UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

MATHEUS ARAÚJO GAVA

OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS EM REDES DE SENSORES LORA/LORAWAN

VITÓRIA
2020

MATHEUS ARAÚJO GAVA

OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS EM REDES DE SENSORES LORA/LORAWAN

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Matheus Araújo Gava**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Helder R. de O. Rocha
Coorientador: Prof. Dr. Jair A. L. Silva

VITÓRIA
2020

MATHEUS ARAÚJO GAVA

OTIMIZAÇÃO DE RECURSOS EM REDES DE SENSORES LORA/LORAWAN

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Matheus Araújo Gava**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 14 de dezembro de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Dr. Helder R. de O. Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Dr. Jair A. L. Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

_____

Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

_____

Msc. Menno Jan Faber
2Solve
Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado sabedoria e motivação para que eu superasse os obstáculos da vida e desenvolvesse este trabalho.

Agradeço aos meus pais, irmã e minha namorada Rosany que me apoiaram e me incentivaram durante esta caminhada, me dando força e tendo paciência e compreensão por todo o tempo tomado por esta etapa da minha vida.

Agradeço também ao meu orientador e coorientador, Helder Rocha e Jair Silva, pela dedicação, empenho e paciência, e por terem compartilhado comigo seus conhecimentos ao longo deste projeto de graduação.

Agradeço a todos os professores da Universidade Federal do Espírito Santo, em especial aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, pela oportunidade de continuar aprendendo e proporcionado a conquista desta nova etapa em minha vida.

Agradeço também o apoio dos projetos Pronex (Programa de Apoio aos Núcleos de Excelência) e NEsT-5G (Núcleo de Estudos em Tecnologias Emergentes para 5G), que são financiados pela Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Espírito Santo e em parte pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Agradeço a todos os amigos e parceiros de caminhada que fizeram essa jornada ser mais leve.

RESUMO

O paradigma da Internet das Coisas apresenta-se como o próximo futuro da Internet. As aplicações neste novo cenário exigem que dispositivos operem de maneira confiável e por um longo período. Sendo assim, surgem tecnologias de redes de longa distância e de baixa potência (LPWAN, do inglês *low-power wide area network*), como as LoRaWAN. Um dispositivo LoRa pode ser configurado para usar diferentes parâmetros, sendo eles: fator de espalhamento (SF, do inglês *spreading factor*), largura de banda, taxa de codificação e potência de transmissão, resultando em mais de 6720 configurações possíveis. Dado o grande número de combinações, é um desafio determinar uma configuração adequada, pois sempre haverá um conflito na escolha dos parâmetros. Desta forma, este projeto de graduação propõe o desenvolvimento de uma metodologia para a otimização de recursos em redes de sensores LoRa/LoRaWAN, utilizando a metaheurística de busca em vizinhança variável (VNS, do inglês *variable neighbourhood search*) e um algoritmo de árvores geradoras de custo mínimo, de forma a minimizar os custos de implementação e manutenção, satisfazendo as exigências do projeto da rede. Considerou-se na modelagem da rede a existência de um dispositivo retransmissor de sinais LoRa. Este mostrou-se bastante interessante para o aumento da cobertura da rede na área de estudo. Parâmetros como fator de espalhamento, largura de banda e potência de transmissão puderam ser otimizados visando ao objetivo de reduzir a energia por bit útil total da rede e o tempo total de coleta de dados. Os resultados obtidos pelo algoritmo de otimização proposto foram avaliados em relação aos seguintes fatores: consumo de energia média por bit útil, potência de transmissão média, taxa de transmissão média, número de *time slots* médios e a função objetivo. Pelos resultados analisados, foi possível concluir sobre a importância do parâmetro *SF* no *trade-off* entre energia por bit útil e *Time on Air*, sendo este último relacionado com o escalamento dos dispositivos. Notou-se que, para redes com poucos dispositivos associados, teve-se a preferência pelo uso de *SF* menores, visando uma redução no consumo de energia por bit útil, sendo *SF* maiores apenas usados quando a ampliação do alcance das redes era requisitada. Já para redes com maiores número de nós, o escalonamento dos dispositivos no tempo começou a ser um fator relevante a ser levado em conta pela função objetivo, fazendo com o número de *time slots* por *SF* fosse distribuído de forma igualitária, para que o tempo total de coleta dos dados não fosse prejudicado.

Palavras-chave: Internet das Coisas. LoRa. LoRaWAN. Metaheurística. Otimização.

ABSTRACT

The Internet of Things paradigm presents itself as the future of the Internet. Applications in this new scenario require devices to operate reliably for a long time. Therefore, long distance and low power network technologies emerge, like LoRaWAN. A LoRa device can be configured to operate various parameters, namely: spreading factor (SF), bandwidth (BW), coding rate (CR) and transmission power, resulting in more than 6720 possible configurations. Given the considerable number of combinations, it is a challenge to determine an appropriate configuration, as there will inevitably have a conflict in the choice of parameters. In this way, this undergraduation project proposes the development of a methodology for the optimization of resources in LoRa/LoRaWAN sensor networks using the Variable Neighbourhood Search metaheuristic and a minimal spanning tree algorithm to minimize the costs of implementation and maintenance, satisfying the requirements of the network design. In the network modeling, the existence of a LoRa signal relaying device was considered. This proved to be quite interesting for increasing the network coverage in the study area. Parameters such as spreading factor, bandwidth and transmission power could be optimized to reduce the energy per total useful bit of the network and the total data collection time. The results obtained by the proposed optimization algorithm were evaluated in relation to the following factors: average energy consumption per useful bit, average transmission power, average transmission rate, average number of time slots and the objective function. From the results analyzed, it was possible to conclude about the importance of the SF parameter in the trade-off between energy per useful bit and Time on Air, the latter being related to the scaling of the devices. It was noted that for networks with few associated devices preference is given to the use of smaller SFs aiming at a lower energy consumption per useful bit, larger SFs only used when greater network reach is required. For networks with a larger number of nodes the scaling in time of the devices begins to be a relevant factor taken into account by the objective function, making the number of time slots per SF to be distributed equally, so that the total collection time data is not harmed.

Keywords: Internet of Things. LoRa. LoRaWAN. Metaheuristic. Optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Uma taxonomia para aplicações de redes de sensores sem fio 19
Figura 2 – Aplicações da tecnologia LPWAN em diferentes setores..... 20
Figura 3 – Pilha de comunicação do LoRAWAN 21
Figura 4 – Arquitetura de redes LoRaWAN..... 22
Figura 5 – Diferentes classes LoRaWAN..... 24
Figura 6 – Estrutura de um pacote LoRa..... 27
Figura 7 – Busca de ótimos locais em diferentes estruturas de vizinhança..... 33
Figura 8 – Algoritmo *Basic* VNS 33
Figura 9 – Função de busca local do algoritmo BVNS 34
Figura 10 – Função de mudar a vizinhança do algoritmo BVNS..... 35
Figura 11 – Algoritmo de Prim que encontra uma árvore de espalhamento mínimo dado um grafo..... 36
Figura 12 – Árvore de extensão mínima (em verde) para o grafo considerado 36
Figura 13 – Representação geográfica dos pontos alocados na região de estudo 38
Figura 14 – (a) Folder de apresentação do dispositivo 2Sense e (b) Múltiplos modos de comunicação implementados no dispositivo 2Sense..... 40
Figura 15 – Estrutura da rede proposta para a otimização de recursos 41
Figura 16 – Árvore de extensão mínima encontrada pelo Algoritmo de Prim..... 43
Figura 17 – Solução inicial encontrada pelo Algoritmo Prim em sua disposição geográfica .. 43
Figura 18 – Descrição do algoritmo de otimização proposto..... 46
Figura 19 – Solução ótima para os pontos alocados como na Figura 13, em sua representação como árvore 49
Figura 20 – Solução ótima para os pontos alocados como na Figura 13, em sua representação geográfica 50
Figura 21 – Tempo médio de execução do algoritmo para os diferentes casos de análise 52
Figura 22 – Energia por bit útil média total da rede para os diferentes casos de análise 53
Figura 23 – Relação exponencial da energia por bit útil média total da rede para os diferentes casos de análise..... 53
Figura 24 – Potência de transmissão média normalizada da rede para os diferentes casos de análise 55
Figura 25 – Taxa de transmissão média em bit/s para os diferentes casos de análise..... 56
Figura 26 – Número de time slots por *SF* no escalonamento referente à comunicação..... 57

Figura 27 – Número de time slots médios por SF no escalonamento referente à comunicação entre retransmissores e gateway, separados pelo número de nós da rede. Em (a) Rede 1, (b) Rede 2, (c) Rede 3 58
Figura 28 – Evolução da função objetivo no decorrer das gerações, separadas por cada uma das repetições do algoritmo. Em (a) N10 – Rede 3, (b) N30 – Rede 3, (c) N50 – Rede 3, (d) N80 – Rede 3, (e) N100, – Rede 3, (f) N250 – Rede 3..... 59
Figura 29 – Evolução da função objetivo no decorrer das gerações, separadas pelos números de nós da rede. Para cada tamanho de rede, escolheu-se aleatoriamente uma das repetições da execução da instância. Em (a) Rede 1, (b) Rede 2, (c) Rede 3..... 60
Figura 30 – Evolução da função objetivo no decorrer das gerações, separadas em Rede 1, Rede 2 e Rede 3. Para cada Rede, escolheu-se aleatoriamente uma das repetições da execução da instância. Em (a) N10, (b) N30, (c) N50, (d) N80, (e) N100, (f) N250..... 61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Valores de SNR mínimo requeridos para a decodificação de uma mensagem dado o SF 45
Quadro 2 – Principais parâmetros utilizados pelo algoritmo de otimização 48
Quadro 3 – Características dos cenários analisados 51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BVNS	*Basic Variable Neighbourhood Search*
BW	*Bandwidth*
CF	*Central Frequency*
CR	*Coding Rate*
CRC	*Cyclic Redundancy Check*
CSS	*Chirp Spread Spectrum*
EMS	*Energy Management System*
FEC	*Forward Error Correction*
IoT	*Internet of Things*
ISM	*Indutrial Scientific and Medical*
LabTel	Laboratório de Telecomunicações
LoRaWAN	*Long Range Wide Area Network*
LPWAN	*Low-Power Wide Area Network*
MAC	*Media Access Control*
MST	*Minimum Spanning Tree*
NFC	*Near Field Communications*
RSSF	Redes de Sensores Sem Fio
SF	*Spreading Factor*
ToA	*Time on Air*
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VNS	*Variable Neighbourhood Search*
WSN	*Wireless Sensor Network*

LISTA DE SÍMBOLOS

N_p	Número de símbolos no preâmbulo
N_h	Número de símbolos no cabeçalho
$N_{payload}$	Número de símbolos no *payload*
P_{tx}	Potência de transmissão (dBm)
R_{bit}	Taxa nominal de transmissão de *bits* (*bits*/s)
PL	Carga útil do pacote (*bytes*)
T_{packet}	Duração do pacote (s)
$T_{preamble}$	Duração do preâmbulo (s)
T_{symbol}	Duração do símbolo (s)
$T_{payload}$	Duração da carga útil (s)
E_{bit}	Energia por bit útil (J)
h_t	Altura da antena transmissora (m)
h_r	Altura da antena receptora (m)
L_{urbano}	Atenuação do sinal em áreas urbanas (dB)
f	Valor da frequência central de transmissão (MHz)
d	Distância entre o dispositivo transmissor e receptor (km)
$L_{suburbano}$	Atenuação do sinal em áreas suburbanas (dB)
L_{rural}	Atenuação do sinal em áreas rurais ou abertas (dB)
L_{path}	Atenuação do sinal em um caminho (dB)
$G_{sistema}$	Ganho total do sistema (dBi)
P_{rx}	Potência de recepção (dBm)
S	Sensibilidade (dBm)
NF	*Noise Figure* (dB)
SNR	*Signal-to-Noise Ratio* (dB)
$iter_{max}$	Número máximo de iterações do algoritmo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Justificativas 15
1.2 Objetivos 16
1.2.1 Objetivo Geral 16
1.2.2 Objetivos Específicos 16

2 REFERENCIAL TEÓRICO 17
2.1 Internet das Coisas 17
2.2 *Low-Power Wide Area Networks* 19
2.3 LoRaWAN 21
2.3.1 Topologia da Rede 22
2.4 LoRa 24
2.4.1 Parâmetros de Configuração 25
2.4.2 Estrutura dos Pacotes 27
2.4.3 Modelo do Consumo de Energia 28
2.5 Modelos de Simulação 29
2.6 Modelo de Okumura-Hata 29
2.7 Método de Busca em Vizinhança Variável 31
2.7.1 *Basic* VNS 32
2.8 *Minimum Spanning Tree* 35

3 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO 37
3.1 Definição do Escopo de Estudo 37
3.2 Modelagem da Rede 39
3.3 Definindo uma Solução Inicial 42
3.4 Implementação da Metodologia de Otimização de Recursos 45
3.4.1 O Algoritmo de Otimização 45
3.4.2 Estruturas de Vizinhança 47
3.4.3 Saída do Algoritmo de Otimização 48

4 RESULTADOS 51
4.1 Casos de Estudo 51
4.2 Avaliação do Consumo de Energia por Bit, Potência de Transmissão e Taxa de Transmissão 52
4.3 Avaliação do Escalonamento dos Dispositivos 57
4.4 Avaliação da Função Objetivo 58

5 CONCLUSÕES 62

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64

1 INTRODUÇÃO

O paradigma da internet das coisas (IoT, do inglês *internet of things*) se apresenta como o próximo futuro da Internet. O objetivo é fornecer a qualquer objeto a capacidade de se conectar à rede e se comunicar com outros objetos, que variam de carros a animais, plantas, etc. (KHUTSOANE; ISONG; ABU-MAHFOUZ, 2017). No contexto de cidades inteligentes, esse paradigma tem impulsionado a experimentação e análise de infraestruturas urbanas que permitam a inovação em sistemas de mobilidade, energia e saúde para servir a população (SCHAFFERS et al., 2011).

Com volumes gigantescos de dados e em ambientes cada vez mais conectados e repletos de métricas, a IoT vem conquistando seu espaço, conduzindo especialistas a anteciparem a conexão de mais de 50 bilhões de objetos até 2020 (EVANS, 2011). Além disso, economicamente falando, no Brasil, a estimativa é de 50 a 200 bilhões de dólares de impacto econômico anual em 2025 causado pelo uso da IoT (BNDES, 2017). Conforme essas previsões, a tendência é que a economia do país passe a ser fortalecida através dos avanços tecnológicos nessa área, por meio da melhora na prestação de serviços em geral e otimização dos processos de produção causados pelo uso de dispositivos conectados entre si (RABUSKE, 2017).

A comunicação é o ponto principal que conecta todos os sensores, atuadores, plataformas de gerenciamento e bancos de dados para formar as redes de IoT. As comunicações sem fio são a chave para fornecer conectividade a essas redes, trazendo benefícios em relação à mobilidade, além da facilidade em adicionar mais dispositivos à rede (KHAN et al., 2017). As variadas aplicações existentes no universo da IoT requerem diferentes parâmetros no planejamento de uma rede. Por exemplo, os transportes inteligentes exigem uma implantação de rede capaz de lidar com a mobilidade, assim como as cidades inteligentes necessitam da implantação de redes de longo alcance (KHUTSOANE; ISONG; ABU-MAHFOUZ, 2017).

As redes de sensores sem fio (WSN, do inglês *wireless sensor networks*) são uma das mais bem-sucedidas tecnologias usadas para implantações da IoT. As WSN apresentam-se como uma parte essencial deste ecossistema, permitindo a interconexão e a integração dos objetos do mundo físico com o ciberespaço. Estas redes constituem-se de sensores de baixa potência que são válidos como infraestrutura para uma implantação que servirá por mais tempo. No entanto,

mesmo com avanços da tecnologia, muitos desafios ainda são herdados devido às restrições dos nós sensores, tais como: capacidade de energia, capacidade computacional, largura de banda de comunicação, gerenciamento de rede e segurança (KHUTSOANE; ISONG; ABU-MAHFOUZ, 2017). As redes LPWAN (do inglês *low-power wide area networks*), tem como um de seus principais pilares atender ao desafio relacionado à capacidade de energia, sendo um tipo de rede de longo alcance e baixa potência.

As LPWAN definem uma categoria de comunicação sem fio que recentemente ganhou impulso significativo. Indústria, academia e organizações de desenvolvimento de padrões dedicaram esforços significativos às LPWAN nos últimos anos (CASALS et al., 2017; RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Essas tecnologias geralmente oferecem um alcance de *link* de um ou mais quilômetros, enquanto um único elemento da infraestrutura (geralmente chamado de *gateway*) é capaz de suportar centenas de milhares de dispositivos, como sensores e atuadores (CASALS et al., 2017).

Atualmente, há muitos avanços no desenvolvimento das LPWAN. Essas redes são implantadas para tratar uma parte dos desafios na IoT, por exemplo, em situações que a cobertura estendida é necessária, com baixo custo de implantação, envolvendo dispositivos com atraso tolerante, que não precisam de altas taxas de dados e requerem pouca energia para o funcionamento (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Entre as tecnologias LPWAN, as redes LoRaWAN (e sua modulação relacionada, LoRa) visam implantações em que os dispositivos finais têm energia limitada e que não precisem transmitir mais do que alguns *bytes* de cada vez (AUGUSTIN et al., 2016). A tecnologia LoRa opera nas bandas de frequência ISM (do inglês *industrial scientific and medical*), o que a torna uma solução atraente para a Internet das Coisas e sistemas máquina a máquina (MORIN et al., 2017; OLIVEIRA; GUARDALBEN; SARGENTO, 2017). Devido à sua modulação única, a LoRa utiliza-se de uma técnica muito versátil que pode ser adaptada a diferentes tipos de ambientes e classes de aplicações (BOR; ROEDIG, 2018).

Muitos dispositivos LoRaWAN, como sensores ou atuadores, normalmente serão operados por bateria. Sendo assim, as características das redes LoRaWAN exercem grande influência na determinação da vida útil da bateria desses dispositivos (BUYUKAKKASLAR et al., 2017;

KHUTSOANE; ISONG; ABU-MAHFOUZ, 2017). De fato, adaptando seus principais parâmetros e recursos, o uso da tecnologia LoRaWAN pode otimizar a energia consumida (BOUGUERA et al., 2018).

Um dos maiores desafios relacionados ao planejamento de redes de sensores sem fio é o desenvolvimento de técnicas que otimizem recursos, principalmente energia (SILVA et al., 2019). Nesse contexto, propõe-se o desenvolvimento de uma metodologia para otimização de parâmetros LoRaWAN, como o fator de espalhamento, largura de banda e potência de transmissão. Um dispositivo retransmissor LoRa, ainda não existente no mercado, é modelado e utilizado no algoritmo de otimização, de forma a mostrar uma possível aplicabilidade do mesmo no aumento do alcance das redes.

Sendo assim, este documento está organizado da seguinte forma: ainda nesta seção introdutória, serão apresentadas as justificativas para a realização de tal trabalho bem como a definição dos objetivos gerais e específicos. Na seção referente ao desenvolvimento, inicialmente será tratado todo o referencial teórico necessário para o entendimento e realização deste trabalho. Também é discutido a metodologia e etapas de desenvolvimento adotadas. Em seguida, na seção de resultados, será mostrado os casos de estudo e as métricas utilizadas para avaliação do algoritmo de otimização, bem como a discussão de seus resultados pertinentes. Por fim, são apresentadas as conclusões deste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

1.1 Justificativas

As tecnologias LoRa e LoRaWAN são padrões relativamente recentes (AUGUSTIN et al., 2016). A maioria das pesquisas existentes baseadas nestas tecnologias se concentraram em recursos como atraso, alcance, taxa de transferência de dados e capacidade da rede (AUGUSTIN et al., 2016; NOLAN; GUIBENE; KELLY, 2016; BOR; ROEDIG, 2018). Como a LoRa é implantada para aplicações em sensores, vários trabalhos avaliaram o uso desta tecnologia em relação ao seu consumo de energia. A seleção de parâmetros de comunicação em transmissores sem fio para reduzir o consumo de energia é uma área bastante pesquisada (BOR; ROEDIG, 2018). No domínio de redes de sensores sem fio, várias pesquisas investigaram o controle da potência de transmissão para reduzir o consumo de energia (ARES et al., 2007; CORREIA; NOGUEIRA, 2008; LIN et al., 2016). Nestes artigos, os autores descreveram

estratégias para gerenciar efetivamente a energia de um nó sensor em aplicações de rede de sensores sem fio. No entanto, o módulo de radiofrequência utilizado nesses estudos não incluiu a tecnologia LoRa.

Bor e Roedig (2018) apresentaram um primeiro passo para projetar um mecanismo automatizado para a seleção de parâmetros de transmissão LoRa. As especificações desta tecnologia descrevem um componente gerenciador de rede responsável por hospedar esse mecanismo de seleção de configuração, mas os detalhes da implementação não são fornecidos. Dada a falta desse mecanismo, as implantações atuais de LoRa usam configurações estáticas de parâmetros de transmissão para garantir alta confiabilidade, porém podem consumir uma energia maior do que a necessária.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para a otimização de recursos em uma rede de sensores LoRa/LoRaWAN de forma a minimizar os custos de implementação e manutenção, satisfazendo as exigências do projeto da rede.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral descrito, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Avaliar experimentalmente o desempenho da escolha dos parâmetros de configuração da tecnologia LoRa na transmissão entre um *end-device*, retransmissor e um *gateway*;
- Desenvolver um modelo de simulação em Matlab da conectividade entre um *end-device*, retransmissor e um *gateway*;
- Implementar um algoritmo de otimização de recursos em redes LoRa/LoRaWAN a partir de técnicas em grafos e metaheurísticas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção servirá como base teórica para o projeto a ser desenvolvido. Nela são levantadas informações sobre Internet das Coisas, uma das principais aplicações das redes LPWAN. Será abordado o funcionamento das LoRaWAN e as características da tecnologia LoRa que são relevantes para o entendimento da proposta. Por fim, um estudo sobre os modelos e algoritmos que serão utilizados no projeto, são eles: o modelo de predição de cobertura de Okumura-Hata, a metaheurística pesquisa de vizinhança variável (VNS, do inglês *variable neighborhood search)* e a técnica em grafos árvore de extensão mínima (MST, do inglês *minimum spanning tree*).

2.1 Internet das Coisas

A Internet das Coisas advém da evolução da tecnologia de comunicação máquina-máquina que, através da interconexão das "coisas" ou objetos inteligentes, visa enfatizar, além da monitoração e controle, os processos de otimização e autonomia (PEREIRA; CARVALHO, 2017). A ideia básica do conceito IoT é a presença ubíqua de uma variedade de objetos, como etiquetas de identificação por radiofrequência, sensores, atuadores e telefones celulares que, por meio de esquemas de endereçamento exclusivos, são capazes interagir uns com os outros e cooperar com seus vizinhos para alcançar objetivos comuns (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

Os objetos inteligentes vêm ocupando cada vez mais um espaço permanente na vida das pessoas. Estima-se que em 2025 terá mais de 100 milhões de objetos conectados no Brasil, comparado a apenas 20 milhões em 2015, devido à diminuição de barreiras de implementação. É esperado que a implementação da IoT no cotidiano irá mudar pessoas e empresas e a forma como interagem com o mundo virtual, pelo aumento do número de informações disponíveis, incremento da produtividade e redução de custos global (PEREIRA; CARVALHO, 2017).

A revolução da IoT oferece um enorme valor potencial em termos de maior eficiência, sustentabilidade e segurança para a indústria e a sociedade (OCHOA et al., 2017). A Internet das Coisas emergiu dos avanços de várias áreas, como sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento. De fato, a IoT tem recebido bastante atenção tanto da academia

quanto da indústria, devido ao seu potencial de uso nas mais diversas áreas das atividades humanas (SANTOS et al., 2016).

Do ponto de vista de um usuário particular, os efeitos mais óbvios da introdução à IoT serão visíveis nos campos de trabalho e doméstico. No contexto doméstico, domótica e *e-health* são apenas alguns exemplos de possíveis aplicações nas quais o paradigma desempenhará um papel importante. Da mesma forma, da perspectiva dos negócios, as consequências mais aparentes serão igualmente visíveis em campos como automação e manufatura industrial, logística, gestão de negócios e processos e transporte inteligente de pessoas e bens (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

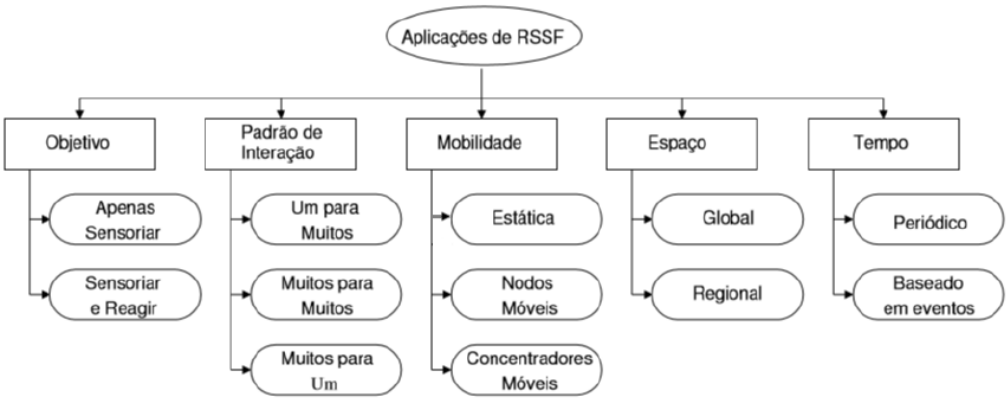
Atualmente, uma das grandes aplicações para internet das coisas são as redes de sensores sem fio (RSSF) (MICHEL; SANT, 2017). As RSSF são compostas por nós sensores que transmitem dados sem fio. Os nós sensores são espalhados em um ambiente para monitorar os fenômenos físicos específicos, como temperatura, umidade, luz, pressão. Esses nós têm muitas vantagens em comparação com as tecnologias de sensores com fio: tamanho compacto, recurso de mobilidade, facilidade de instalação e baixo consumo de energia (AKYILDIZ et al., 2002).

Como o conceito de IoT não define um padrão ou tecnologia específica para conectar os dispositivos à rede, existem muitas tecnologias disponíveis dependendo das circunstâncias. Para equipamentos próximos, no qual as distâncias envolvidas podem ser de metros a centenas de metros, a rede pode ser obtida usando cabeamento, *Bluetooth*, *Wi-fi*, *Zigbee* ou outras tecnologias de médio-curto alcance. Se o sensoriamento for remoto e o cabeamento não for uma opção, e, se o equipamento ou os dados tiverem valor suficiente justificável, as conexões poderão ser feitas usando *modems* de rede móvel celular ou satélite. Entre essas possibilidades, há uma infinidade de oportunidades à medida que a expansão da rede máquina-máquina continua (WIXTED et al., 2017). Dessa forma, são inúmeras as aplicações para RSSF e muitas continuam a surgir, o que torna impossível generalizá-las em um único grupo.

Sendo assim, Mottola e Picco (2011) propuseram uma taxonomia para aplicações de RSSF em que classificaram diferentes redes de sensores sem fio com o objetivo de destacar as diferenças entre estas aplicações. Essa taxonomia pode ser visualizada na Figura 1. Portanto, a atribuição

da tecnologia para cada uma dessas combinações apresentadas na taxonomia deve ser feita de forma a facilitar o desenvolvimento de uma nova aplicação (MICHEL; SANT, 2017).

Figura 1 – Uma taxonomia para aplicações de redes de sensores sem fio



Fonte: Hoeller e Fröhlich (2010).

Diante desses diferentes cenários, várias tecnologias foram desenvolvidas e estão sendo estudadas em cada perspectiva, desde sistemas de comunicação com alcance extremamente curto, como *Near Field Communications* (NFC), passando por pequeno alcance, como *ZigBee* e 6LowPAN, até médio-longo alcance, como LoRa e *Sigfox* (CENTENARO et al., 2016).

Neste contexto de tecnologias, surge como nova categoria para comunicações de longo alcance, com principal uso para aplicações na IoT, as LPWAN.

2.2 *Low-Power Wide Area Networks*

As redes LPWAN representam um novo paradigma de comunicação, que complementará as tecnologias tradicionais de celular e curto alcance sem fio para atender às diversas aplicações de IoT (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Espera-se que seu mercado seja enorme. Aproximadamente um quarto do total de 30 bilhões de dispositivos IoT devem ser conectados à internet por meio de redes LPWAN, utilizando tecnologias proprietárias ou celulares (NOKIA, 2015).

Tecnologias LPWAN oferecem um conjunto exclusivo de recursos, incluindo conectividade de uma área ampla para dispositivos de reduzida potência e baixa taxa de dados. A Figura 2 destaca

a variedade de aplicações em diversos setores de negócios que podem explorar as tecnologias LPWAN para conectar seus dispositivos. Esses setores de negócios incluem, mas não limitados a cidades inteligentes, aplicativos pessoais de IoT, medição inteligente, logística, monitoramento industrial, agricultura e etc. (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Figura 2 – Aplicações da tecnologia LPWAN em diferentes setores

Fonte: Raza, Kulkarni e Sooriyabandara (2017).
Nota: Traduzido pelo autor.

As tecnologias LPWAN prometem conectar um grande número de dispositivos e sensores sem fio, geograficamente dispersos e a um baixo custo. Com requerimento de um alcance de vários quilômetros e uma longa duração de bateria, essa tecnologia tornou-se uma promissora alternativa com implantações em larga escala já em andamento em muitos lugares (POP et al., 2018).

Atualmente, uma das principais características das LPWAN é a operação em bandas não licenciadas, principalmente nas bandas ISM em 2,4GHz, 868/915 MHz, 433 MHz e 169 MHz, dependendo da região de operação. Suas camadas físicas são projetadas para terem alta sensibilidade no receptor, em torno de -150 dBm, quando comparada a outras tecnologias sem fio, que ficam em torno de -90 dBm até -125 dBm (CENTENARO et al., 2016). Isso permite que os dispositivos finais se conectem às estações base a distâncias que variam de 3 a 4 km, podendo chegar a 15 km, dependendo de seu ambiente de implantação (rural, urbano, etc.) (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

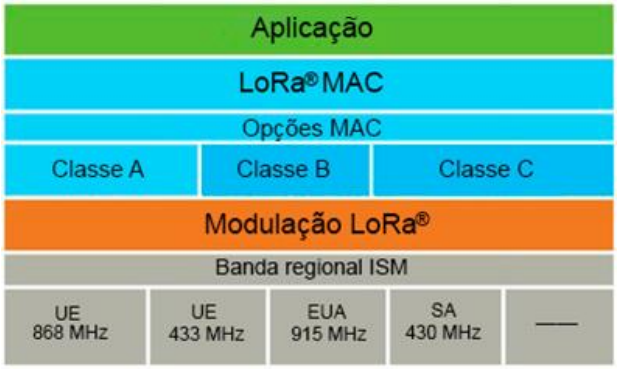
Nesse contexto, uma das tecnologias LPWAN mais populares atualmente são as LoRaWAN. Devido a facilidade em adquirir e implantar um *hardware*, estes tipos de redes estão recebendo mais atenção das comunidades de pesquisa.

2.3 LoRaWAN

O LoRaWAN foi um protocolo desenvolvido para superar os desafios de aplicações de IoT, possuindo como diferencial uma conectividade de longo alcance, além de um reduzido consumo de energia a custas de uma baixa taxa de dados. As redes LoRaWAN podem estabelecer conectividade de até 15 km em linha de visada, muito além do *Wi-Fi*, *ZigBee* e *Bluetooth*, com alcances de até 100 metros (CHEONG et al., 2017).

Por definição, o LoRaWAN estabelece um protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema para uma rede, enquanto a camada física LoRa permite o *link* de comunicação, desenvolvido pela Semtech (LORA ALLIANCE, 2015; NEUMANN; MONTAVONT; NOEL, 2016). Pode-se observar na Figura 3 a pilha de comunicação do LoRaWAN.

Figura 3 – Pilha de comunicação do LoRAWAN



Fonte: LoRa Alliance (2015).
Nota: Traduzido e adaptado pelo autor.

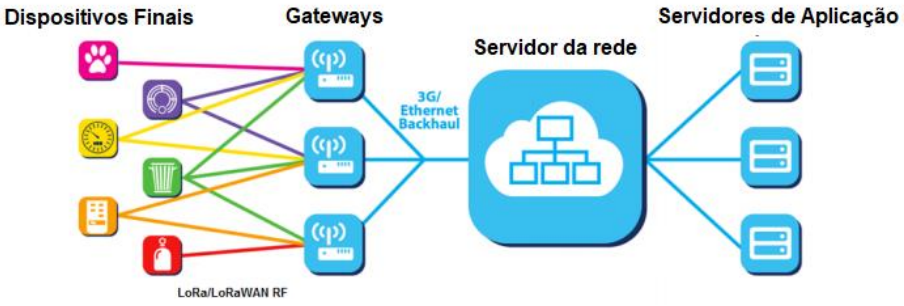
2.3.1 Topologia da Rede

LoRaWAN é uma arquitetura de rede aberta, normalmente utilizado em topologias de rede do tipo estrela. Suas regras são regidas pela LoRa Alliance, grupo formado por diversas empresas do ramo, como IBM, Actility, Semtech e Microchip. Utiliza um modelo com *duty cycle*, ou seja, os dispositivos passam mais tempo em modo de espera do que transmitindo (MICHEL; SANT, 2017).

Diversas aplicações empregam o LoRaWAN em sua infraestrutura de comunicação. Pode-se citar: em segurança, agricultura (STOČES et al., 2016), saúde (NEUMANN; MONTAVONT; NOEL, 2016) e medições inteligentes.

As redes LoRaWAN apresentam basicamente três componentes de rede: dispositivos finais, *gateways* e um servidor central. Os dispositivos finais só podem se comunicar com os *gateways* por meio da comunicação LoRa de salto único. Por outro lado, *gateways* são conectados ao servidor central via uma interface IP, como, por exemplo, *Ethernet* ou 3G (NEUMANN; MONTAVONT; NOEL, 2016). Além disso, essas redes permitem a implantação de redes públicas e privadas, funcionando da mesma forma que os celulares. Os baixos custos de conectividade dessa tecnologia beneficiam a implantação de sensores na IoT (BUYUKAKKASLAR et al., 2017). A Figura 4 apresenta uma visão geral de uma rede LoRaWAN.

Figura 4 – Arquitetura de redes LoRaWAN



Fonte: LoRa Alliance (2015).
Nota: Traduzido pelo autor.

Em uma rede LoRaWAN, os nós não estão associados a um *gateway* específico. Em vez disto, os dados que são transmitidos por um nó geralmente são recebidos por vários *gateways*. Cada *gateway* encaminhará o pacote recebido do nó final para o servidor da rede na nuvem através de algum *backhaul* (celular, *Ethernet*, satélite ou *Wi-Fi*). A inteligência e a complexidade são enviadas ao servidor de rede, que gerencia a rede e filtra os pacotes recebidos redundantes, executa verificações de segurança, agenda o envio de pacotes de reconhecimento dos nós através do *gateway* ideal, etc. (LORA ALLIANCE, 2015). Visto isso, nota-se que, com esta configuração, a complexidade da rede é transferida dos nós para o servidor, proporcionando a criação de dispositivos simples.

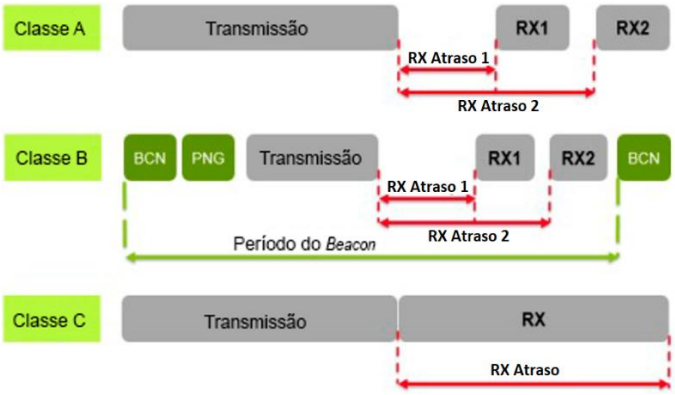
Muitas redes existentes utilizam uma arquitetura rede *mesh*. Nesta arquitetura, os nós finais encaminham as informações de outros nós para aumentar o alcance da comunicação e o tamanho da célula da rede. Desta forma, também é acrescentada complexidade à rede, diminuindo a capacidade da mesma e reduzindo a vida útil da bateria, pois os nós recebem e encaminham informações de outros nós que provavelmente são irrelevantes para eles. A arquitetura em estrela em enlaces de longo alcance faz mais sentido para preservar vida útil da bateria quando é possível obter conectividade nestes enlaces (LORA ALLIANCE, 2015).

Levando em conta as necessidades de cada aplicação, a especificação do LoRaWAN define três classes disponíveis para diferentes estratégias do uso de energia (LAVRIC; POPA, 2017). Essas classes são ilustradas na Figura 5 e podem ser brevemente descritas da seguinte forma:

- **Classe A**: Dispositivos classe A podem iniciar uma transmissão de *uplink* de acordo com suas próprias necessidades. Esta classe permite comunicação bidirecional e cada transmissão *uplink* é seguida por duas mensagens de *downlink*. Possui o menor consumo de energia (LAVRIC; POPA, 2017; PÖTSCH; HASLHOFER, 2017);
- **Classe B**: Dispositivos classe B possuem uma janela de recepção extra em relação à classe A. Um *beacon* periódico enviado pelo *gateway* é necessário para sincronização. A principal ideia desta classe é ter o dispositivo disponível para uma recepção em um instante previsível. Esta classe tem consumo médio de energia (PÖTSCH; HASLHOFER, 2017; SILVA, J. DE CARVALHO et al., 2017);

- **Classe C**: Dispositivos classe C possuem praticamente uma janela de recepção aberta, estando fechada somente quando está transmitindo. *End-devices* que implementam a classe C consomem mais energia do que as classes A ou B, mas oferecem menor latência para a comunicação entre o servidor e o dispositivo final (PÖTSCH; HASLHOFER, 2017).

Figura 5 – Diferentes classes LoRaWAN



Fonte: Bouguera e outros (2018).
Nota: Traduzido pelo autor.

Desta forma, observa-se que o protocolo LoRaWAN, bem como a escolha de sua classe, influencia na determinação da vida útil da bateria do nó, capacidade da rede, qualidade do serviço, segurança e quantidade de aplicações atendidas pela rede (SILVA, J. C. et al., 2017). Sendo assim, conforme descrito, a classe A tem um impacto mínimo na vida útil da bateria do sensor.

2.4 LoRa

LoRa é uma tecnologia de propriedade da Semtech de espalhamento espectral derivado da modulação CSS (do inglês *chirp spread spectrum*), otimizada para aplicações de longo alcance, baixo consumo de energia e baixa taxa de transmissão (MICHEL; SANT, 2017). A utilização da tecnologia LoRa permite ao sistema decodificar sinais com potências abaixo do *noise floor*, ao mesmo tempo se faz imune a perdas por desvanecimento devido a caminhos múltiplos, *doppler shift* e interferências devido a banda estreita (POP et al., 2018).

O alcance e o consumo de energia da LoRa dependem da vários parâmetros da camada física, a saber: fator de espalhamento (SF, do inglês s*preading factor*), largura de banda (BW, do inglês *bandwidth*) e taxa de código (CR, do inglês *coding rate*). Valores mais altos do SF espalham o sinal por mais tempo a fim de colocar mais energia por bit transmitido, permitindo uma recepção bem-sucedida em distâncias maiores. No entanto, isso também aumenta o tempo no ar (ToA, do inglês *time on air*), reduzindo a taxa efetiva dos dados (POP et al., 2018). A LoRa implementa taxas variáveis de transmissão utilizando SF quase ortogonais, sendo possível ao projetista da rede negociar a taxa de transmissão por alcance ou potência, otimizando a performance da mesma, considerando uma largura de banda constante (SEMTECH, 2012). Canais que possuem larguras de banda alargadas podem fornecer maiores taxas de dados, porém são mais susceptíveis a ruídos, limitando assim o alcance. Além disso, a LoRa pode empregar a FEC (do inglês f*orward error correction*) para aumentar a confiabilidade e o alcance. A redundância adicionada às transmissões é definida pelo *CR* e aumenta levemente o *ToA* (POP et al., 2018).

2.4.1 Parâmetros de Configuração

Um dispositivo LoRa pode ser configurado de acordo com os seguintes parâmetros: potência de transmissão, frequência da portadora, fator de espalhamento, largura de banda e taxa de código. Segundo Bor e Roedig (2018), os parâmetros a seguir são utilizados para ajustar o desempenho do *link* e o consumo de energia:

- **Potência de transmissão** (P_{tx}): Em um rádio LoRa a potência de transmissão pode ser ajustada de -4 dBm a 20 dBm em passos de 1 dB, mas, por causa de limites de implementações no *hardware,* o alcance é geralmente limitado de 2 dBm a 20 dBm. Além disso, devido a esses limites, níveis de potência superiores a 17 dBm só podem ser usados com o ciclo de trabalho em 1%;
- **Frequência da portadora** (CF, do inglês *central frequency*): é a frequência central de operação do dispositivo LoRa. Pode ser programada em passos de 61 Hz entre 137 MHz e 1020 MHz. Dependendo do *chip* LoRa esse intervalo pode ser limitado de 860 MHz a 1020 MHz;
- **Fator de espalhamento**: É a razão entre a taxa de símbolos e taxa de *chips*. O fator de espalhamento pode ser selecionado de 7 a 12;

- **Largura de banda**: É a faixa de frequências ocupadas pela banda de transmissão. Os dados são enviados a uma taxa de *chip* igual à largura de banda; uma largura de banda de 125 kHz corresponde a uma taxa de *chips* de 125 kcps. Embora a largura de banda possa ser selecionada em uma faixa de 7,8 kHz a 500 kHz, um típico *chip* LoRa opera em 500 kHz, 250 kHz ou 125 kHz;
- **Taxa de código**: É a taxa FEC usada pelo chip LoRa que oferece proteção contra interferências e pode ser definida como 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8.

A taxa nominal de bits (em bits por segundo) é obtida considerando esses parâmetros, dada pela equação (1).

$$R_{bit} = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \tag{1}$$

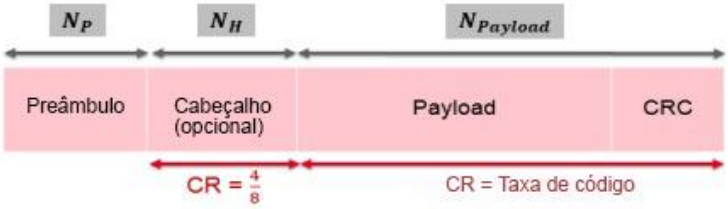
Como se observa, esses parâmetros podem ser configurados para otimizar o desempenho do *link* de comunicação de forma a atender aos requisitos de projeto. Dado o grande número de combinações, é um desafio determinar uma configuração adequada pois sempre haverá um conflito na escolha. Encontrar um bom conjunto de parâmetros é importante pois determinará o consumo de energia do dispositivo (BOR; ROEDIG, 2018).

Um dispositivo LoRa pode ser configurado em mais de 6720 possíveis conjuntos de parâmetros. Bor e Roedig (2018) mostram que diferentes configurações podem fornecer uma qualidade aceitável do *link*, mas requerem uma energia para transmissão que difere por um fator maior do que 100. Por esse motivo, é essencial em uma rede LoRa que os nós sensores escolham bons parâmetros de transmissão pois isto podem resultar que sua vida útil seja 100 vezes menor, inviabilizando muitas aplicações comerciais. Sendo assim, um algoritmo capaz de encontrar a configuração ideal dos parâmetros de transmissão para cada nó é de suma importância, de forma a minimizar os custos de implementação e manutenção em uma rede LoRa/LoRaWAN.

2.4.2 Estrutura dos Pacotes

Um pacote LoRa começa com um preâmbulo que é usado para a sincronização entre o receptor e o transmissor. Após o preâmbulo, um cabeçalho opcional leva consigo o tamanho do *payload* e informações sobre a configuração do LoRa. Nota-se que o cabeçalho é sempre codificado com um *CR* igual a 4/8, enquanto o *payload* é codificado com um *CR* variável. Uma verificação cíclica de redundância (CRC, do inglês *cyclic redundancy check*) pode ser enviada no final do quadro (BOUGUERA et al., 2018). A Figura 6 mostra o conteúdo de um pacote LoRa.

Figura 6 – Estrutura de um pacote LoRa



Fonte: Bouguera e outros (2018).
Nota: Traduzido pelo autor.

Para uma determinada carga útil observada *PL* (em *bytes*), fator de espalhamento (*SF*) e uma taxa de codificação (*CR*), o número de símbolos ($N_{payload}$) usados para transmitir a carga útil pode ser calculado pela equação (2) e complementares, (3) e (4) (SEMTECH, 2013).

$$N_{payload} = 8 + max\left(ceil\left(\frac{\Theta(PL, SF)}{\Gamma(SF)}\right) \times (CR + 4), 0\right) \tag{2}$$

$$\Theta(PL, SF) = 8 \times PL - 4 \times SF + 16 \times CRC + 28 - 20 \times H \tag{3}$$

$$\Gamma(SF) = 4 \times (SF - 2 \times DE) \tag{4}$$

Além disso, *H* é igual a 0 quando o cabeçalho é habilitado e 1 caso contrário. Por fim, *DE* é igual a 1 quando a otimização da taxa de dados está habilitada e 0 caso contrário.

O tempo no ar do pacote (T_{packet}) será dado pela soma da duração do preâmbulo e da carga útil, como mostrado pela equação (5).

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \tag{5}$$

A duração do preâmbulo ($T_{preamble}$) é dada pela equação (6), onde N_p é o número de símbolos no preâmbulo e T_{symbol} é a duração do símbolo, sendo este dado pela equação (7). A duração da carga útil ($T_{payload}$) é dada pela equação (8).

$$T_{preamble} = (4{,}25 + + N_p) \times T_{symbol} \tag{6}$$

$$T_{symbol} = \frac{2^{SF}}{BW} \tag{7}$$

$$T_{payload} = N_{payload} \times T_{symbol} \tag{8}$$

2.4.3 Modelo do Consumo de Energia

Bouguera e outros (2018) propuseram um modelo para o consumo de energia por bit útil (E_{bit}) que pode ser utilizado como uma métrica para avaliação da performance energética dos dispositivos finais. Para a estruturação desse modelo é levado em conta parâmetros como o *ToA*, número de símbolos no preâmbulo e *payload*, tamanho do *payload* a ser transmitido em *bytes*, o fator de espalhamento, a taxa de código, a largura de banda e a potência de transmissão. O E_{bit} pode ser calculado conforme (9).

$$E_{bit} = \frac{P_{cons}(P_{tx}) \times \left(N_{payload} + N_p + 4{,}25\right) \times 2^{SF}}{8 \times PL \times BW} \tag{9}$$

onde $P_{cons}(P_{tx})$ é a potência consumida pelo *end-device*, que depende da potência de transmissão, $N_{payload}$ é o número de símbolos utilizados para transmitir o *payload*, *Np* é o número de símbolos do preâmbulo, *SF* é o fator de espalhamento, *PL* é o tamanho do *payload* em *bytes* e *BW* a largura de banda do sinal transmitido.

2.5 Modelos de Simulação

A simulação é uma ferramenta poderosa para a análise de novos projetos e adaptação de sistemas. Conduzir uma simulação válida é uma arte e ciência (CARSON, 2004). A palavra simulação pode significar coisas diferentes, dependendo do domínio em que está sendo aplicada. Neste trabalho, a simulação deve ser entendida como o processo de projetar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo para fins de compreender o comportamento do sistema ou de avaliar várias estratégias para o funcionamento do mesmo. Segundo Centeno (1996), modelo de simulação é uma técnica experimental e metodologia aplicada que busca:

- Descrever o comportamento dos sistemas;
- Construir teorias ou hipóteses que explicam o comportamento observado;
- Usar essas teorias para prever o comportamento futuro ou o efeito produzido por mudanças no conjunto de entrada no sistema operacional.

A metodologia para a construção de modelos de simulação tem muitas etapas, incluindo: definição do projeto e seus objetivos, abstração de um modelo, representação digital do modelo, experimentação do modelo, produção de uma documentação completa do projeto. Este processo tende a ser iterativo, no qual um modelo é projetado, um cenário definido, a experiência e os resultados analisados, outra situação é escolhida e por fim, outro experimento é executado, e assim por diante (CENTENO, 1996).

Nesse contexto de modelos de simulação, este projeto propõe a realização de uma modelagem da conectividade entre um *end-device,* retransmissor e *gateway* no Matlab. De posse do modelo, este será utilizado pelo algoritmo de otimização para a alocação de recursos em uma rede LoRa/LoRaWAN.

2.6 Modelo de Okumura-Hata

Segundo Giacomin e Vasconcelos (2007), o conhecimento da potência do sinal eletromagnético recebido pelo rádio é de primordial importância em uma rede de sensores sem fio, visto que este é o ponto de partida para importantes serviços próprios dessas redes. Os dois modelos

básicos de propagação (perda de espaço livre e perda de terra plana) exigem um conhecimento detalhado da localização, da dimensão e dos parâmetros constitutivos de cada árvore, construção e terreno na área a ser coberta. Isto pode ser complexo demais para uma aplicação de caráter prático e produziria uma quantidade desnecessária de detalhes. Uma maneira apropriada da contabilização desses efeitos complexos é via modelos empíricos (NADIR; AHMAD, 2010). Dessa forma, este projeto de pesquisa propõe a utilização do modelo empírico de predição de cobertura de Okumura-Hata para a determinação das perdas de propagação, que será considerado pelo algoritmo de otimização.

O modelo de Okumura foi desenvolvido com base em muitas medidas realizadas na região de Tóquio. Okumura apresenta os resultados em forma de curvas. Posteriormente, Hata, em 1980, estabeleceu expressões que aproximam algumas dessas curvas (MOURA, 2011). Existem limitações no modelo de Okumura-Hata devido à própria natureza dos testes realizados. São elas: intervalo de frequência da portadora entre 150 MHz a 1500 MHz, a distância da estação base varia de 1 km a 20 km, a distância da altura da antena da estação base (h_t) varia de 30 m a 200 m e a altura da antena móvel (h_r) varia de 1 m a 10 m (NADIR; AHMAD, 2010). São descritas diferentes equações para o cálculo das perdas por atenuação no caminho considerando modelos matemáticos para cada uma das áreas urbanas, suburbanas e áreas abertas ou rurais. O uso do modelo proposto em ambientes urbanos segue a equação (10).

$$L_{urbano} = 69{,}55 + 26{,}16 \times \log f - 13{,}82 \times \log h_t - a(h_r) + (44{,}9 - 6{,}5 \times \log h_t) \times \log d \tag{10}$$

onde, L_{urbano} é a atenuação em dB, f é a frequência central em MHz ($150 \leq f \leq 1500$ MHz), d é a distância em km ($1 \leq d \leq 20$ Km), h_t é a altura do transmissor em metros ($30 \leq h_t \leq 200$ m), $a(h_r)$ é um fator de correção em dB e h_r é a altura do receptor em metros ($1 \leq h_r \leq 10$ m).

Na equação (11), encontra-se o fator de correção para cidades grandes, com a condição de que $300 \leq f \leq 1500$ MHz.

$$a(h_r) = 3{,}2(\log(11{,}75 \times h_r))^2 - 4{,}97 \tag{11}$$

Em relação aos ambientes suburbanos, deve-se calcular a perda por propagação como descrito na equação (12).

$$L_{suburbano} = L_{urbano} - 2\left[\log\left(\frac{f}{28}\right)\right]^2 - 5{,}4 \tag{12}$$

Do mesmo modo, pela equação (13) tem-se a atenuação para ambientes rurais ou áreas abertas.

$$L_{rural} = L_{urbano} - 4{,}78[\log(f)]^2 + 18{,}33 \times \log f - 40{,}94 \tag{13}$$

2.7 Método de Busca em Vizinhança Variável

As soluções para problemas de otimização da vida real geralmente precisam ser avaliadas considerando vários objetivos conflitantes. Esse tipo de problema, conhecido como problema de otimização multiobjetivo, foi resolvido, principalmente no passado, usando algoritmos evolutivos (DUARTE et al., 2015). Na literatura especializada aparecem muitas propostas para a solução de problemas de otimização, na qual a escolha de cada algoritmo dependerá das premissas adotadas e da complexidade do problema. Essas propostas podem ser separadas em dois grupos: métodos exatos de otimização e métodos aproximados, como os algoritmos heurísticos. Entretanto, existem ferramentas que apresentam características destas duas categorias, e, em geral, também são chamadas de metaheurísticas (TAGLIALENHA; ROMERO, 2010). Segundo (MARTINS, 2009),

> "Metaheurística é uma estratégia de busca através do espaço de soluções de um problema complexo, onde a busca é realizada através de transições no espaço de busca a partir de um ponto inicial ou de um conjunto de pontos iniciais. Nesse contexto, a diferença principal entre as diferentes metaheurísticas é a estratégia usada para realizar as transições no espaço de busca".

Sendo assim, neste projeto será explorado o método de busca em vizinhança variável (VNS, do inglês *variable neighbourhood search*), que é uma metaheurística para resolver o problema de otimização combinatória proposto.

O VNS é um método de busca local proposto por Mladenovic e Hansen (1997) que explora o espaço de soluções através de trocas de estruturas de vizinhança, aceitando somente soluções de melhora da solução atual e retornando à primeira estrutura quando uma solução melhor é

encontrada. Ao contrário de muitas metaheurísticas baseadas em busca local, o VNS não segue uma trajetória de busca, mas explora a partir de uma solução inicial uma sequência crescente de vizinhanças distantes, e só realiza o movimento até uma nova solução se esta solução for melhor que a solução presente. Caso não seja encontrada uma solução melhor, a busca continuará na estrutura de vizinhança seguinte e, se não houver uma estrutura de vizinhança seguinte, a execução é interrompida e a solução corrente é retornada como a solução ótima local (REIS, 2013).

2.7.1 *Basic* VNS

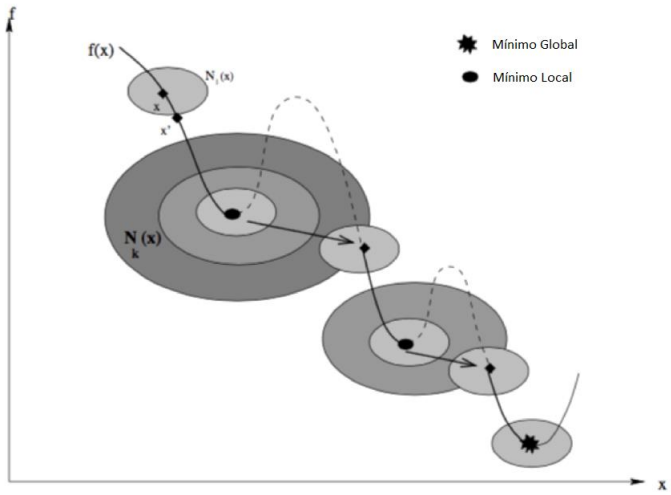
O *Basic* VNS (BVNS) utiliza os elementos básicos do VNS na busca das soluções ótimas. Estão incluídas as etapas onde a solução corrente é perturbada, depois é realizada uma etapa de busca local e então a troca da vizinhança caso a vizinhança atual não seja mais promissora.

De acordo com Hansen e Mladenovic (2009), a busca local é uma heurística que consiste em escolher uma solução inicial x, encontrar uma direção de descida a partir de x, dentro de uma vizinhança $N(x)$, e mover para o mínimo da função $f(x)$ dentro de $N(x)$ na direção de descida. Se nenhuma direção de descida for encontrada então o algoritmo de busca local é finalizado. Caso contrário, a busca é iterada para que o processo continue.

A busca local pode ser do tipo primeira melhora (do inglês *first improvement*) ou melhor melhoria (do inglês *best improvement*). No primeiro tipo o algoritmo é interrompido assim que é encontrada a direção de descida. Por outro lado, no segundo tipo, todas as soluções vizinhas da solução x são avaliadas e então é escolhida a melhor entre elas, isto é, a solução ótima local. No esquema BVNS frequentemente é utilizada a busca local do tipo *first improvement*, embora Hansen e Mladenovic (2009) afirmem que também poderia ser utilizada a busca local do tipo *best improvement*.

A Figura 7 exemplifica como são utilizadas as estruturas de vizinhança no BVNS. São combinados métodos estocásticos e determinísticos para a mudança de vizinhança. O conjunto de soluções na k-ésima estrutura de vizinhança da solução x é definido por $N_k(x)$, onde $k = 1, 2, \ldots, k_{max}$.

Figura 7 – Busca de ótimos locais em diferentes estruturas de vizinhança



Fonte: Hansen e Mladenovic (2009).
Nota: Traduzido pelo autor.

Na Figura 8 é descrito o processo do BVNS. Este recebe como entrada uma solução inicial (x), a maior estrutura de vizinhança que deve ser utilizada (k_{max}) e o tempo máximo de execução do algoritmo (t_{max}).

Figura 8 – Algoritmo *Basic* VNS

Algoritmo 1: *Basic* VNS

Entrada: x, k_{max}, t_{max}

Saída: Melhor solução encontrada

```
t ← 0
enquanto t < t_max faça
    k ← 1
    repete
        x' ← PertubarSolucao(x, k)
        x'' ← BuscaLocal(x')
        x, k ← MudarVizinhanca(x, x'', k)
    até k = k_max
    t ← TempoProcessamento()
fim enquanto
```

Fonte: Hansen e outros (2010).
Nota: Traduzido e adaptado pelo autor.

No laço principal a função *PerturbarSolucao* promove movimentos aleatórios na solução *x* dentro da vizinhança *k* de tal modo que seja gerada uma nova solução x_0. Um movimento é caracterizado por transformações que acarretam em diferentes soluções na vizinhança da solução corrente. Esses movimentos se dão em função das estruturas de vizinhança definidas na modelagem do problema. Em seguida, é executada a função *BuscaLocal*, Figura 9, que tem como entrada a solução x_0. Essa função gera uma nova solução *x*" na vizinhança da solução recebida como entrada. A busca local considerada é do tipo *first improvement*. Nesse método, sistematicamente são enumerados vetores $x_i \in N(x)$ e um movimento é realizado assim que a direção de decida é identificada. De acordo com Hansen e outros (2010), o método f*irst improvement* é útil em problemas mais complexos visto que a busca local do tipo *best improvement* pode consumir muito tempo para encontrar um ótimo local.

Figura 9 – Função de busca local do algoritmo BVNS

Algoritmo 2: BuscaLocal

Entrada: x

Saída: Solução *First Improvement* encontrada

```
repete
    x' ← x
    i ← 0
    repete
        i ← i + 1
        x ← argmin{f(x), f(x^i)}, x^i ∈ N(x)
    até (f(x) < f(x')) ou (i = | N(x) |)
até f(x) ≥ f(x')
retorna x
```

Fonte: Hansen e outros (2010).
Nota: Traduzido e adaptado pelo autor.

Com base na estrutura de vizinhança atual *k* e nas soluções *x* e *x*" é executada a função *MudarVizinhanca*, Figura 10. Essa função avalia se a função em *x*" é melhor do que a solução corrente *x*. Caso seja, a solução *x*" é atribuída à solução corrente e então voltam a ser exploradas as soluções na primeira estrutura de vizinhança. Caso contrário, a estrutura de vizinhança é trocada para que novas soluções em vizinhanças mais distantes da solução corrente possam ser avaliadas.

Figura 10 – Função de mudar a vizinhança do algoritmo BVNS

Algoritmo 3: MudarVizinhanca

Entrada: x, x', k

Saída: Solução corrente e estrutura de vizinhança a ser explorada

```
se f(x') < f(x) então
    x ← x'
    k ← 1
senão
    k ← k + 1
fim
retorna x, k
```

Fonte: Hansen e outros (2010).
Nota: Traduzido e adaptado pelo autor.

O término do algoritmo apresentado na Figura 8 se dá ao atingir o tempo de processamento predefinido. A condição de saída é avaliada pela função *TempoProcessamento*. Esse tempo, na verdade, pode ser definido segundo uma combinação de parâmetros tais como tempo de execução, número de iterações, tempo após a última melhoria, etc.

2.8 *Minimum Spanning Tree*

O problema da árvore de extensão mínima (MST, do inglês *minimum spanning tree*) está entre os desafios mais importantes na teoria dos grafos. Diversas aplicações utilizam este conceito, como no projeto de redes de transporte e telecomunicações. O problema é definido em um grafo $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de vértices e E é o conjunto de arestas não direcionadas. Cada aresta do grafo está associada a custo não negativo. Uma MST é definida como um sub-grafo conectado de G sem redundâncias, passando por todos os vértices em V com o custo mínimo (HOSSEINI; KHALED; JIN, 2012).

Será utilizado o algoritmo de Prim que resolve o problema da MST para um grafo não direcionado, conectado e ponderado. Devido a sua abordagem, é considerado guloso e aleatorizado, pois começa em um nó aleatório do grafo e, em cada iteração, examina todas as arestas disponíveis, dos nós visitados aos não visitados, para escolher aquele com o menor custo. Assim, a aresta escolhida é adicionada ao conjunto de nós visitados e a aresta do grafo

adicionada à MST (ACHARYA; DOBARIA; MARTAND, 2015). Na Figura 11, é descrita de maneira sistemática este procedimento, onde T_{min} é o conjunto de arestas que definem a árvore geradora mínima, T é o conjunto dos vértices já selecionados pelo algoritmo e M é o conjunto dos vértices não selecionados pelo algoritmo.

Figura 11 – Algoritmo de Prim que encontra uma árvore de espalhamento mínimo dado um grafo

Algoritmo 4: Algoritmo de Prim

Entrada: Grafo $G = (V, E)$ e matriz de pesos $D = \{d_{ij}\}$ para todas as arestas $\{i, j\}$

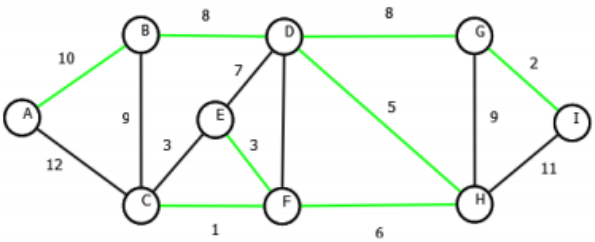
Saída: Árvore geradora mínima de G

escolha qualquer vértice $i \in V$
$T \leftarrow \{ i \}$
$M \leftarrow V \setminus \{ i \}$
$T_{min} \leftarrow \emptyset$
enquanto $|T| \neq |V|$ **faça**
  encontre a aresta $(j, k) \in E$ tal que $j \in T$, $k \in M$ e d_{jk} é mínimo
  $T \leftarrow T \cup \{ k \}$
  $M \leftarrow M \setminus \{ k \}$
  $T_{min} \leftarrow T_{min} \cup (j, k)$
fim enquanto
retorna T_{min}

Fonte: Carvalho (2019).

Como exemplo, na Figura 12, pode-se observar a árvore de extensão mínima para o grafo representado.

Figura 12 – Árvore de extensão mínima (em verde) para o grafo considerado



Fonte: Acharya, Dobaria e Martand (2015).

3 METODOLOGIA E ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

Esta seção está dividida em duas partes. Primeiramente é feita a classificação da pesquisa do considerando a natureza, objetivos, procedimentos técnicos e da forma de abordagem do problema. Logo após é apresentada as etapas de desenvolvimento do projeto.

A classificação deste projeto, sob o ponto de vista da sua natureza, é uma pesquisa aplicada pois objetiva gerar conhecimentos para uma aplicação prática dirigidos à solução de um problema de otimização de recursos em redes de sensores LoRa/LoRaWAN. Quanto aos objetivos, é explicativa pois visa identificar os fatores que determinam e contribuem para a minimização dos custos de implementação e manutenção dessas redes de sensores, a fim de que estes fatores sejam considerados pelo algoritmo de otimização. Além disso, à vista dos procedimentos técnicos, é experimental, pois, por meio deste estudo deseja-se selecionar as variáveis que possam influenciar no desempenho dos nós finais, definindo formas de controle e observação delas por meio do algoritmo de otimização, para que se possa alcançar a redução de custos. Por fim, quanto à abordagem do problema, a pesquisa é quantitativa, pois quase tudo poderá ser quantificável, ou seja, hipóteses de relações numéricas entre variáveis serão consideradas como, por exemplo, a relação entre os parâmetros de configuração do LoRa e o consumo de energia dos nós finais.

Nesta seção são apresentadas as etapas de implementação do método para a otimização de recursos em redes LoRa/LoRaWAN. Inicialmente, são apontadas as primícias levadas em conta para a modelagem da rede, sendo esta realizada no Matlab. Dada esta primeira etapa finalizada, é definida uma solução inicial para o problema proposto dada pelo algoritmo de Prim. Em seguida, é apresentado o algoritmo de otimização, o qual utiliza-se da estrutura VNS com o objetivo de encontrar uma solução otimizada para o problema, isto é, realizar a escolha de melhores parâmetros de configuração para os dispositivos da rede de forma a minimizar a energia por bit útil e o tempo total de coleta de dados.

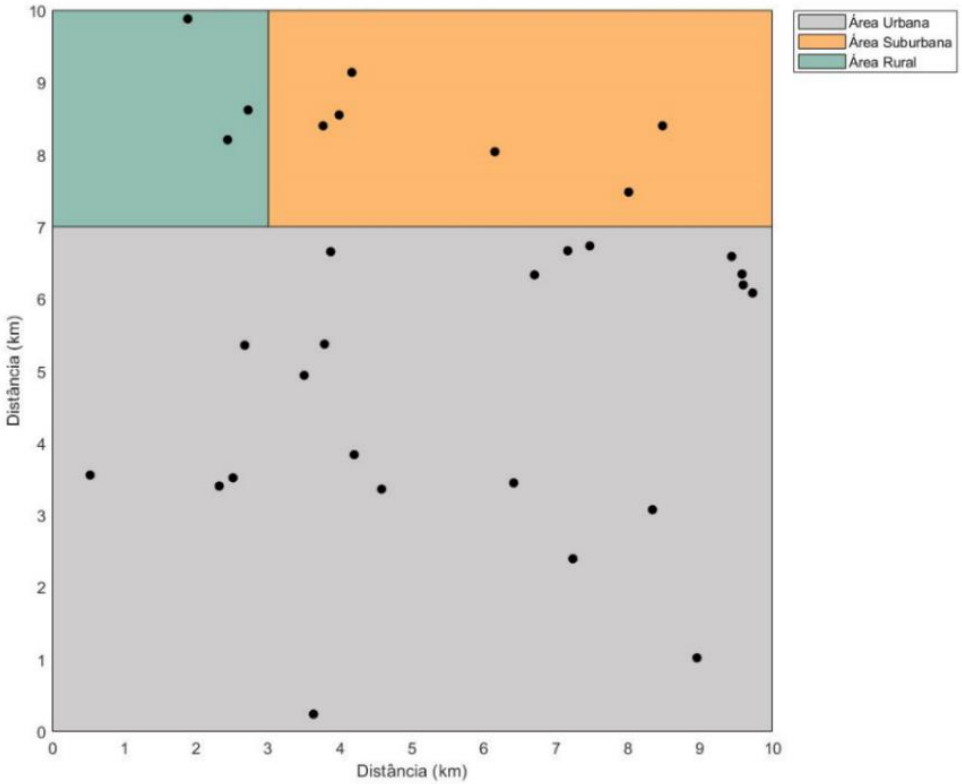
3.1 Definição do Escopo de Estudo

Este trabalho visa uma solução de otimização numa rede de sensores levando em conta os seguintes elementos: dispositivos finais conectados por enlaces sem fio utilizando LoRa,

transceivers LoRa são considerados como concentradores primários, os quais possuem a capacidade de receber um sinal LoRa de um *end-device* e retransmiti-lo para o *gateway*. Além disto, existe o sistema de gerenciamento de energia, onde estará localizado o *gateway* principal.

Foi delimitada uma área de 10 km no eixo das abscissas e coordenadas onde são alocados estes elementos. Esta área de estudo é dividida em diferentes ambientes de propagação, são eles: urbano, suburbano e área aberta. Com o espaço delimitado, define-se a quantidade de pontos de instalação dos dispositivos que irão compor a rede. Em seguida, estes pontos são alocados geograficamente de forma aleatória na área de estudo. Escolheu-se que 10% dos pontos totais serão alocados na área aberta, 20% na área suburbana e 70% na área urbana. Para o término da caracterização do ponto de instalação, acrescenta-se a altura da antena do dispositivo que será ali instalado, a qual é escolhida de forma aleatória podendo assumir valores inteiros de 2 m a 40 m. Além disso, é definido o tamanho do *payload* para cada ponto de instalação, sendo que este também é atribuído aleatoriamente e pode variar de 10 a 80 *bytes* em passos de 5 *bytes*. Como exemplo, na Figura 13, é apresentada uma área de estudo onde observa-se a presença de 30 pontos de instalação.

Figura 13 – Representação geográfica dos pontos alocados na região de estudo



Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se que até o presente momento ainda não se tem a definição de qual dispositivo será instalado em cada ponto alocado no espaço de estudo. Porém, sabe-se que em um destes pontos alocados estará localizado o *gateway* e os outros pontos poderão ser um *end-device* ou um retransmissor. Quem definirá qual dispositivo deverá ser instalado em cada ponto alocado será o algoritmo de otimização que, com base em sua função de custos, irá encontrar a melhor disposição dos elementos na rede de forma a garantir confiabilidade, alinhamento com os requisitos de projeto, e ainda, com custos de implantação, operação e manutenção mínimos.

Sendo assim, é proposto uma metodologia para otimização de recursos que busca encontrar os parâmetros de configuração dos dispositivos LoRa, como *BW*, *SF* e potência transmitida, de forma a estabelecer as melhores possibilidades de *links*. Além disso, também deseja-se realizar um escalonamento a respeito do tempo de comunicação de cada dispositivo, ou seja, encontrar qual deverá ser o momento em que cada *end-device* ou concentrador primário poderá realizar seu *uplink* para que haja a menor interferência possível, e, consequentemente, menor consumo de energia.

3.2 Modelagem da Rede

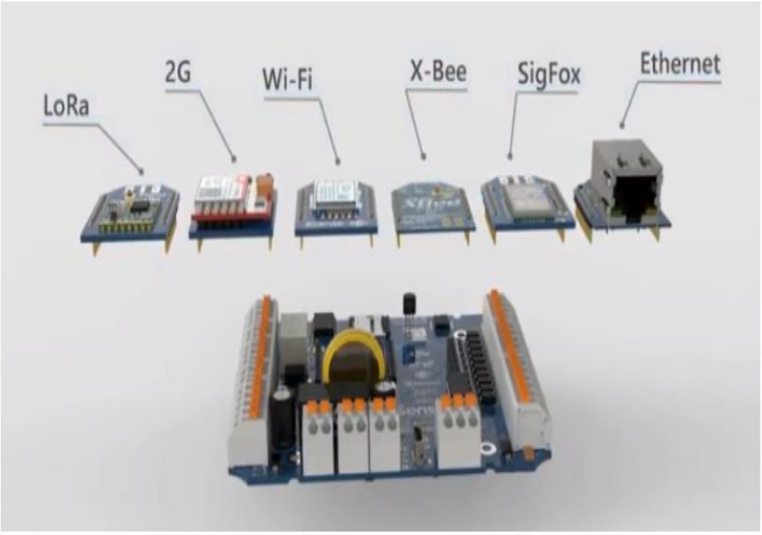
A rede foi modelada por um grafo $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de nós sensores, concentradores primários e *gateway* e E é o conjunto de arestas que indicam os enlaces de transmissão. É proposta uma estrutura para a rede com enlaces de dois níveis, sendo eles: o primeiro enlace entre um *end-device* e um concentrador primário e o segundo enlace entre um concentrador primário e o *gateway* principal.

Os concentradores primários ou retransmissores LoRa são dispositivos que ainda não existem em mercado, porém, há interesse no desenvolvimento deste *hardware* por empresas que trabalham com redes LoRa/LoRaWAN visto que podem ser usados para a ampliação da cobertura da rede. Como exemplo disto, a empresa 2Solve Engenharia e Tecnologia, desenvolveu um *end-device* multifunção capaz de operar como registrador de dados, módulo de controle básico, gateway sem fio e repetidor de I/O. Este produto chama-se 2Sense, o qual faz parte de uma família de produtos de sistemas de automação, projetado para IoT e Indústria 4.0 com o intuito de facilitar a automação de pequenos e grandes processos industriais (FABER, M. J., 2020). Este dispositivo, através de algumas adaptações em seu software, poderá ser

utilizado como um retransmissor, ampliando ainda mais suas aplicações. Dessa forma, a modelagem da rede neste trabalho utilizando retransmissores, foi realizada com o intuito de estudar e mostrar o potencial de uma possível utilização dos mesmos na extensão do alcance das redes LoRa/LoRaWAN. Na Figura 14, é apresentado detalhes do dispositivo 2Sense.

Figura 14 – (a) Folder de apresentação do dispositivo 2Sense e (b) Múltiplos modos de comunicação implementados no dispositivo 2Sense

(a)

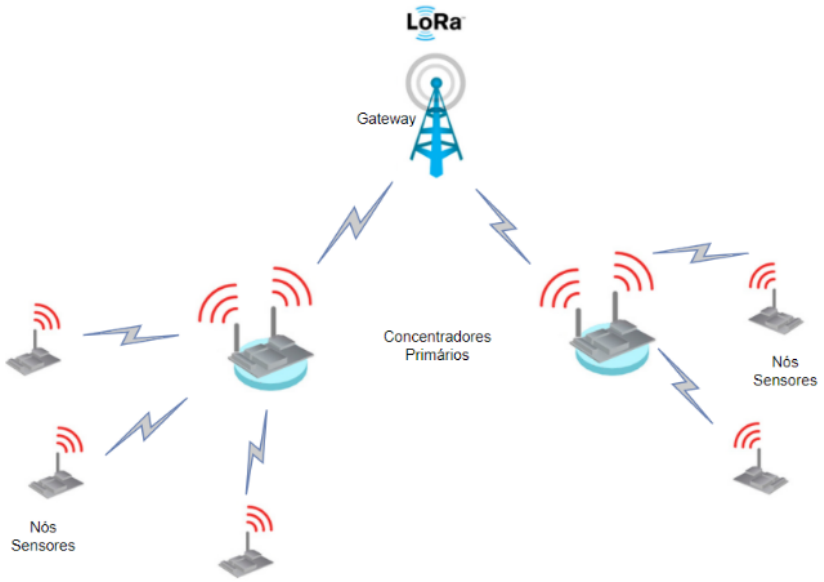


(b)

Fonte: Faber, M. J. (2020).

Ainda sobre a modelagem dos retransmissores, considera-se a possibilidade de envio de dados para o *gateway* além dos dados recebidos dos *end-devices* conectados a ele. Ou seja, mesmo que nenhum *end-device* esteja conectado ao retransmissor, este pode ter um sensor instalado na sua mesma localidade. Dessa forma, por meio de uma interface I/O poderá ser realizada a coleta de dados deste sensor e envio para o *gateway*. A Figura 15 mostra uma representação dos dispositivos que compõem a rede, bem como a estrutura dos enlaces definida entre eles.

Figura 15 – Estrutura da rede proposta para a otimização de recursos



Fonte: Produção do próprio autor.

Cada enlace considerado possui um custo não-negativo $c(u, v)$ associado, isto é, as perdas por propagação, definidas pelo método de Okumura-Hata. Com isto, é calculada a matriz de adjacência do grafo G. A matriz de adjacências é uma das formas de se representar um grafo, possui ordem n assim como o grafo G representado por ela. Cada linha e coluna da matriz é associada a um vértice. Os dados da matriz recebem valores nulos quando não há uma ligação e valores não nulos quando há uma ligação entre dois vértices quaisquer do grafo. O valor em questão se refere ao peso de cada uma das arestas. O peso de cada aresta pode ser igual a 1 para grafos unitários ou igual a qualquer outro valor para grafos ponderados.

A matriz de adjacência da rede modelada é uma matriz quadrada, ou seja, o número de linhas é igual ao número de colunas, sendo este igual ao número de dispositivos da rede. Considerou-se a diagonal principal desta matriz igual a zero, simbolizando que não há custo no envio de uma

mensagem de um dispositivo pra ele mesmo. Além disso, a matriz é simétrica, ou seja, as perdas por propagação são as mesmas em ambos sentidos do envio de dados. Como já relatado, os custos envolvidos na matriz de adjacência são calculados utilizando o método de atenuação proposto por Okumura-Hata, o qual leva em conta os seguintes fatores para o cálculo da atenuação: frequência central de operação (915Mhz), altura das antenas transmissora e receptora, área de localização (Urbano, Suburbano, Rural) e a distância euclidiana entre os pontos. Em casos onde os pontos localizam-se em diferentes regiões, considerou-se o pior caso para o cálculo da atenuação.

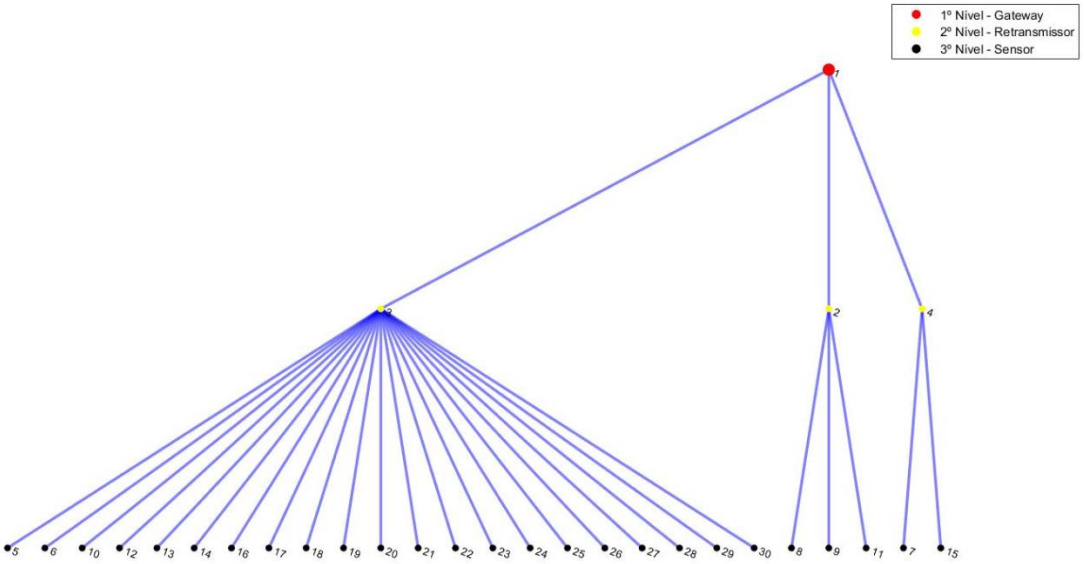
A definição da matriz de adjacências bem como os custos envolvidos no envio de dados entre dois nós da rede será de suma importância para encontrar uma solução inicial para o problema proposto, ou seja, um ponto de partida para o algoritmo de otimização.

3.3 Definindo uma Solução Inicial

A definição de uma solução inicial para o problema de otimização proposto é feita através do algoritmo de Prim. Ele recebe como entrada a matriz de adjacências do grafo *G* que modela a rede em questão e tem como saída a árvore geradora mínima de *G*. É feita uma modificação no algoritmo de Prim mostrado na Figura 11, o qual não limita a profundidade da árvore geradora mínima. Haja vista a estrutura da rede proposta, nota-se a necessidade de limitar a profundidade da árvore em dois, visto que temos apenas enlaces em dois níveis. Dessa forma, a modificação é feita da seguinte maneira: após ser selecionada a aresta de custo mínimo para ser adicionada ao conjunto de arestas que definem a árvore geradora mínima, é feita uma verificação da profundidade da árvore resultante e, se a profundidade for maior do que dois, esta aresta é descartada e é escolhida uma nova aresta. Este processo limitará a profundidade da árvore geradora mínima em dois para que a modelagem da rede esteja alinhada com a estrutura proposta.

Na Figura 16, é apresentada a árvore geradora mínima do Grafo *G* definida pelos pontos alocados como na Figura 13.

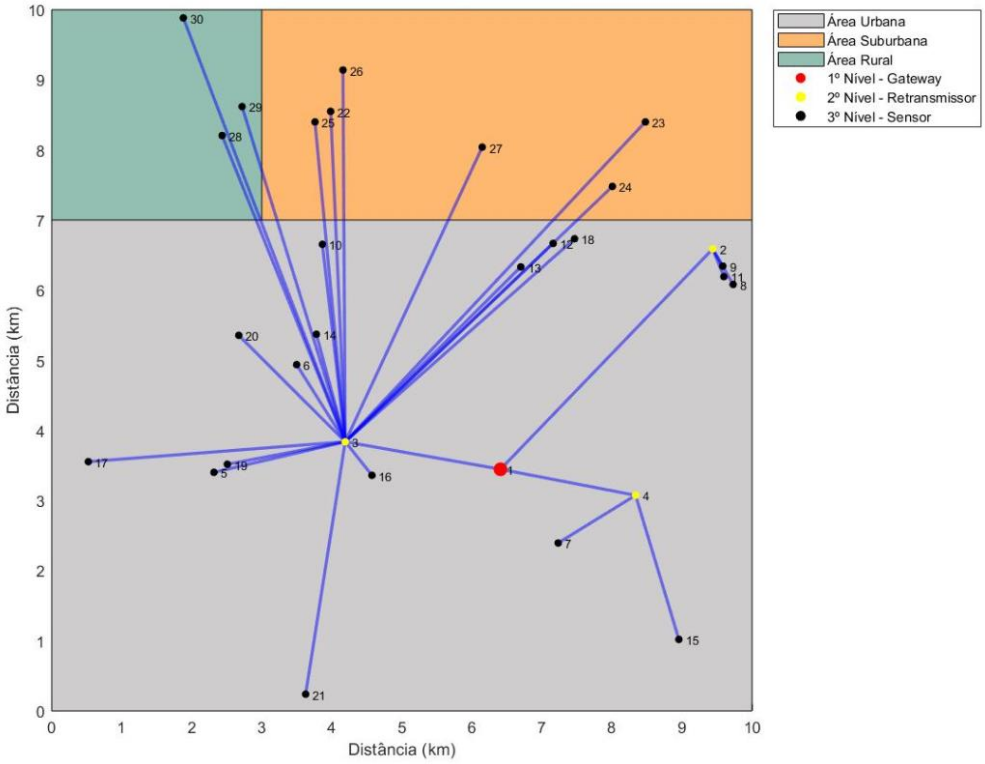
Figura 16 – Árvore de extensão mínima encontrada pelo Algoritmo de Prim



Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que neste momento já acontece a definição dos enlaces bem como a atribuição dos dispositivos aos pontos alocados. Na Figura 17 é apresentada a solução inicial referenciada a sua localização geográfica. Esta árvore será o ponto de partida para o algoritmo de otimização.

Figura 17 – Solução inicial encontrada pelo Algoritmo Prim em sua disposição geográfica



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, com a definição dos enlaces pelo algoritmo de Prim, é assimilado a cada nó um valor de *SF*, *BW* e potência de transmissão. Estes são os parâmetros que serão otimizados pelo algoritmo proposto, portanto os valores definidos na solução inicial serão apenas um ponto de partida, ficando a cargo do otimizador decidir a melhor configuração dos mesmos. Os valores de *SF* e *BW* foram definidos fixos na solução inicial para todos os nós, respectivamente, 12 e 125 kHz. Para o cálculo da potência de transmissão, utilizou-se a equação (14), conhecida como equação do *link budget*, onde P_{tx} é potência transmitida em dBm, P_{rx} é potência recebida em dBm, $G_{sistema}$ é o ganho total do sistema em dBi e L_{path} é a atenuação do sinal em um caminho em dB.

$$P_{tx} = P_{rx} - G_{sistema} + L_{path} \tag{14}$$

Como já mencionado, L_{path} será calculado considerando o modelo de Okumura-Hata para as áreas urbana, suburbana e rural. Para o cálculo de $G_{sistema}$ é considerado que cada antena, receptora e transmissora, possui ganho de 3 dBi, e, portanto, o ganho total do sistema ($G_{sistema}$) é de 6 dBi. Para o cálculo de P_{rx}, considerou-se que esta potência deverá ser 98% da sensibilidade do dispositivo receptor, ou seja, a potência recebida encontra-se perto do limiar da sensibilidade, porém o suficiente para que a mensagem seja decodificada. A sensibilidade (*S*) é definida como a menor potência de sinal que o dispositivo receptor consegue decodificar uma mensagem. A partir da equação (15) é calculado *S*, onde *NF* é a figura de ruído (do inglês *noise figure*) e *SNR* é a relação sinal-ruído (do inglês *signal-to-noise ratio*).

$$S = -174 + 10 \times \log_{10} BW + NF + SNR \tag{15}$$

Foram utilizados os dados dos dispositivos SX1276 e SX1301 para as decisões de modelagem que se referem à algum parâmetro que depende do *hardware* (SEMTECH, 2020; SEMTECH, 2017). Ambos os dispositivos são fabricados pela Semtech destinados a aplicações de IoT, sendo que o primeiro é projetado para funcionar como um *end-device* e o segundo como um *gateway*. O valor de *NF* é um dos parâmetros que depende do *hardware*, sendo definido como 7 dB. O valor de *SNR* é relacionado com o *SF* da comunicação em questão, como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 – Valores de *SNR* mínimo requeridos para a decodificação de uma mensagem dado o SF

	***SNR* (dB)**	
SF	**SX1276**	**SX1301**
7	-7,5	-10,5
8	-10	-13
9	-12,5	-15,5
10	-15	-18
11	-17,5	-20,5
12	-20	-23,5

Fonte: Semtech (2020) e Semtech (2017).
Nota: Adaptado pelo autor.

Definido os valores de *SF*, *BW* e P_{tx} de cada nó do grafo, a solução inicial encontra-se pronta para ser inserida no algoritmo de otimização, o qual será descrito com detalhes na próxima seção.

3.4 Implementação da Metodologia de Otimização de Recursos

As seguintes etapas foram executadas para que o método proposto de otimização por esta pesquisa pudesse ser implementado com sucesso. As etapas são: modelagem da rede, definição de uma solução inicial e implementação da metodologia de otimização de recursos. Algumas destas etapas já foram descritas anteriormente que são referentes a modelagem e estrutura da rede, bem como a definição de uma solução inicial para o problema a ser resolvido. Nesta seção será descrito como o algoritmo VNS foi utilizado na metodologia proposta.

3.4.1 O Algoritmo de Otimização

A metaheurística VNS é um método que utiliza o sistema de mudança de estruturas de vizinhança para encontrar soluções mínimas locais e também como estratégia para sair destes mínimos locais, o que o torna diferente da maioria das outras metaheurísticas, uma vez que o VNS não aceita degradação da solução corrente.

Neste trabalho, o VNS foi adaptado da seguinte forma: para cada estrutura de vizinhança visitada é gerada uma solução aleatória, podendo esta ser referente a uma rede não-conexa. Uma rede é considerada não-conexa quando pelo menos um de seus dispositivos que mesmo com sua máxima potência transmissão configurada, esta não é suficiente para oferecer

conectividade entre os pares, mediante a atual configuração de *BW* e *SF*. Sendo assim, a busca local é responsável por explorar o conjunto de soluções definidas por aquela vizinhança de forma a trazer de volta a conexidade da rede modelada. O VNS permanece na mesma estrutura de vizinhança até que seja definida uma solução de rede conexa para o problema. Quando é encontrada uma solução de melhor qualidade do que a solução atual, o algoritmo sai da estrutura de vizinhança explorada e retorna imediatamente para a primeira estrutura que lhe é designado a explorar, ou continua nesta se nela ainda estiver, porém com a nova solução incumbente. Caso contrário, seguirá para a próxima estrutura de vizinhança até que todas as estruturas de vizinhança sejam visitadas.

Na Figura 18, é descrito o algoritmo proposto que utiliza o VNS como base para a otimização de recursos na rede modelada. Como critério de parada adotou-se um número máximo de ciclos para o algoritmo ($iter_{max}$), definindo-se um ciclo como a passagem por todas as estruturas de vizinhança.

Figura 18 – Descrição do algoritmo de otimização proposto

Algoritmo 5: Algoritmo de otimização proposto

Entrada: Solução inicial dada pelo algoritmo de Prim (x), k_{max}, $iter_{max}$
Saída: Melhor solução encontrada (x^*)

```
iter ← 0
x* ← x
enquanto iter < iter_max faça
  k ← 1
  repete
    x' ← Gera uma solução aleatória conexa dentro do espaço de vizinhança corrente.
    se f(x') < f(x*) então
      x* ← x'
      k ← 1
      iter ← 1
    senão
      k ← k + 1
    fim
  até k = k_máx
  iter ← iter + 1
fim enquanto
retorna x*
```

Fonte: Produção do próprio autor.

A função objetivo a ser minimizada neste trabalho leva em consideração dois principais fatores. O primeiro fator é o consumo de energia por bit útil total da rede, que igual à soma de E_{bit} de cada dispositivo da rede. Como já mostrado, E_{bit} pode ser calculado pela equação (9). O segundo fator é o tempo total de coleta de dados da rede. Entregar um grande número de pacotes em uma pequena quantidade de tempo torna-se uma tarefa custosa devido ao aumento de possíveis colisões entre os pacotes. Para resolver este problema, é proposto pelo algoritmo de otimização uma programação de transmissões de nós para os dispositivos de nível 1 e 2, respectivamente, *gateway* e retransmissores. Transmissões com o mesmo *SF* são programados em slots diferentes para evitar colisões enquanto aqueles com diferentes *SFs* podem ocorrer em paralelo. Dessa forma, cada retransmissor e gateway possuirá uma programação de transmissão dos nós que estão conectados a eles. Cada link terá seu respectivo *ToA*, podendo ser calculado pela equação (5). Assim, o algoritmo de otimização buscará minimizar o *ToA* máximo de cada programação através de uma alocação sistemática do *SF*, reduzindo assim o tempo total de coleta de dados da rede.

Apresenta-se na equação (16) a função objetivo modelada neste trabalho, onde N é o número de dispositivos da rede e L é a quantidade de programação de transmissão dos nós, ou seja, o número de retransmissores mais o número de *gateways*, sendo este último sempre igual a um.

$$f_{objetivo} = \sum_{i=1}^{N} E_{bit,i} + \sum_{j=1}^{L} ToA_{max,j} \tag{16}$$

3.4.2 Estruturas de Vizinhança

As estruturas de vizinhança são utilizadas para promover perturbações na solução corrente de modo que outra solução possa ser obtida. Essa perturbação é essencial para que o VNS consiga escapar de um possível ótimo local em busca do ótimo global. Quanto às estruturas de vizinhança em si, elas devem ser estrategicamente elaboradas com base nas situações que poderiam levar o VNS a ficar preso em regiões distantes do ótimo global. Nesta pesquisa, a vizinhança de uma solução é caracterizada por modificações sistemáticas na estrutura dos links de comunicação e nos parâmetros de configuração dos dispositivos. É importante salientar que as perturbações sofridas pela solução corrente não resultam em alterações na topologia física do grafo que representa a rede em avaliação.

Dado esse contexto, foram estabelecidas quatro estruturas de vizinhança para serem utilizadas em conjunto com o algoritmo de otimização proposto. Elas são executadas da primeira para a última, à medida da necessidade. Em cada uma dessas estruturas, a busca local é executada para intensificar a procura pelo ótimo local, que pode vir a ser o ótimo global que se deseja encontrar ao final do processo de otimização. Se o processo de busca ficar estagnado, uma nova vizinhança é utilizada para diversificar a região de busca, tal como ilustrado na Figura 7. As estruturas de vizinhança definidas neste trabalho foram:

a) Escolhe aleatoriamente um ponto da rede e atribui um par (*SF*, *BW*) ao mesmo.
b) Permuta a raiz da árvore com um outro ponto da rede escolhido aleatoriamente.
c) Troca uma conexão no grafo. Escolhe aleatoriamente um ponto do nível 3 (*end-device*) e conecta-o em outro ponto de nível 2 (retransmissor) ou nível 1 (*gateway*).
d) Escolhe um ponto qualquer do nível 2 ou 1, os quais possuem uma programação de transmissão associada, seleciona o *SF* desta programação que se encontra com o maior número de *time slots* alocados, retira-se um nó aleatório programado neste *SF* e coloca-se em outro *SF*.

3.4.3 Saída do Algoritmo de Otimização

Como forma a condensar as informações, no Quadro 2 encontra-se um resumo dos principais parâmetros estabelecidos e definidos no algoritmo de otimização.

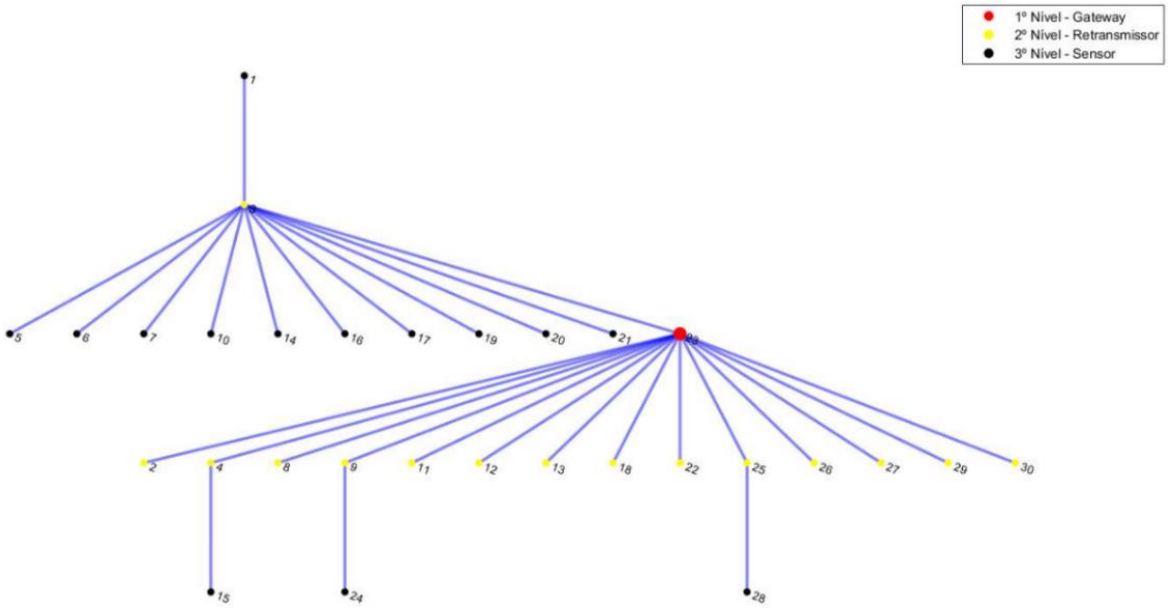
Quadro 2 – Principais parâmetros utilizados pelo algoritmo de otimização

Parâmetro	**Símbolo**	**Valor**	**Unidade**
Spreading Factor	*SF*	7, 8, ..., 11, 12	-
Bandwidth	*BW*	125, 250, 500	kHz
Potência de Transmissão	P_{tx}	7, 8, ..., 19, 20	dBm
Coding Rate	*CR*	4/5	-
Frequência central de operação	f	915	MHz
Ganho total do sistema	$G_{sistema}$	6	dBi
Noise Figure	*NF*	7	dB
Número de símbolos no preâmbulo	N_p	12	-
Cabeçalho	*H*	0	-
Otimização da taxa de dados	*DE*	1	-
Cyclic Redundancy Check	*CRC*	1	-

Fonte: Produção do próprio autor.

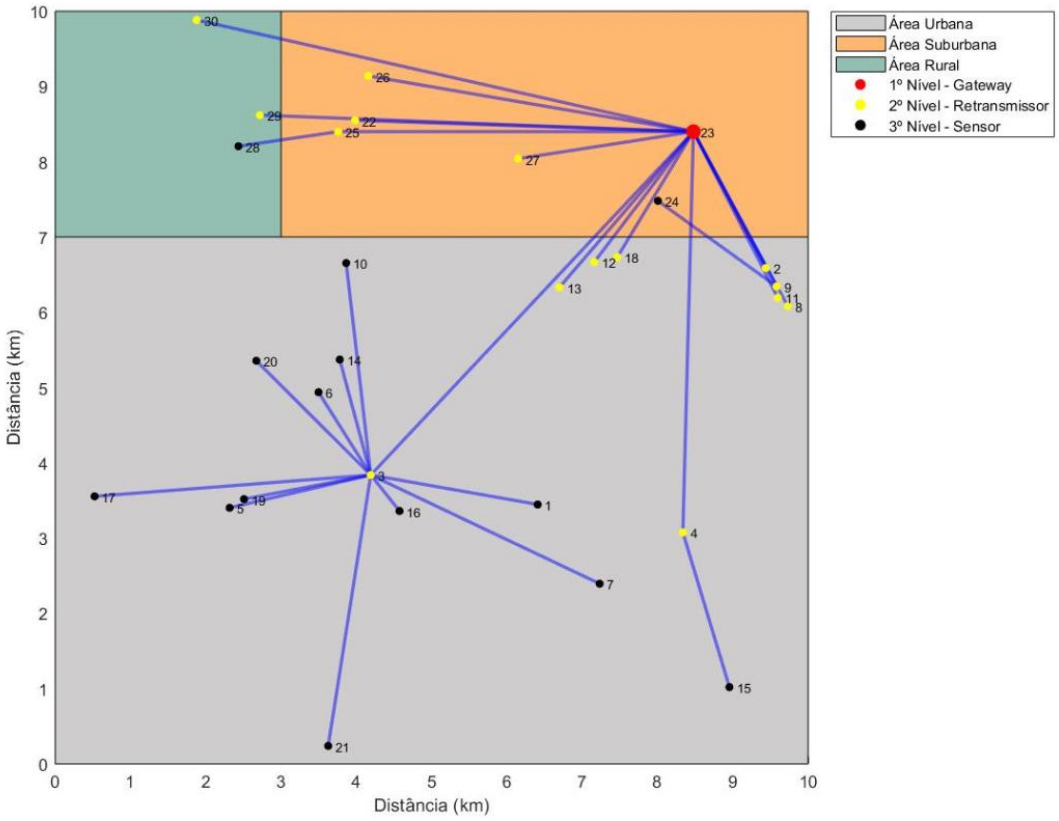
Após o algoritmo de otimização atingir o número máximo de iterações passado como entrada para o mesmo, tem-se a definição dos dispositivos que deverão ser instalados em cada um dos pontos alocados inicialmente, e, ainda, informações da estrutura dos enlaces da rede. Além disso, cada dispositivo terá sua tripla (P_{tx}, *SF* e *BW*) estabelecida e, sendo este retransmissor ou *gateway*, terá uma programação de transmissão dos nós associados a eles. Na Figura 19, segue uma possível saída do algoritmo de otimização, em sua representação como árvore, para os pontos alocados como na Figura 13. Já na Figura 20, segue a mesma saída, porém em sua representação geográfica.

Figura 19 – Solução ótima para os pontos alocados como na Figura 13, em sua representação como árvore



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 – Solução ótima para os pontos alocados como na Figura 13, em sua representação geográfica



Fonte: Produção do próprio autor.

4 RESULTADOS

Esta seção trata sobre os resultados obtidos com o algoritmo de otimização para diferentes redes e cenários. É explanado a forma como as redes de estudo foram geradas bem como resultados referentes ao consumo de energia e ao escalonamento dos dispositivos. Além disso, informações sobre o algoritmo otimizador são fornecidas, como tempo de execução médio e características da função objetivo.

A metodologia proposta por este trabalho desde a modelagem à otimização e geração dos resultados foram realizados no *software* Matlab em um computador Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.4 GHz, 8 GB de RAM no sistema operacional Windows 10.

4.1 Casos de Estudo

Para testar o método de solução proposto foram elaborados 18 diferentes cenários. Os detalhes sobre esses cenários foram resumidos no Quadro 3.

Quadro 3 – Características dos cenários analisados

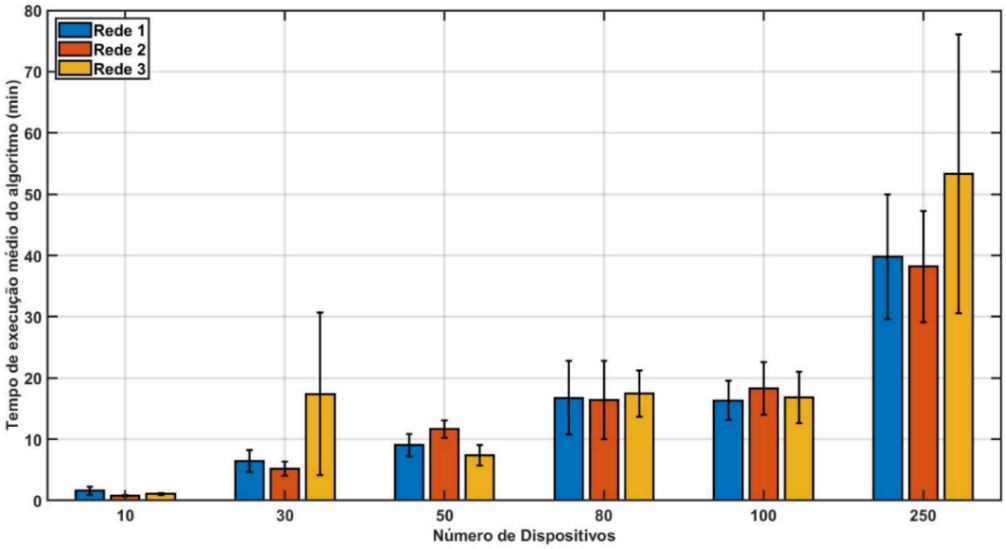
Cenário	Número de dispositivos	Identificador	Repetições (REP)	$iter_{max}$
1	10	N10 - Rede 1	6	100
2	10	N10 - Rede 2	6	100
3	10	N10 - Rede 3	6	100
4	30	N30 - Rede 1	6	200
5	30	N30 - Rede 2	6	200
6	30	N30 - Rede 3	6	200
7	50	N50 - Rede 1	6	200
8	50	N50 - Rede 2	6	200
9	50	N50 - Rede 3	6	200
10	80	N80 - Rede 1	6	200
11	80	N80 - Rede 2	6	200
12	80	N80 - Rede 3	6	200
13	100	N100 - Rede 1	6	100
14	100	N100 - Rede 2	6	100
15	100	N100 - Rede 3	6	100
16	250	N250 - Rede 1	6	30
17	250	N250 - Rede 2	6	30
18	250	N250 - Rede 3	6	30

Fonte: Produção do próprio autor.

Cada uma das instâncias foi executada seis vezes passando pelo procedimento completo do método de solução proposto. É preciso que o algoritmo execute mais de uma vez devido à

natureza estocástica do método, para que assim sejam geradas estatísticas mais consistentes. O tempo de execução médio do algoritmo é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Tempo médio de execução do algoritmo para os diferentes casos de análise



Fonte: Produção do próprio autor.

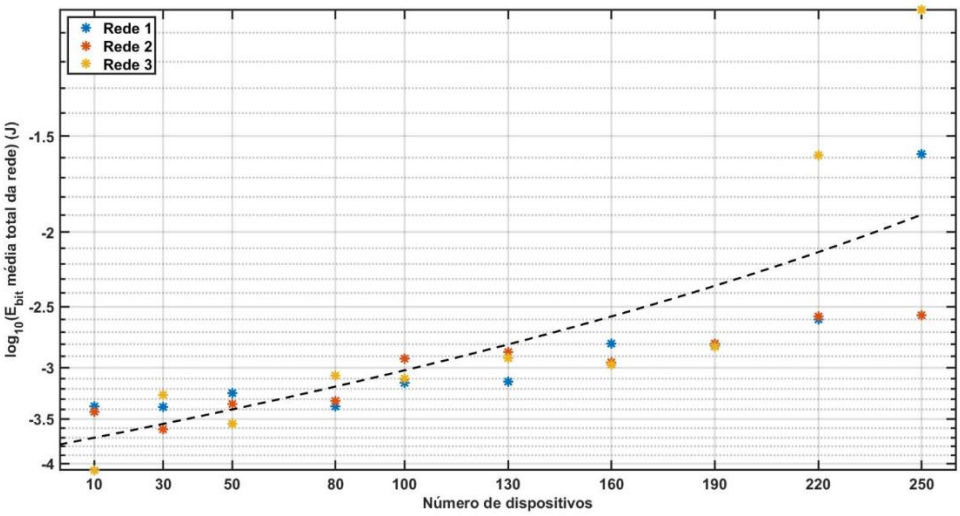
O número de iterações máxima sem nenhuma melhoria ($iter_{max}$) foi definido conforme observações durante a modelagem e execução do algoritmo. Este valor interferiu diretamente no tempo de execução do algoritmo, o qual, em média, cresceu linearmente com o tamanho da rede. O tempo médio de execução e o respectivo desvio padrão para N30 – Rede 3 e N250 – Rede 3, indicam uma possível disparidade entre essas redes e as outras de mesmo número de dispositivos. Essas diferenças entre as redes de estudos serão melhores explicadas nas seções 3.2, 3.3 e 3.4.

4.2 Avaliação do Consumo de Energia por Bit, Potência de Transmissão e Taxa de Transmissão

Em se tratando de Internet das Coisas, a energia consumida pelos dispositivos é um dos principais recursos disponíveis que devem ser bem planejados e dimensionados objetivando maximizar a vida útil dos elementos da rede. A forma utilizada neste trabalho para avaliar este recurso é a E_{bit}, que pode ser calculada usando a equação (9). Na Figura 22, observa-se a energia por bit útil média total da rede para cada uma das configurações adotadas. Para o cálculo deste indicador, a E_{bit} de cada dispositivo da rede foi somada para obter-se o total da rede. É válido

salientar que o gráfico da Figura 22 possui o eixo das ordenadas na escala logarítmica para uma melhor visualização das relações entre os dados.

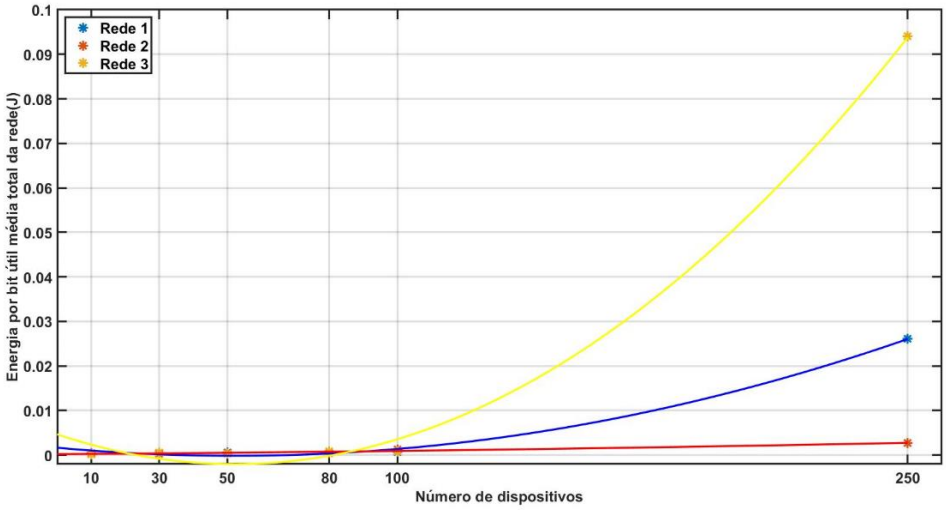
Figura 22 – Energia por bit útil média total da rede para os diferentes casos de análise



Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se que, após ser aplicada uma transformação logarítmica nos dados da energia por bit útil média total da rede, a relação desta com o número de dispositivos pode ser escrita por meio de uma aproximação linear. Uma linearização no gráfico semi-logarítimo, o qual possui apenas um dos eixos na escala logarítmica, demonstra uma relação exponencial entre a E_{bit} total da rede e o número de dispositivos numa escala linear, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Relação exponencial da energia por bit útil média total da rede para os diferentes casos de análise



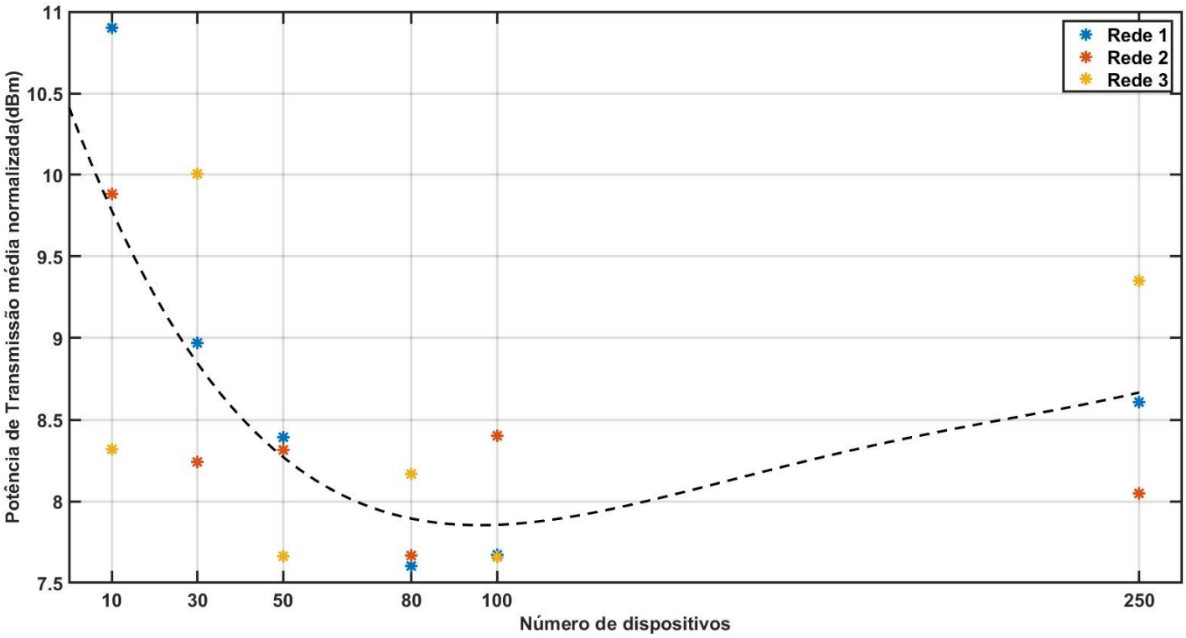
Fonte: Produção do próprio autor.

Também é natural pensar que quanto maior o número de dispositivos na rede, maior será a E_{bit} média total da rede, visto que esta é a soma da E_{bit} média de cada elemento. Porém, somado a este fato, temos o fator do escalonamento dos dispositivos no tempo levado em conta pela função objetivo do otimizador. Dessa forma, com o aumento do número de elementos da rede o algoritmo tenderá a distribuir os elementos igualmente entre os SF disponíveis, não dando mais preferência a SF menores para reduzir o E_{bit} total da rede. Assim, à medida que o número de dispositivos da rede aumenta, o uso de SF maiores é mais comum, fazendo com que a E_{bit} para os dispositivos desta rede aumente consideravelmente.

Além disso, observa-se que podem existir redes com o mesmo número de dispositivos que requerem configurações de parâmetros completamente distintas, resultando numa E_{bit} média total da rede de ordem de grandeza diferentes. Este fato pode ser observado principalmente nas redes de estudo N10 e N250. Por exemplo, as Redes 1 e 2, compostas por 10 dispositivos, possuem um $\log_{10}$(E_{bit} média total) por volta de -3,397 J ou 0,4 mJ na escala linear. Já a Rede 3, também composta por 10 dispositivos, possui um $\log_{10}$(E_{bit} média total) de -4,079 J ou 83,3 µJ na escala linear, cerca de 5 vezes menor do que a E_{bit} média total das outras redes com o mesmo número de componentes. Estas diferenças entre redes de mesmo número de dispositivos podem surgir devido às necessidades de projeto distintas, como alocação geográfica dos elementos, altura das antenas transmissora e receptora, bem como requerimentos do tamanho dos dados a serem enviados a cada ponto. Ao final, estes requerimentos de projeto são traduzidos pelo algoritmo otimizador nos parâmetros P_{tr}, BW, SF e PL, que influem no cálculo de E_{bit}.

A potência de transmissão é um dos parâmetros que são configurados nos dispositivos quando os mesmos são colocados em funcionamento. A decisão assertiva quanto ao seu valor é também de suma importância na determinação da vida útil daquele dispositivo. Dessa forma, foi feita uma análise da potência de transmissão média normalizada pelo número de dispositivos de cada rede. Na Figura 24, pode-se observar o gráfico relacionando estas grandezas.

Figura 24 – Potência de transmissão média normalizada da rede para os diferentes casos de análise



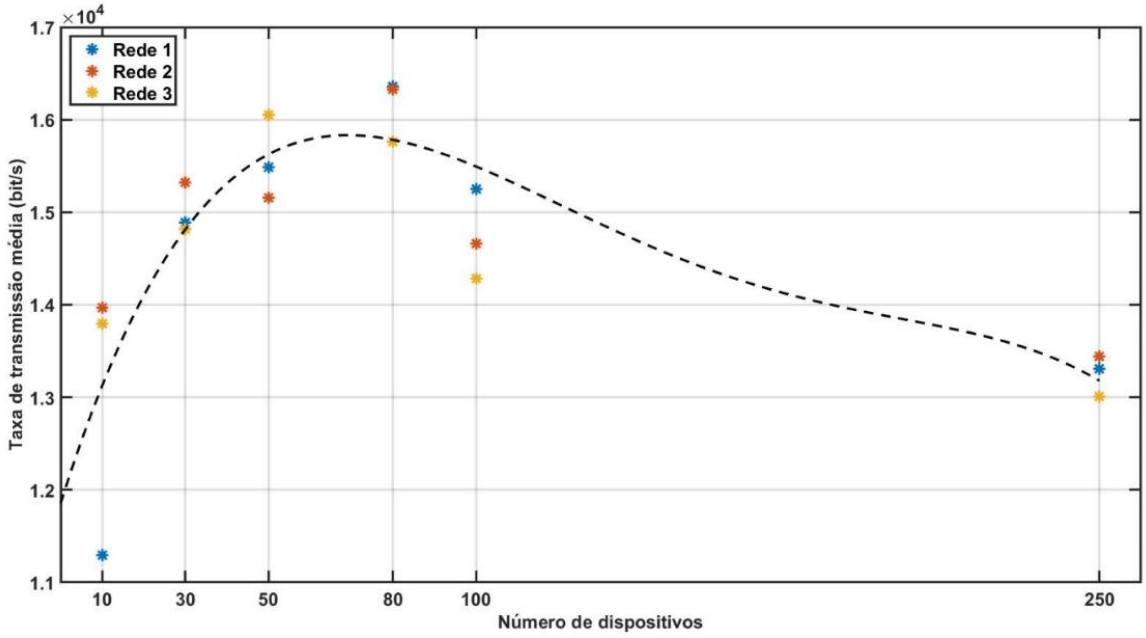
Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que a menor atribuição de potência de transmissão média por ponto alocado acontece nas redes entre 80 e 100 dispositivos, sendo estes valores em média iguais a 7,81 dBm e 7,91 dBm, respectivamente. Redes que possuem esta quantidade de componentes tiveram a melhor relação custo-benefício em relação a P_{tr}, onde tais elementos puderam ser distribuídos na área de estudo de forma a obter *links* com menores perdas por propagação, influenciadas principalmente pela distância entre os dispositivos do *link*, altura das antenas e região de localização. Para redes com poucos nós, as distâncias envolvidas entre os elementos são maiores, aumentando assim as perdas por propagação, e, consequentemente, o incremento da potência de transmissão requerida àquele nó. O aumento do alcance deste dispositivo também poderia ser feito pelo aumento do *SF*, porém desta forma a penalização da função objetivo é muito maior se comparado com o aumento de P_{tr}.

A taxa de transmissão de um nó poderia ser também um critério de projeto para o otimizador. Neste trabalho, é deixado a cargo do algoritmo definir os valores de *SF* e *BW* do nó, que por sua vez, estes irão indicar a taxa de transmissão daquele dispositivo. Sabe-se que R_b ou taxa de transmissão de um nó pode ser calculada como mostrado na equação (1). Nota-se que R_b é dependente dos valores de *SF*, *BW* e *CR*. Como neste trabalho foi considerado *CR* com valor

fixo igual a 4/5, e, levando em conta os valores possíveis de *BW* e *SF*, a taxa de transmissão máxima que um nó poderia obter pela otimização aconteceria quando fosse atribuído a este nó *SF* igual a 7 e *BW* igual a 500 kHz, sendo R_b máxima igual a 21,875 kbps. Na Figura 25 é apresentado um gráfico das taxas de transmissão médias obtidas com as redes de estudo.

Figura 25 – Taxa de transmissão média em bit/s para os diferentes casos de análise



Fonte: Produção do próprio autor.

Pela Figura 25, observa-se que a maior taxa de transmissão média pelo otimizador foi obtida na rede com 80 dispositivos, sendo este valor em média igual a 16,15 kbps, cerca de 73% da taxa de transmissão máxima que poderia ser obtida pelo algoritmo dada as condições da modelagem. Novamente, observa-se os seguintes fatos: as redes com 10 dispositivos, por exemplo, envolvem distâncias maiores entre os links, fazendo com que o uso de *SF* maiores sejam necessários para a conectividade da rede, prejudicando assim a taxa de transmissão. Já para as redes com 250 dispositivos, a distância dos links já não é mais um problema predominante e sim o escalonamento dos dispositivos, sendo usado praticamente todos os *SF* para transmissão dos dados. Essa forma é pensada com o objetivo de minimizar a função objetivo, porém a taxa de transmissão média dos dados é reduzida.

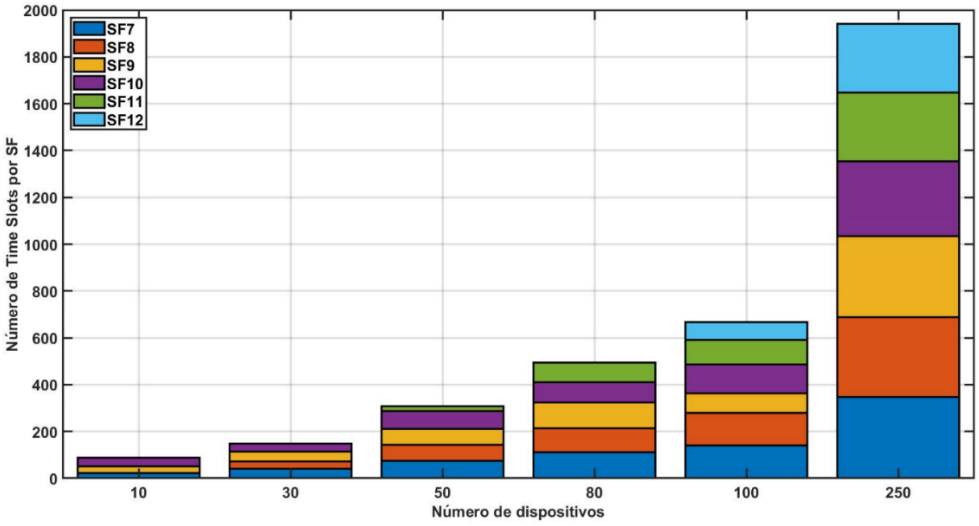
4.3 Avaliação do Escalonamento dos Dispositivos

Neste trabalho, assumiu-se que o tempo é dividido em intervalos ou *slots* de 10 ms. A programação do escalonamento pode ser entendida como uma matriz 2D com seis linhas, uma por SF, e cada uma consistindo em uma lista de *time slots*. O papel do algoritmo de otimização é escalar os dispositivos encontrando a melhor alocação para que o tempo de coleta dos dados totais seja minimizado.

Para a análise do desempenho do algoritmo no escalonamento dos dispositivos da rede, foram considerados apenas os dados referentes ao *uplink* de informações dos retransmissores para o *gateway*. Esta escolha foi feita pois um retransmissor pode ser visto pelo *gateway* por duas óticas. A primeira é que pode ele ser visto propriamente como um dispositivo de nível 2, repassando os dados do nível 3 para o nível 1. A segunda é que se o retransmissor não possuir *end-devices* conectados a ele, o mesmo poderá ser visto como um dispositivo de nível 3 pelo *gateway*. Dessa forma, esta avaliação buscou abranger as diversas formas que os dispositivos da rede modelada poderiam ser vistos pelos seus respectivos pares de comunicação.

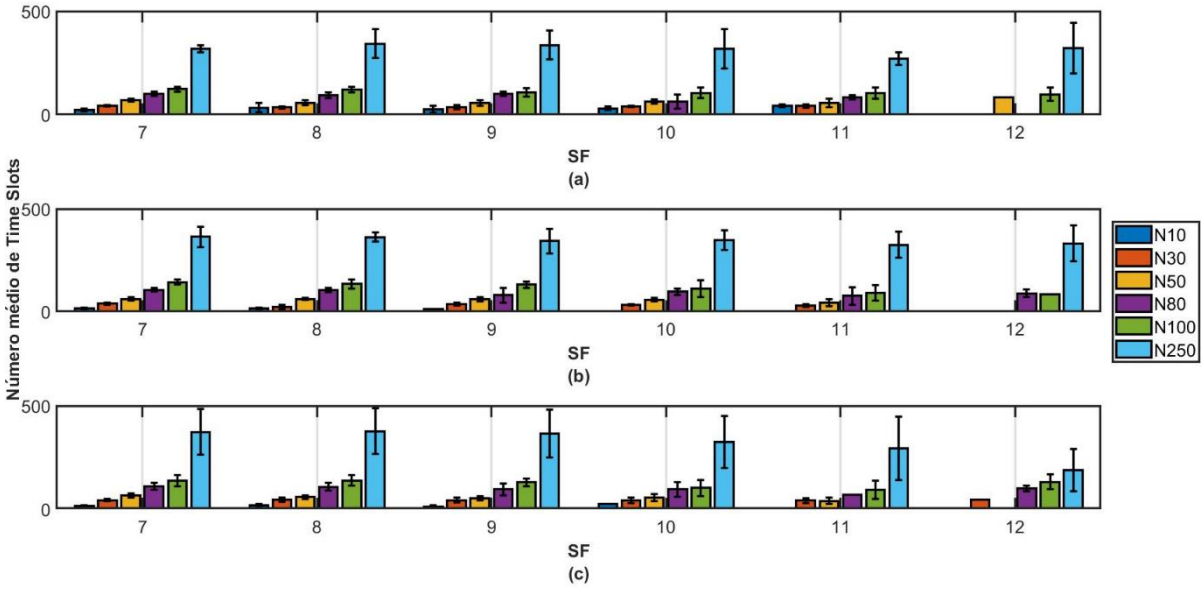
A avaliação do escalonamento dos dispositivos da rede modelada foi realizada pela observação do número de *time slots* atribuídos pelo algoritmo para cada *SF* em um determinado escalonamento, como é observado na Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 – Número de time slots por *SF* no escalonamento referente à comunicação entre retransmissores e *gateway* para as Redes 1 em suas terceiras execuções



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 27 – Número de *time slots* médios por *SF* no escalonamento referente à comunicação entre retransmissores e *gateway*, separados pelo número de nós da rede. Em (a) Rede 1, (b) Rede 2, (c) Rede 3



Fonte: Produção do próprio autor.

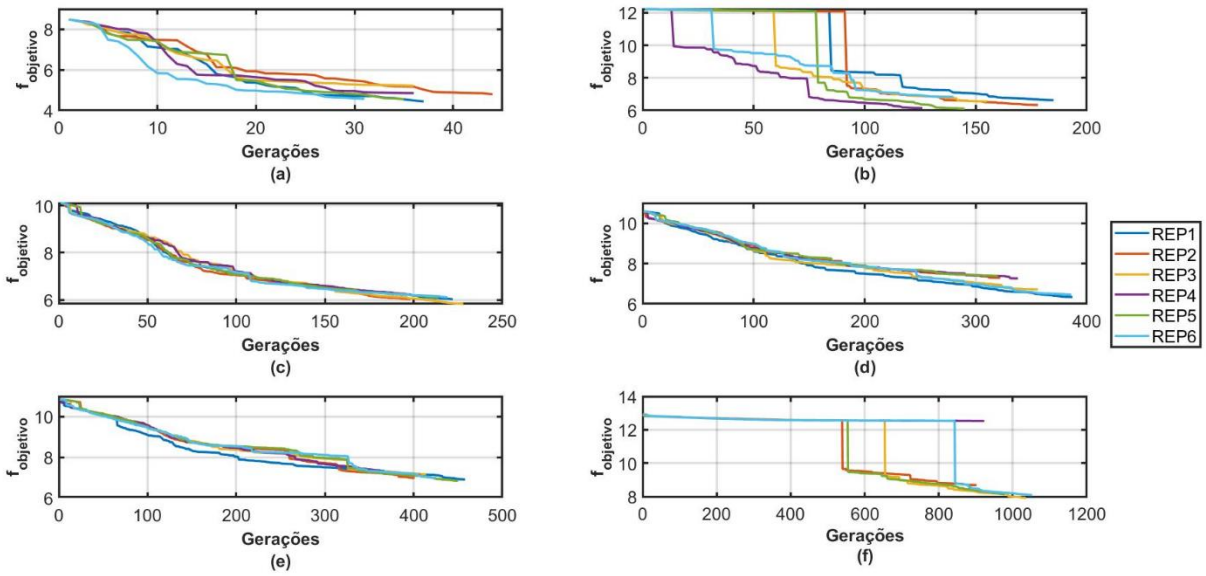
Mediante esta apresentação de dados, percebe-se que de fato o algoritmo procura utilizar de forma sistemática a alocação dos dispositivos em cada *SF* de forma a minimizar o tempo de coleta total dados por meio de uma distribuição igualitária do número de time slots por *SF*. Além disso, observa-se uma preferência do algoritmo pelo uso de *SFs* menores, visando uma redução no consumo de energia, lançando-se mão de *SFs* maiores apenas quando é requisitado uma ampliação do alcance da rede. Para redes com número de nós iguais a 100 e 250, por exemplo, o escalonamento dos dispositivos começa a ser um problema evidente e o uso de *SFs* maiores para que o tempo total de coleta não seja prejudicado também se faz necessário.

4.4 Avaliação da Função Objetivo

A função objetivo é a representação matemática do critério de eficiência adotado no problema de otimização. Neste trabalho, a função objetivo tinha como critério a minimização da energia por bit útil total da rede e também a redução do tempo de coleta de dados. A observação do comportamento dos valores assumidos pela função objetivo no decorrer das gerações das soluções pode trazer informações importantes do problema modelado. Para visualizar este fato, pode-se observar na Figura 28 a evolução da função objeto no decorrer das gerações para a Rede 3, detalhada para cada um dos seis tamanhos de rede modelados e também para todas as

seis repetições do algoritmo na mesma instância. O eixo das ordenadas está em escala logarítmica para uma melhor verificação das nuances da função objetivo no decorrer da evolução das gerações.

Figura 28 – Evolução da função objetivo no decorrer das gerações, separadas por cada uma das repetições do algoritmo. Em (a) N10 – Rede 3, (b) N30 – Rede 3, (c) N50 – Rede 3, (d) N80 – Rede 3, (e) N100, – Rede 3, (f) N250 – Rede 3

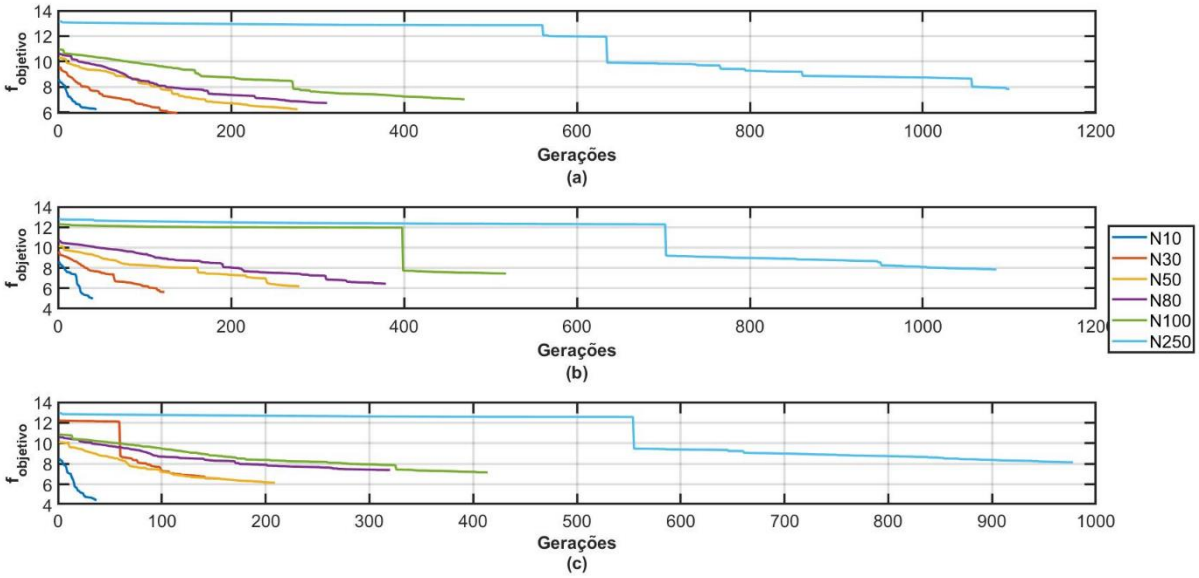


Fonte: Produção do próprio autor.

Nota-se que para uma mesma rede, apenas o fato de o algoritmo ser processado mais de uma vez, o mesmo pode tomar caminhos totalmente diferentes que, podem ou não, chegar a um mesmo valor para a função objetivo ao final da execução do algoritmo. Isto pode ser principalmente observado para as redes N30 – Rede 3 e N250 – Rede 3. Observa-se que em cada uma das execuções do algoritmo, o mesmo tomou caminhos visualmente diferentes na construção da solução, característica esta que é devido à própria natureza estocástica de alocação de recursos do algoritmo de forma a visitar variadas vizinhanças. Para a N30 – Rede 3, os diferentes caminhos tomados pelo algoritmo convergiram para um mesmo valor da função objetivo ao final. Porém, para N250 – Rede 3, em uma das repetições, especificamente a quarta repetição, convergiu-se para um ótimo local diferente e maior que as outras repetições. Isto reforça a ideia de que o algoritmo é preciso ser executado mais de uma vez para uma mesma instância.

Foi feita uma avaliação da ordem de grandeza da função objetivo para diferentes caso modelados. Para este estudo, escolheu-se aleatoriamente uma das seis repetições para cada uma das Redes 1,2 e 3. Esta análise pode ser observada na Figura 29. Vale ressaltar que a escala do eixo das ordenadas é logarítmica para uma melhor visualização dos gráficos.

Figura 29 – Evolução da função objetivo no decorrer das gerações, separadas pelos números de nós da rede. Para cada tamanho de rede, escolheu-se aleatoriamente uma das repetições da execução da instância. Em (a) Rede 1, (b) Rede 2, (c) Rede 3

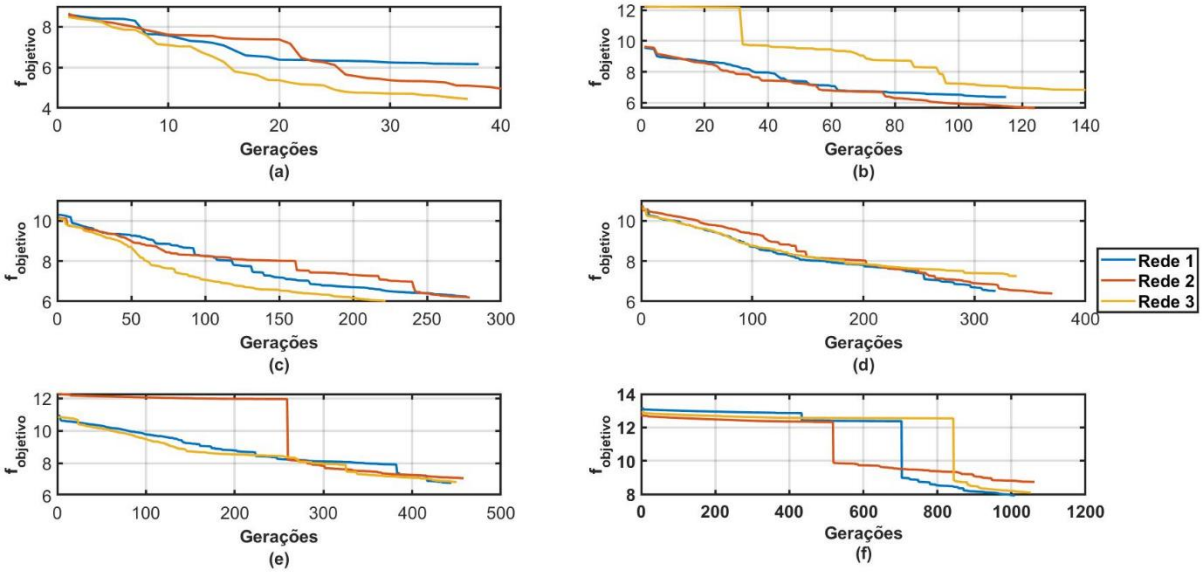


Fonte: Produção do próprio autor.

Através dos resultados obtidos visualizados na Figura 29, pode-se notar que mesmo em redes que possuem número de nós menores, estas podem possuir um custo associado maior do que redes com mais dispositivos, como é o caso da N10 – Rede 1, a qual possui um custo associado maior que N30 – Rede 1 e N50 – Rede 1. Uma outra observação interessante é quanto aos saltos que são dados pela função objetivo em algum ponto no decorrer de suas gerações, podendo ser visto, por exemplo, em N250 - Redes 1, 2 e 3, N100 – Rede 2 e N30 – Rede 3. Isto deve-se ao fato de o algoritmo ter encontrado uma forma de escapar de um ótimo local através de suas mudanças sistemáticas de vizinhança.

Finalizando a avaliação qualitativa da evolução das funções objetivo, na Figura 30, é apresentada uma comparação das funções objetivo das Redes 1, 2 e 3 para o mesmo número de dispositivos. Novamente, o eixo das ordenas é apresentado em escala logarítmica.

Figura 30 – Evolução da função objetivo no decorrer das gerações, separadas em Rede 1, Rede 2 e Rede 3. Para cada Rede, escolheu-se aleatoriamente uma das repetições da execução da instância. Em (a) N10, (b) N30, (c) N50, (d) N80, (e) N100, (f) N250



Fonte: Produção do próprio autor.

A metodologia proposta para a geração das redes de estudo, atribui a localização, altura de antenas e tamanho do *payload* para cada ponto de instalação de forma aleatória. A solução inicial do algoritmo de otimização, que ditará o valor inicial da função objetivo, atribui para todos os dispositivos *SF* igual a 12 e *BW* igual a 125 kHz. Dessa forma, o valor inicial da função objetivo, comparando-se redes de mesmo tamanho, pode fornecer informações sobre as diferenças entre as redes geradas. Como por exemplo, observa-se na Figura 30, (b) e (e), relativas respectivamente a redes de 30 e 100 nós, o valor inicial de uma das redes geradas é destoante em relação ao valor inicial das outras duas redes. Sendo assim, nota-se que redes podem possuir o mesmo número de dispositivos e, mesmo assim, ter requerimentos diferentes de configuração dos dispositivos devido a exigências de projeto. Isto é justamente observado pelos valores iniciais das funções objetivo bem como os valores de convergência das mesmas.

5 CONCLUSÕES

No paradigma da Internet das Coisas, objetos do cotidiano são capazes de atuar, sentir, processar e se comunicar. Esses objetos passam a ser chamados, então, de objetos inteligentes. As redes de longo alcance e baixa potência possuem uma grande gama de aplicações, em especial sob o ponto de vista da IoT, pois os objetos inteligentes, em geral, são restritos em termos de energia. A tecnologia LoRa, utilizada para implementar redes LoRaWAN, tem se tornado uma opção cada vez mais adotada comercialmente. A alocação de recursos é um aspecto fundamental nestas redes, especialmente à medida que há uma densificação da rede e o número de parâmetros configuráveis aumentam.

Neste contexto, este trabalho propôs o desenvolvimento de uma metodologia para a otimização de recursos em uma rede de sensores LoRa/LoRaWAN. Utilizou-se teoria de grafos, modelo de Okumura-Hata e a metaheurística VNS como base para o desenvolvimento do algoritmo. Parâmetros como fator de espalhamento, largura de banda e potência de transmissão puderam ser otimizados visando o objetivo de reduzir a energia por bit útil total da rede e o tempo total de coleta de dados. Considerou-se na modelagem da rede a existência de um dispositivo retransmissor de sinais LoRa. Este mostrou-se bastante interessante para o aumento da cobertura da rede na área de estudo.

Notou-se através dos resultados gerados pelo algoritmo de otimização que, para redes com poucos dispositivos associados, teve-se a preferência pelo uso de *SF* menores, visando uma redução no consumo de energia por bit útil, sendo *SF* maiores apenas usados quando a ampliação do alcance das redes era requisitada. Já para redes com maiores número de nós, o escalonamento dos dispositivos começou a ser um fator relevante a ser levado em conta pela função objetivo, fazendo com o número de *time slots* por *SF* fosse distribuído de forma igualitária, para que o tempo total de coleta dos dados não fosse prejudicado.

Como trabalhos futuros, a inclusão de mais parâmetros no algoritmo de otimização, como o *CR*, pode fornecer resultados interessantes, visto que o *CR* também influencia na energia por bit útil, taxa de transmissão, e, consequentemente também no escalonamento dos dispositivos. Além disso, pode-se acrescentar a avaliação das diferentes redes geradas através de invariantes de grafos, para que estas diferenças possam ser mensuradas de fato por meio dessas métricas.

Por fim, a preparação de um *setup* experimental para demonstrar a aplicabilidade e viabilidade do algoritmo de otimização. A existência de um *software* que oferecesse a configuração dos parâmetros já otimizados dos dispositivos pode ser de grande valia, de forma a minimizar os custos de implementação e manutenção, e ainda, satisfazendo as exigências do projeto da rede.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHARYA, R.; DOBARIA, H.; MARTAND, H. A Survey of Prim's Algorithm. **International Journal of Recent Advancement in Engineering & Research**, v. 1, n. 1, p. 9–11, 2015.

AKYILDIZ, I. F.; SU, W.; SANKARASUBRAMANIAM, Y.; CAYIRCI, E. A Survey on Sensor Networks. **IEEE Wireless Communications**, v. 40, n. 8, p. 102–114, 2002.

ARES, B. Z.; PARK, P. G.; FISCHIONE, C.; SPERANZON, A.; JOHANSSON, K. H. On power control for wireless sensor networks: System model, middleware component and experimental evaluation. *In*: EUROPEAN CONTROL CONFERENCE (ECC), 2007, Kos. **Proceedings** [...]. Kos: IEEE, 2007. p. 4293–4300. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7069054. Acesso em: 21 nov. 2020.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.

AUGUSTIN, A.; YI, J.; CLAUSEN, T.; TOWNSLEY, W. M. A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things. **Sensors**, v. 16, n. 9, p. 1–18, 2016.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Produto 8:** Relatório do Plano de Ação - Iniciativas e projetos mobilizadores. Brasília: BNDES, 2017. Disponível em: https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/269bc780-8cdb-4b9b-a297-53955103d4c5/relatorio-final-plano-de-acao-produto-8alterado.pdf?MOD=AJPERES&CVID=m0jDUok. Acesso em: 20 out. 2019.

BOR, M.; ROEDIG, U. LoRa transmission parameter selection. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DISTRIBUTED COMPUTING IN SENSOR SYSTEMS (DCOSS), 13., 2017, Ottawa. **Proceedings** [...]. Ottawa: IEEE, 2017. p. 27–34. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8271941. Acesso em: 21 nov. 2020.

BOUGUERA, T.; DIOURIS, J.-F.; CHAILLOUT, J.-J.; JAOUADI, R.; ANDRIEUX, G. Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN. **Sensors**, v. 18, n. 7, p. 1–23, 2018.

BUYUKAKKASLAR, M. T.; ERTURK, M. A.; AYDIN, M. A.; VOLLERO, L. LoRaWAN as an e-Health Communication Technology. *In*: IEEE ANNUAL COMPUTER SOFTWARE AND APPLICATIONS CONFERENCE, 41., 2017, Turin. **Proceedings** [...]. Turin: IEEE, 2017. p. 310–313. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8029947. Acesso em: 21 nov. 2020.

CARSON, J. S. Introduction to modeling and simulation. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 37., 2004, Washington DC. **Proceedings** [...]. Washington DC: IEEE, 2005. p. 16–23. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/1371297. Acesso em: 21 nov. 2020.

CARVALHO, M. A. M. **Teoria de Grafos**. Ouro Preto, 2019. Disponível em: http://www.decom.ufop.br/marco/site_media/uploads/bcc204/14_aula_14.pdf. Acesso em: 20 out. 2020.

CASALS, L.; MIR, B.; VIDAL, R.; GOMEZ, C. Modeling the energy performance of LoRaWAN. **Sensors**, v. 17, n. 10, p. 2364, 2017.

CENTENARO, M.; VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, n. 5, p. 60–67, 2016.

CENTENO, M. A. An introduction to simulation modeling. *In*: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 28., 1996, Coronado. **Proceedings** [...]. Coronado: IEEE Computer Society, 1996. p. 15–22. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/873255. Acesso em: 21 nov. 2020.

CHEONG, P. S.; BERGS, J.; HAWINKEL, C.; FAMAEY, J. Comparison of LoRaWAN classes and their power consumption. *In*: IEEE SYMPOSIUM ON COMMUNICATIONS AND VEHICULAR TECHNOLOGY (SCVT), 2017, Leuven. **Proceedings** [...]. Leuven: IEEE, 2017. p. 1–6. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8240313. Acesso em: 21 nov. 2020.

CORREIA, L. H. A.; NOGUEIRA, J. M. S. Transmission power control techniques for MAC protocols in wireless sensor networks. *In*: IEEE NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM, 2008, Salvador. **Proceedings** [...]. Salvador: IEEE, 2008. p. 1049–1054. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/4575277. Acesso em: 21 nov. 2020.

DUARTE, A.; PANTRIGO, J. J.; PARDO, E.G.; MLADENOVIC, N. Multi-objective variable neighborhood search: an application to combinatorial optimization problems. **Journal of Global Optimization**, v. 63, n. 3, p. 515–536, 2015.

EVANS, D. **A Internet das Coisas:** Como a próxima evolução da Internet está mudando tudo. San Jose: Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG), 2011.
Disponível em: https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/executives/pdf/internet_of_things_iot_ibsg_0411final.pdf. Acesso em: 20 out. 2019.

FABER, M. J. **Performance Evaluation of the LoRa Wide Area Network Technology**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFES, Vitória, 2020.

GIACOMIN, J. C.; VASCONCELOS, F. H. Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: uma Abordagem da Camada Física. **INFOCOMP - Journal of Computer Science**, v. 5, n. 2, p. 83–92, 2006.

HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable Neighborhood Search Methods. *In*: FLOUDAS, CHRISTODOULOS A.; PARDALOS, P. M. (Ed.). **Encyclopedia of Optimization**. Boston: Springer, 2009. p. 3975–3989.

HANSEN, P.; MLADENOVIC N.; BRIMBERG, J.; PÉREZ, J. A. M. Variable Neighborhood Search. *In*: GENDREAU, M.; POTVIN, J. (Ed.). **Handbook of Metaheuristics**. 2. ed. New York: Springer, 2010. p. 61–86.

HOELLER, A. J; FRÖHLICH, A. A. Redes de sensores sem-fio sob a perspectiva do EPOS. *In*: SYMPOSIUM ON COMPUTING SYSTEMS, 11., 2010, Petropolis. **Proceedings** [...]. Petropolis, Brazil: SBC, 2010. Disponível em: https://www.lisha.ufsc.br/pub/Hoeller_ WSCAD_2010.pdf. Acesso em: 20 out. 2019.

HOSSEINI, S. M.; KHALED, A. A.; JIN, M. Solving Euclidean minimal spanning tree problem using a new meta-heuristic approach: Imperialist Competitive algorithm (ICA). *In*: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT, 2012, Hong Kong. **Proceedings** [...]. Hong Kong: IEEE, 2012. p. 176–181. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6837725. Acesso em: 21 nov. 2020.

KHAN, Z.; LEHTOMÄKI, J.; LELLAMO, S.; VUOHTONIEMI, R.; HOSSAIN, E.; HAN, Z. IoT Connectivity in Radar Bands: A Shared Access Model Based on Spectrum Measurements. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 2, p. 88–96, 2017.

KHUTSOANE, O. K.; ISONG, B.; ABU-MAHFOUZ, A. M. IoT Devices and Applications based on LoRa/LoRaWAN. *In*: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELETRONICS SOCIETY, 43., 2017, Beijin. **Proceedings** [...]. Beijin: IEEE, 2017. p. 6107–6112. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8217061. Acesso em: 21 nov. 2020.

LAVRIC, A.; POPA, V. A LoRaWAN: Long Range Wide Area Networks study. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMECHANICAL AND POWER SYSTEMS (SIELMEN), 11., 2017, Iasi. **Proceedings** [...]. Iasi: IEEE, 2017. p. 417–420. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8123360. Acesso em: 21 nov. 2020.

LIN, S.; MIAO, F.; ZHANG, J.; GANG, Z.; LIN, G.; STANKOVIC, J.; HE, T.; SON, S.; PAPPAS, G. ATPC: Adaptative Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks. **ACM Transactions on Sensor Networks**, v. 12, n. 1, p. 1–31, 2016.

LORA ALLIANCE. **A technical overview of LoRa ® and LoRaWAN ™ What is it?** San Ramon: LoRa Alliance, 2015. Disponível em: https://lora-alliance.org/sites/default/files /2018-04/what-is-lorawan.pdf. Acesso em: 20 out. 2019.

MARTINS, W. A. **Busca em Vizinhança Variável Aplicado na Solução do Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UNESP, Ilha Solteira, 2009.

MICHEL, J.; SANT, S. **Redes LoRaWAN**: **implantação e desenvolvimento de aplicações**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, São José, 2017.

MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable Neighborhood Search. **Computers and Operations Research**, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.

MORIN, É.; MAMAM, M.; GUIZZETTI, R.; DUDA, A. Comparison of the Device Lifetime in Wireless Networks for the Internet of Things. **IEEE Access**, v. 5, p. 7097–7117, 2017.

MOTTOLA, L.; PICCO, G. P. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. **ACM Computing Surveys**, v. 43, n. 3, p. 19, 2011.

MOURA, C. G. **Predição de campo em comunicação sem fio**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação, UFRN, Natal, 2009.

NADIR, Z.; AHMAD, M. I. Pathloss determination using Okumura-Hata model and cubic regression for missing data for Oman. *In*: INTERNATIONAL MULTICONFERENCE OF ENGINEERS AND COMPUTER SCIENTISTS (IMECS), 2010, Hong Kong. **Proceedings** [...]. Hong Kong: IAEN-ICCSA, 2010. v. 2, p. 804–807. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/44260689_Pathloss_Determination_Using_OkumuraHata_Model_And_Cubic_Regression_For_Missing_Data_For_Oman. Acesso em: 21 nov. 2020.

NEUMANN, P.; MONTAVONT, J.; NOEL, T. Indoor deployment of low-power wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN case study. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS AND MOBILE COMPUTING, NETWORKING AND COMMUNICATIONS (WIMOB), 12., 2016, New York. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2016. p. 1–8. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7763213. Acesso em: 21 nov. 2020.

NOKIA. **LTE-M – Optimizing LTE for the Internet of Things**. Finland: Nokia, 2015. Disponível em: https://lafibre.info/images/4g/201508_nokia_lte-m_white_paper.pdf. Acesso em: 20 out. 2019.

NOLAN, K. E.; GUIBENE, W.; KELLY, M. Y. An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things. *In*: INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATIONS AND MOBILE COMPUTING CONFERENCE (IWCMC), 2016, Paphos. **Proceedings** [...]. Paphos: IEEE, 2016. p. 439–444. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7577098. Acesso em: 21 nov. 2020.

OCHOA, M. N.; GUIZAR, A.; MAMAN, M.; DUDA, A. Evaluating LoRa energy efficiency for adaptive networks: From star to mesh topologies. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS AND MOBILE COMPUTING, NETWORKING AND COMMUNICATIONS (WIMOB), 13., 2017, Roma. **Proceedings** [...]. Roma: IEEE, 2017. p. 1–8. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8115793. Acesso em: 21 nov. 2020.

OLIVEIRA, R.; GUARDALBEN, L.; SARGENTO, S. Long range communications in urban and rural environments. *In*: IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTERS AND COMMUNICATIONS (ISCC), 2017, Heraklion. **Proceedings** [...]. Heraklion: IEEE, 2017. p. 810–817. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8024627. Acesso em: 21 nov. 2020.

PEREIRA, C. E. P.; CARVALHO, F. V. **A Internet das Coisas (IoT)**: **Cenário e Perspectivas no Brasil e Aplicações Práticas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Engenharia de Redes e Telecomunicações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Redes e Telecomunicações, Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2017.

POP, A. I.; RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good in LoRaWAN Based LPWA Networks? *In*: IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2017, Singapura. **Proceedings** [...]. Singapura: IEEE, 2017. p. 1–6. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8254509. Acesso em: 21 nov. 2020.

PÖTSCH, A.; HASLHOFER, F. Practical limitations for deployment of LoRa gateways. *In*: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON MEASUREMENT AND NETWORKING, 2017, Naples. **Proceedings** [...]. Naples: IEEE, 2017. p. 1–6. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8078360. Acesso em: 21 nov. 2020.

RABUSKE, M. H. B. **Estudo do protocolo LoRaWAN e implementação de uma rede privada com nós distribuídos**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.

REIS, J. V. A. **Meta-heurísticas baseadas em busca em vizinhança variável aplicadas a problemas de operação de transportes**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes - Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2013.

SANTOS, B. P.; SILVA, L. A. M.; CELES, C. S. F. S.; NETO, J. B. B.; PERES, B. S.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. M.; GOUSSEVSKAIA, O. N.; LOUREIRO, A. A. F. Internet das Coisas: da Teoria à Prática. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUIDOS (SBRC), 34., 2016, Salvador. **Anais** [...]. Salvador: SBC, 2016. p. 1–50. Disponível em: http://www.sbrc2016.ufba.br/downloads/anais/Minicursos SBRC2016.pdf. Acesso em: 20 nov. 2020.

SCHAFFERS, H.; KOMNINOS, N.; PALLOT, M.; TROUSSE, B.; NILSSON, M.; OLIVEIRA, A. Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation. **Future Internet Lecture Notes in Computer Science**, v. 6656, p. 431–446, 2011.

SEMTECH. **LoRa Modulation Basics**. Camarillo: Semtech Corporation, 2015. Disponível em: https://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf. Acesso em: 21 nov. 2020.

SEMTECH. **SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem Designer's Guide**. Camarillo: Semtech Corporation, 2013. Disponível em: https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets /uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRa%20Design%20 Guide.pdf. Acesso em: 20 out. 2020.

SEMTECH. **SX1276/77/78/79 Datasheet**. Camarillo: Semtech Corporation, 2020. Disponível em: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFfvaF_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE. Acesso em: 20 out. 2020.

SEMTECH. **SX1301 Datasheet**. Camarillo: Semtech Corporation, 2017. Disponível em: https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/44000000MDnR/Et1KWLCuNDI6MDagfSPAvqqp.Y869Flgs1LleWyfjDY. Acesso em: 20 out. 2020.

SILVA, J. C.; RODRIGUES, J. J. P. C. ; ALBERTI, A. M. ; SOLIC, P. ; AQUINO, A. L. L. LoRaWAN — A low power WAN protocol for Internet of Things: A review and opportunities. *In*: INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON COMPUTER AND ENERGY SCIENCE (SPLITECH), 2., 2017, Split. **Proceedings** [...]. Split: IEEE, 2017. p. 1–6. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/8019271. Acesso em: 21 nov. 2020.

SILVA, Y. S.; SERRANO, A. S.; ROCHA, H. R. O.; MORAES, R. E. N.; SILVA, J. A. L. Minimização de interferência com redução de potência em redes de sensores sem fio. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 51., 2019, Limeira. **Anais eletrônicos** [...]. Campinas: Galoá, 2019. Disponível em: https://proceedings.science/sbpo2019/papers/minimizacao-de-interferencia-com-reducao-de-potencia-em-redes-de-sensores-sem-fio?lang=pt-br. Acesso em: 25 nov. 2019.

STOČES, M.; VANEK, J.; MASNER, J; PAVLÍK, J. Internet of things (IoT) in agriculture - Selected aspects. **Agris On-line Papers in Economics and Informatics**, v. 8, n. 1, p. 83–88, 2016.

TAGLIALENHA, S. L. S.; ROMERO, R. Planejamento Da Expansão De Sistemas De Transmissão De Energia Elétrica Com Busca Em Vizinhança Variável. **Colloquium Exactarum**, v. 02, n. 01, p. 30–41, 2010.

WIXTED, A. J.; KINNAIRD, P.; LARIJANI, H.; TAIT, A.; AHMADINIA, A; STRACHAN, N. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. *In*: IEEE SENSORS, 2016, Orlando. **Proceedings** [...]. Orlando: IEEE, 2016. p. 1–3. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7808712. Acesso em: 21 nov. 2020.