otimizem a taxa de transmissão de cada dispositivo sem ultrapassar um limite máximo de consumo energético estabelecido.

Primeiramente, definiu-se um cenário único de simulação, com o propósito de criar um contexto para possibilitar a comparação de resultados dentre todos os métodos de escolha. Para isso, alguns parâmetros mais técnicos que compõe a simulação computacional foram definidos, sendo os principais destes parâmetros o ganho das antenas transmissoras, as distâncias de transmissão e o consumo energético máximo. Além disso, a definição das configurações do algoritmo genético utilizado também foi realizada.

Em seguida, realizou-se uma comparação de quatro variações do método proposto, sendo todas elas baseadas em algoritmos genéticos, porém assumindo diferentes valores para algumas variáveis típicas de um AG, como o tamanho da

população inicial e o número máximo de gerações, por exemplo. Para tal cenário, comparou-se o desempenho de cada variante em relação às médias da taxa de transmissão oferecidas pelo conjunto de parâmetros gerado por cada uma delas, do consumo energético demandado para realizar a transmissão do pacote de dados e do tempo de processamento obtido por *end node*, além de calcular o desvio-padrão para cada situação e um intervalo de confiança de 95% (apenas para a taxa de transmissão e para o tempo de processamento).

Como resultado deste primeiro cenário, escolheu-se a primeira variante como o método baseado em algoritmos genéticos proposto, baseada em uma configuração mais simples, com menores valores de tamanho de população e número de gerações, e que utiliza o método da roleta como procedimento de seleção. Este resultado foi baseado no desempenho alto desta variação em otimizar a taxa de transmissão ao escolher o conjunto de parâmetros LoRa, além de realizar tal tarefa em um tempo consideravelmente menor do que as duas variantes mais complexas.

Em seguida, comparou-se o método proposto com os dois métodos de referências considerados, sendo estes a seleção aleatória e a seleção aleatória repetida. De uma forma similar ao contexto anterior, o desempenho de cada técnica foi avaliado de acordo com o valor médio da taxa de transmissão, consumo energético e tempo de processamento obtido, e, desta vez, realizando o cálculo do desvio-padrão e de um intervalo de confiança de 95% para as três variáveis. Com as execuções dos três métodos, observou-se que o método proposto baseado em algoritmos genéticos apresentou uma escolha de parâmetros de transmissão LoRa que ofereceu a maior taxa de transmissão média dentre as opções, o menor consumo energético e um dos menores tempos de processamento, escolhendo em todas as execuções o mesmo par de conjunto de parâmetros de transmissão LoRa para a rede, o qual oferece uma taxa de transmissão somada de 14062,5 bps.

8 CONCLUSÕES GERAIS

A comunicação LoRa vem sendo cada vez mais utilizada em ambientes rurais, principalmente em aplicações relacionadas ao monitoramento climático, monitoramento de máquinas agrícolas e ao controle de pivôs de irrigação. Para um melhor aproveitamento dessa tecnologia em áreas extensas como são os ambientes deste tipo, torna-se conveniente utilizar as redes LoRa *Mesh*, a fim de aumentar a cobertura e o adensamento da rede, ganhos estes justificados pelo modo de operação da topologia de malha. E para se obter resultados satisfatórios com essa implementação, é necessário configurar os parâmetros de transmissão dos dispositivos utilizados de uma forma eficiente, considerando alcançar taxas de transmissão satisfatórias sem gerar um alto consumo energético.

Diante desse contexto, este trabalho apresentou um método de seleção de parâmetros de transmissão de uma rede LoRa *Mesh*, implementada em um ambiente rural, capaz de otimizar a taxa de transmissão sem ultrapassar um determinado limite de consumo energético. O algoritmo desenvolvido foi submetido a 100 execuções, para ser avaliado e comparado com mais dois métodos de referência em relação à capacidade de cumprir o objetivo proposto e ao tempo de processamento.

A partir da obtenção dos resultados apresentados e da realização das análises dos mesmos, notou-se que o método proposto, baseado em algoritmos genéticos, apresentou um melhor desempenho do que os outros dois métodos de referência considerados, em relação à otimização da taxa de transmissão e redução do consumo energético. Além disso, o tempo de processamento utilizado pela alternativa proposta pelo trabalho foi inferior quando comparado com a seleção aleatória repetida, método de referência o qual apresentou o melhor resultado dentre os dois considerados.

Além disso, foi possível observar que o método desenvolvido foi o único dentre os avaliados capaz de escolher a configuração LoRa que possibilita a maior taxa de transmissão possível para o cenário considerado em todas as execuções, apresentando um desvio-padrão nulo em relação a esta variável. Tal característica consegue expor a alta precisão e repetibilidade que o método em questão possui ao escolher o conjunto de parâmetros de transmissão de uma rede LoRa *Mesh*, considerando a otimização da taxa de transmissão dos *end nodes* da mesma.

Outro ponto observado é o impacto gerado ao utilizar o modelo de perda de caminho para ambientes rurais desenvolvido, notado pela grande diferença de

comportamento apresentada entre o mesmo, o modelo de propagação no espaço livre e o modelo Okumura-Hata, como pôde ser observado na FIGURA 19, encontrada na Seção 4.4. Ao analisar os resultados obtidos, notou-se que o modelo desenvolvido baseado no padrão log-distância apresentou uma diferença considerável na atenuação do sinal em relação às outras duas referências em toda a faixa de distância avaliada, fazendo com que os valores de SNR sejam diretamente afetados. Com isso, o processo de escolha dos parâmetros de transmissão LoRa através dos métodos simulados, os quais utilizam o cálculo da relação sinal-ruído em alguns de seus passos, tornam-se mais fiéis à realidade, aumentando a representatividade e a confiabilidade de tais métodos.

Alinhada com os resultados obtidos, a principal contribuição deste trabalho está na elaboração de um método capaz de definir de forma eficiente os parâmetros de transmissão de uma rede LoRa *Mesh* de *gateway single channel* para ambientes rurais, proposta a qual não havia sido desenvolvida e/ou contemplada, de acordo com a revisão bibliográfica apresentada na Seção 6.1. Ainda sobre o método, após analisar os resultados obtidos, constatou-se que o mesmo é capaz de otimizar a taxa de transmissão da rede em questão com uma alta precisão e repetibilidade, obedecendo o limite máximo de consumo energético pré-determinado. Tal característica é de extrema pertinência para aplicações situadas em ambientes rurais, uma vez que, em muitos casos os transmissores deste tipo de cenário se encontram em locais pouco povoados e pouco acessíveis, o que dificulta a realização de ações muitas vezes necessárias para garantir o funcionamento pleno do dispositivo, como uma reconfiguração de parâmetros ou uma substituição de bateria, por exemplo.

Por fim, como trabalhos futuros, pretende-se adaptar o método proposto baseado em algoritmos genéticos para outros ambientes, como o meio urbano por exemplo, através do desenvolvimento de modelos de perda de caminho específicos para outros tipos de cenários, a fim de se obter um método mais generalizado que possa atender ainda mais variedades de aplicações de redes LoRa.

REFERÊNCIAS

- ADELANTADO F. et al. **Understanding the Limits of LoRaWAN**. IEEE Communications Magazine, vol. 55, 2017. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>
- AUGUSTIN, A. et al. **A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things**. Sensors, vol. 16, 2016. <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- BOR, M.; VIDLER, J.; ROEDIG, U. **LoRa for the Internet of Things**. International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, 2016.
- BOUGUERA, T. et al. **Energy Consumption Model for Sensor Nodes Based on LoRa and LoRaWAN**. Sensors, vol. 18, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18072104>
- CHALL, R. E.; SAMER, L.; HELOU, M. E. **LoRaWAN Network: Radio Propagation Models and Performance Evaluation in Various Environments in Lebanon**. IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, 2019. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2906838>
- CHIRP spread spectrum. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chirp_spread_spectrum#cite_ref-1>. Acesso em 29 jun. 2021.
- COLEY, D. A. **An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**. World Scientific Publishing, 1999. <https://doi.org/10.1142/3904>
- COTRIM, J. R.; KLEINSCHMIDT, J. H. **LoRaWAN Mesh Networks: A Review and Classification of Multihop Communication**. Sensors, vol. 20, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154273>
- CUOMO, F. et al. **EXPLoRa: EXtending the Performance of LoRa by suitable spreading factor allocations**. IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2017. <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2017.8115779>
- DAGRES, I. et al. **Radio Environmental Maps: Information Models and Reference Model**. FARAMIR, 2011.
- DOSHI, J.; PATEL, T.; BHARTI, S. **Smart Farming using IoT, a solution for optimally monitoring farming conditions**. Procedia Computer Science, vol. 160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.016>
- GARG, P. **Performance Evaluation of a LoRaWAN Towards Development of an Optimised ADR (Adaptive Data Rate) Model**. Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology. Delft, 2019.
- GOOGLE EARTH PRO. Coordenadas 18° 28' S e 49° 00' O. Consulta realizada em 17 fev. 2021.

HATA, M. **Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services**. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 29, 1980. <https://doi.org/10.1109/T-VT.1980.23859>

IKEDA, P. A. **Introdução aos Algoritmos Genéticos**. Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

JORKE, P. et al. **Urban Channel Models for Smart City for IoT - Networks Based on Empirical Measurements of LoRa-links at 433 and 868 MHz**. IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications, 2017. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292708>

KAYA, Y.; UYAR, M.; TEKIN, R. **A Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover**. Computing Research Repository, 2011.

KIM, S.; LEE, H.; JEON, S. **An Adaptive Spreading Factor Selection Scheme for a Single Channel LoRa Modem**. Sensors, vol. 20, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20041008>

KOWALSKI, J. **Receiver Sensitivity/Noise**. Department of Physics and Astronomy, University of Hawai'i. Manoa, 2007.

KUROSE, J.; ROSS, K. **Redes de Computadores e a Internet: uma Abordagem Top-down**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

LATHI, B. P.; DING, Z. **Modern Digital and Analog Communication Systems**. 4. ed. Oxford: Oxford University Press, 2010.

LIANDO, J. C. et al. **Known and Unknown Facts of LoRa: Experiences from a Large Scale Measurement Study**. ACM Transactions. Sensor Networks, vol. 15, 2019. <https://doi.org/10.1145/3293534>

LIAO, C. et al. **Multi-Hop LoRa Networks Enabled by Concurrent Transmission**. IEEE Access, vol. 5, 2017. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2755858>

LIBRARY - What are LoRa and LoRaWAN? Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. Acesso em 24 jun. 2021.

LoRa Alliance. **A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN**. 2015.

LoRa Alliance. **LoRaWAN 1.0.3 Specification**. 2018.

LoRa Alliance. **RP002 - 1.0.0 LoRaWAN Regional Parameters**. 2019.

LORA PHY: What is LoRa? Disponível em: <https://www.semtech.com/lora/what-is-lora>. Acesso em 15 jul. 2020.

LORA READ THE DOCS. Disponível em: <https://lora.readthedocs.io/en/latest/#range-vs-power>. Acesso em 13 mai. 2020.

LORA/LORAWAN TUTORIAL 15: Data Rate, Chip Rate, Symbol Rate, Chip Duration and Symbol Duration. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=r84GMLeiqg8>>. Acesso em 15 mai. 2020.

LULU, A.; MOBASSERI, B. **Dual-Use Chirp Spread Spectrum Waveform With Ranging Capability**. IEEE Radar Conference, 2019. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2019.8835752>

MASADAN, N.; HABAEBI, M. H.; YUSOFF, S. H. **LoRa LPWAN Propagation Channel Modelling in IIUM Campus**. 7th International Conference on Computer and Communication Engineering, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2018.8539327>

MILLER, B. L.; GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms, Tournament Selection, and the Effects of Noise. Complex Systems Publications, vol. 9, 1995.

MOLISCH, A.F. **Wireless Communications**. 2. ed. Chichester: John Wiley and Sons, 2011.

ORTIZ, F. M. **Análise de Desempenho de uma Rede Sem-Fio de Baixa Potência e Longo Alcance Para a Internet das Coisas**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

PANCHAL, G. et al. **Solving NP hard Problems using Genetic Algorithm**. International Journal of Computer Science and Information Technologies, vol. 6, 2015.

POPULATION Based Metaheuristics. Disponível em: <<https://slideplayer.com/slide/17133191/>>. Acesso em 12 mai. 2021.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

ROEDIG, U.; BOR, M. C. **LoRa Transmission Parameter Selection**. DCOSS, 2017.

SANDOVAL, R. M.; SANCHEZ, A. J.; HARO, J. G. **Performance optimization of LoRa nodes for the future smart city/industry**. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2019, 2019. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1522-1>

SEMTECH. AN1200.22: **LoRa Modulation Basics**. 2015.

SEMTECH. LORAWAN: **Simple Rate Adaptation Recommended Algorithm**. 2016.

SEMTECH. **SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver Datasheet**. 2017.

SEMTECH. **SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver Datasheet**. 2016.

SEYE, M. R. et al. **A Study of LoRa Coverage: Range Evaluation and Channel Attenuation Model**. 1st International Conference on Smart Cities and Communities, 2018. <https://doi.org/10.1109/SCCIC.2018.8584548>

SHENG, Z. et al. **A Survey on The IETF Protocol Suite for The Internet-of-Things: Standards, Challenges and Opportunities**. IEEE Wireless Communications, vol. 20, 2013. <https://doi.org/10.1109/MWC.2013.6704479>

TOMASSINI, M. **A Survey of Genetic Algorithms**. Centro Svizzero di Calcolo Scientifico, Manno e Laboratoire de Systèmes Logiques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1995.

TRIANAFYLLOU, A. et al. **Leveraging fairness in LoRaWAN: A novel scheduling scheme for collision avoidance**. Computer Networks, vol.186, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107735>

WHAT Makes LoRaWAN Mesh a Great Smart Home and City Solution? Disponível em: <<https://lebergsolutions.com/blog/what-makes-lorawan-mesh-great-smart-home-and-city-solution>>. Acesso em 16 jun. 2021.

ZINI, E. O. C.; NETO, A. B.; GARBELINI, E. **Algoritmo Multiobjetivo para Otimização de Problemas Restritos Aplicados a Indústria**. Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, 2014. <https://doi.org/10.5151/mathpro-cnmai-0064>

APÊNDICE A – CÓDIGO DA FUNÇÃO “CALCULAR VAZÃO CONSUMO”

```

def calcularVazaoConsumo(SF_1, CR_1, pot_tx_1, BW_1, SF_2, CR_2, pot_tx_2,
BW_2, ruido, tamanhos_pacote, env, perdas_por_distancia):

    SNR_1 = []
    SNR_2 = []

    ToA_1 = env.calcular_time_on_air(tamanhos_pacote[1], SF_1, CR_1, BW_1)
    ToA_2 = env.calcular_time_on_air(tamanhos_pacote[2], SF_2, CR_2, BW_2)

    for i in range(len(perdas_por_distancia)):
        SNR_1.append(pot_tx_1 - ruido - perdas_por_distancia[i] + Gt + Gr)
        taxa_transmissao_1 = env.calcular_taxa_de_transmissao(SF_1, CR_1, BW_1)
        consumo_1 = env.calcular_corrente_consumida_por_pacote(ToA_1, pot_tx_1)
        * tensao_modulo# em Joules

    for i in range(len(perdas_por_distancia)):
        SNR_2.append(pot_tx_2 - ruido - perdas_por_distancia[i] + Gt + Gr)
        taxa_transmissao_2 = env.calcular_taxa_de_transmissao(SF_2, CR_2, BW_2)
        consumo_2 = env.calcular_corrente_consumida_por_pacote(ToA_2, pot_tx_2)
        * tensao_modulo# em Joules

    if(tamanhos_pacote[1] == tamanhos_pacote[2]):
        vazao = (taxa_transmissao_1 / (8 * tamanhos_pacote[1])) +
        (taxa_transmissao_2 / (8 * tamanhos_pacote[2]))# em pacotes/segundo
    else:
        vazao = taxa_transmissao_1 + taxa_transmissao_2# em bps

    consumo = consumo_1 + consumo_2

    return vazao, consumo, SNR_1, SNR_2

```

APÊNDICE B – CÓDIGO DA FUNÇÃO “CALCULAR PERDA POR DISTÂNCIA”

```
def calcularPerdaPorDistancia(distancia, tipo):  
    if tipo == 'fs':  
        perda = 32.44 + 20*log(frequencia_portadora, 10) +  
            20*log(distancia, 10) # FSPL  
        print('Perda espaço livre: {}'.format(perda))  
    if tipo == 'log':  
        perda = 101.68679031699223 + 10 * 2.1247788637254827 *  
            log(distancia/0.1, 10) # Perda por log-distância  
        print('Perda log-distância: {}'.format(perda))  
    return perda
```