

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# Alocação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa

### Willian Garcia Viega dos Santos

Orientador: Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Coorientador: Dr. Helder R. O. Rocha Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Coorientador: Dr. Jair Adriano Lima Silva Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

> Vitória-ES 26 de Novembro de 2020

Willian Garcia Viega dos Santos

## Alocação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa

Alocação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa

Linha de pesquisa: Telecomunicações

Orientador: Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto Universidade Federal do Espírito Santo -UFES

Coorientadores Dr. Helder R. O. Rocha e Dr. Jair Adriano Lima Silva Universidade Federal do Espírito Santo -UFES

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Vitória-ES 26 de Novembro de 2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

Santos, Willian Garcia Viega dos, 1991-

S237a

Alocação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa / Willian Garcia Viega dos Santos. - 2020. 81 f. : il.

Orientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto. Coorientadores: Helder Roberto de Oliveira Rocha, Jair Adriano Lima Silva.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Internet das coisas. 2. Algorítmos computacionais. 3. Análise de redes (Planejamento). 4. Sensoriamento remoto. 5. Radiofreqüência. I. Segatto, Marcelo Eduardo Vieira. II. Rocha, Helder Roberto de Oliveira. III. Silva, Jair Adriano Lima. IV. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. V. Título.

CDU: 621.3

Willian Garcia Viega dos Santos

### Alocação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa

Alocação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa

Trabalho aprovado. Vitória-ES, 21 de Dezembro de 2020

Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto Orientador

Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha Coorientador

> Dr. Jair Adriano Lima Silva Coorientador

**Dr. Celso Jose Munaro** Universidade Federal dos Espírito Santo

**Dr. Fábio de Oliveira Lima** Instituto Federal do Espírito Santo

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Vitória-ES 26 de Novembro de 2020 Willian Garcia Viega dos Santos

### A locação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa

Alocação de Recursos em Redes de Sensores IoT Híbrida ZigBee e LoRa

Trabalho aprovado. Vitória-ES, 21 de Dezembro de 2020

Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto Orientador

Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha Coorientador

> Dr. Jair Adriano Lima Silva Coorientador

Dr. Celso J ose Munaro Universidade Federal dos Espírito Santo

Dr. Fabilo de Oliveira Lima Instituto Federal do Espírito Santo

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES Programa de Pós-Graduação em Engenharia El étrica Vitória-ES 26 de Novembro de 2020



FOLHA DE ASSINATURAS

Emitido em 21/12/2020

#### FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC Nº ---/2020 - UFES - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO (ES - FEDERAL)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

### (Assinado digitalmente em 22/02/2021 12:14) FABIO DE OLIVEIRA LIMA

PROFESSOR DO ENSINO BASICO TECNICO E TECNOLOGICO SER-CFG (11.02.32.01.08.02.02) Matrícula: 1534604

Para verificar a autenticidade deste documento entre em https://sipac.ifes.edu.br/documentos/ informando 0 no campo de número, ano: 2020, tipo: FOLHA DE APROVAÇÃO-TCC, data de emissão: 22/02/2021 e o código de verificação: 1061cafb49



#### **PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por CELSO JOSE MUNARO - SIAPE 1172724 Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT Em 22/02/2021 às 14:23

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link: https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/142176?tipoArquivo=O



#### **PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por HELDER ROBERTO DE OLIVEIRA ROCHA - SIAPE 1860639 Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT Em 08/03/2021 às 09:04

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link: https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/152419?tipoArquivo=O



#### **PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por JAIR ADRIANO LIMA SILVA - SIAPE 1514954 Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT Em 08/03/2021 às 09:45

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link: https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/152449?tipoArquivo=O



#### **PROTOCOLO DE ASSINATURA**



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por MARCELO EDUARDO VIEIRA SEGATTO - SIAPE 1172919 Departamento de Engenharia Elétrica - DEE/CT Em 17/03/2021 às 06:57

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link: https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/158947?tipoArquivo=O

# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, à minha família e às pessoas do meu convívio por sempre me darem tanto apoio e amor. Em especial, à minha mãe, Nilzete, e ao meu pai, Wilhia Mar, que permanentemente me motivaram a ler e me incentivaram a estudar. Dedicaram-se e deram a mim, e à minha irmã, oportunidades para realizarmos os nossos sonhos. Agradeço, a minha irmã, Alice, pelo companheirismo. À minha namorada, Meika, por sempre estar ao meu lado e me fazer feliz. À Roselilian e ao Samuel por todo o suporte e carinho. Aos meus amigos e amigas que compartilharam comigo as alegrias e as lutas diárias. Agradeço aos meus professores, Marcelo, Helder e Jair, pela orientação no mestrado e,

principalmente, por terem me dado a oportunidade de trabalhar em uma iniciação científica, durante a graduação, o que impactou positivamente nas minhas trajetórias acadêmica e profissional. Ao Ricardo Calheiros da 2Solve, de quem sem apoio não teria sido possível realizar o mestrado. Por fim, aos meus amigos do LabTel e, em especial, ao Wesley, por todo o apoio.

"Falhar é uma possibilidade. Se você não está falhando, você não está inovando o suficiente." (Elon Musk)

# Resumo

Com o crescimento do número de dispositivos das redes IoT, aumentaram-se as exigências de confiabilidade de comunicação e uso eficiente de energia. Neste trabalho, é proposta uma topologia de rede híbrida para sensores IoT, utilizando as topologias *mesh* e estrela. Essa rede híbrida tem como objetivos melhorar a eficiência do consumo de energia e garantir a maior cobertura da rede para alocação dos sensores. Para o planejamento da rede, definindo os *clusters* da rede *mesh* e pontos da rede estrela, é proposta a fusão dos Algoritmos Genético e K-Medoids. Para a alocação de recursos nas redes *mesh* (ZigBee) e estrela (LoRa), são propostos Algoritmos de Dijkstra e Genético, respectivamente, de forma a minimizar o consumo de energia da rede. Dados experimentais levantados em campo foram utilizados para o planejamento da topologia de rede proposta. Foi realizado o planejamento de uma rede de 380 sensores espalhados por Vitória-ES que se conecta a um *gateway* em Vila Velha-ES. Após a execução dos algoritmos de planejamento e alocação de recursos, foram definidas 26 redes *mesh* e alocados os recursos em cada sensor de forma a economizar energia e garantir a comunicação.

Palavras-chave: IoT. Redes. Sensores.

# Abstract

With the growth in the number of devices connected to IoT networks, the requirements of communication reliability and efficient use of energy have increased. This research proposes a hybrid network topology for IoT sensors by using mesh and star topologies. This hybrid network aims to improve the efficiency of energy consumption and to ensure greater network coverage for sensor allocation. For network planning, defining mesh network clusters and star network points, a fusion of Genetic Algorithms and K-Medoids Algorithms was proposed. For the allocation of resources in the mesh (ZigBee) and star (LoRa) networks, Dijkstra and Genetic Algorithms were proposed, respectively, in order to reduce the energy consumed by the network. Experimental data collected through active intervention in the field were used to plan the proposed network topology. A network consisted of 380 sensors spread throughout Vitória-ES was planned to connect to a gateway in Vila Velha-ES. After executing the planning and resource allocation algorithms, 26 mesh networks were defined and the resources were allocated in each sensor to save energy and ensure communication.

Keywords: IoT. Networks. Sensors.

# Lista de Figuras

Figura 1 $-$	Topologias de rede em (a) estrela, (b) $mesh$ e (c) híbrida aplicadas em	
	redes de sensores para regiões urbanas	3
Figura 2 –	Rede híbrida estrela (LoRa) e <i>mesh</i> (ZigBee) proposta	4
Figura 3 –	Placa de circuito impressa projetada para funcionar como <i>cluster-head</i>	5
Figura 4 –	Rede híbrida com tolopogia estrela e $\mathit{mesh}$ utilizando LoRa	6
Figura 5 –	Rede de sensores sem fio em terreno irregular	7
Figura 6 –	Topologia híbrida entre uma rede $mesh$ Zig Bee e o ponto de acesso estrela	8
Figura 7 –	Topologia de rede em estrela	13
Figura 8 –	Topologia de rede em <i>mesh</i>	14
Figura 9 –	Taxa de transmissão versus alcance das tecnologias	17
Figura 10 –	Sinal típico LoRa.	20
Figura 11 –	Arquitetura da Rede LoRaWAN	22
Figura 12 –	Configurações para o Zigbee	24
Figura 13 –	Fluxograma para a determinação de K-medoids	27
Figura 14 –	Fluxograma do Algoritmo Genético	28
Figura 15 –	Fluxograma do algoritmo de Djikstra	30
Figura 16 –	Desafio: rede antes e depois da configuração com os algoritmos propostos.	32
Figura 17 –	Cluster Head: interface entre tecnologias LoRa e ZigBee	32
Figura 18 –	Formato do XBee adotado para módulos de comunicação	33
Figura 19 –	2Sense: Hardware do CH	34
Figura 20 –	Rede antes e depois do planejamento da rede híbrida com AG e K-Medoids	35
Figura 21 –	Rede Zig Bee após alocação de recursos definindo tipos de dispositivo . $\ .$	36
Figura 22 –	Rede Zig Bee para validação do Algoritmo e caminhos de cada sensor a o $\hfill \hfill \hfill$	
	coordenador utilizando menor potência	38
Figura 23 –	Rede ZigBee após execução do algoritmo que define tipo de dispositivo	40
Figura 24 –	Rede estrela LoRa para otimizar recursos	41
Figura 25 –	Estrutura do pacote LoRa	42
Figura 26 –	Rede antes e depois da execução dos algoritmos para alocação de recursos.	44
Figura 27 –	Configuração do experimento	45
Figura 28 –	Mapa com localização dos sensores experimentais e gerados	46
Figura 29 –	380 sensores experimentais e gerados para ligar à rede através dos	
	algoritmos apresentados e na topologia proposta	47
Figura 30 –	Custo versus número de iterações.	47
Figura 31 –	Redes $mesh$ e CH s eleitos para rede estrela após a execução do AG com	
	K-Medoids	48
Figura 32 –	Rede <i>mesh</i> configurada	49

Figura 33 –	CHs e <i>Gateway</i> para alocação de recursos através do AG	50
Figura 34 –	Custo da FO versus número de iterações	51
Figura 35 –	Resultados para (a) Potência, espalhamento e largura de banda; (b)	
	Energia; e (c) Tempo no ar <i>versus</i> distância	51

# Lista de Tabelas

17
37
37
40
42
43
45
46
49
50

# Lista de Abreviaturas e Siglas

- 3GPP 3rd Generation Partnership Project
- AG Algoritmo Genético
- ANATEL Agência Nacional de Telecomunicações
- AVAC Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
- BW Largura de Banda
- CH Cluster Head
- CPT Cheapest Paths Tree
- CRC Cyclic Redundancy Check
- CSS Modulação de Espectro de Espalhamento
- DBPSK Diferential Binary Phase-Shift Keying
- DL Downlink
- EUA Estados Unidos da América
- FDM Multiplexação por divisão de frequência
- FO Função Objetivo
- GMSK Modulação estreita da faixa
- GSM Global System for Mobile Communications
- ID Identificação
- IEEE Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
- IETF Internet Engineering Task Force
- IIoT IoT Industrial
- IoT Internet das Coisas
- IP Protocolo de Internet
- IPO Serviços Gerais de Pacote por Rádio
- ISM Industrial, Scientific and Medical

#### LoRa Long Range

LoRaWAN Rede de longa distância LoRa

- LPWAN Rede de Área Ampla de Baixa Potência
- LTE Long Term Evolution
- M2M Comunicação Máquina para Máquina

MAC Endereço de Controle de Acesso à Mídia

MTSP Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes

- NB-IoT Narrowband IoT
- PAM Particionamento em Torno dos Medoides

PHDR Cabeçalho da Camada Física do LoRa

PHY Camada Física

- PL Nível de Potência na Transmissão
- PN Sequência Pseudo-Aleatória
- PPPDU PHY Protocol Data Unit
- QoS Qualidade de Serviço
- RC Radio Configuration
- RSSF Redes de Sensores Sem Fio
- SCADA Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados
- SD Solid State Drive
- SF Fator de Espalhamento
- SNR Relação Sinal Ruído
- UE União Européia
- UL Upwnlink
- UMTS Universal Mobile Telecommunications System
- UNB Ultra Narrow Band
- Wi-Fi Wireless Fidelity

WLAN Rede de Área Local sem fio

WMAN Rede de Área Metropolitana sem Fio

WPAN Rede de área pessoal

WSN Wireless Sensor Network

WWAN Rede de longa distância sem fio

# Sumário

1 -	- Intr	odução	1
	1.1	Motivação	2
	1.2	Trabalhos correlacionados	5
	1.3	Objetivos gerais e específicos	9
	1.4	Principais contribuições	10
	1.5	Estrutura da dissertação	11
<b>2</b> -	- Top	ologias de rede	12
	2.1	Redes estrela e árvore	12
	2.2	Rede <i>mesh</i>	14
3 -	- Teci	nologias de comunicação sem fio para IoT	16
	3.1	LoRa	19
		3.1.1 Modulação LoRa	19
		3.1.2 LoraWAN	21
		3.1.3 Regulamentação Lora no Brasil	22
	3.2	ZigBee	22
		3.2.1 Modulação ZigBee	23
		3.2.2 Configuração dos dispositivos	23
		3.2.3 Regulamentação ZigBee no Brasil	24
4 -	- Téc	nicas de IA aplicados à rede de sensores	25
	4.1	K-Medoids	25
	4.2	Algoritmo Genético	26
	4.3	Algoritmo de Dijkstra	28
5 -	- Met	odologia de planejamento de uma rede híbrida ZigBee e LoRa	31
	5.1	Hardware para interface ZigBee e LoRa - Cluster Head	32
	5.2	Planejamento da rede híbrida com Algoritmo Genético e K-Medoids	34
	5.3	Alocação de recursos para rede $mesh$	36
	5.4	Alocação de recursos para rede estrela	40
6 -	- Exp	erimentos e resultados	45
	6.1	Planejamento da rede híbrida e alocação de recursos	46
7 -	- Con	clusão	52

Referências	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	Ę	53	;
-------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	--	---	---	----	---

# 1 Introdução

A Internet das Coisas (em inglês, Internet of Things — IoT) é uma rede aberta e abrangente composta por objetos dotados de inteligência, auto-reconfiguráveis diante de mudanças ou contingências, com capacidade de compartilhar informações, dados e recursos [1]. Essa rede permite a comunicação entre humano para humano, humano para coisas e coisas para coisas, fornecendo identidade única a cada objeto. Na última década, a IoT apresentou um crescimento relevante, com aproximadamente seis bilhões de dispositivos conectados, e estima-se que até o final de 2020 outros 19 bilhões desses dispositivos serão usados [2]. Com o aumento considerável dos pontos conectados, surgiram preocupações com a estrutura da rede a fim de aumentar sua confiabilidade [3].

As "coisas" no IoT dizem respeito às diversas possibilidades de objetos sensoriados que podem ser adicionados à rede — dispositivos como gadgets, ou outros que não consideramos eletrônicos em sua totalidade, como comida e roupas; móveis; materiais, peças e equipamentos; mercadorias e itens especializados; marcos históricos, monumentos, obras de arte e toda a miscelânea de comércio, cultura e sofisticação; além de pessoas e animais. Assim, as "coisas" são objetos reais no mundo físico e/ou material e podem ser conectadas na nuvem através de diversos métodos disponíveis na literatura e utilizando as mais diversas tecnologias, como: 2G, 3G, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, Z-Wave, SigFox e LoRa (em inglês, Long Range) [3]. Cada uma dessas opções tem seus prós e contras, bem como compensações entre consumo de energia, distância de transmissão e largura de banda. Além disso, essas tecnologias usam diferentes topologias, como ponto a ponto, estrela, malha e árvore [4]. A escolha da opção mais adequada para determinado projeto depende de sua aplicação e dos requisitos determinados no planejamento da rede; porém, todas elas compartilham os mesmos objetivos: adquirir os dados e transmiti-los para a nuvem.

Essa tecnologia é uma realidade e tem agregado importância a diversas áreas, tais como industrial, automotiva, empresarial, equipamentos eletrônicos, entre outras. Outra aplicação no cotidiano inclui o controle de dispositivos eletrônicos residenciais à distância, também replicado no setor industrial. Também, é possível citar a adoção de sistemas de gestão em maior escala, por meio dos quais se pode controlar e monitorar remotamente a iluminação pública em diversos municípios brasileiros.

A arquitetura e planejamento da rede IoT é objeto de diversos estudos. Em [5], os autores investigaram o potencial de aplicação de uma arquitetura descentralizada de duas camadas para melhorar o desempenho da rede em termos de tempo real, confiabilidade e consumo de energia. Em [6], arquitetura de rede de sensores sem fio de duas camadas é proposta como uma solução para sistema de monitoramento estrutural de infraestruturas civis. Observa-se, na literatura, como o uso de arquiteturas combinadas, em duas camadas, pode agregar e trazer vantagens a uma rede de "coisas".

Como uma rede IoT pode ser composta por dezenas, ou mesmo centenas, de dispositivos, é necessário utilizar recursos computacionais e pesquisa operacional para o planejamento da rede e alocação de recursos. A combinação de Algoritmos Genéticos com algoritmos de agrupamento, como K-means ou K-medoides, pode ser encontrada na literatura para solução de diversos problemas. Em [7], por exemplo, é usada para resolver o Problema de Múltiplos Caixeiros Viajantes (MTSP). Já em [8] é utilizada para melhorar o desempenho classificatório da classe minoritária. A mesma combinação também é utilizada em [9] para resolver o problema de navegação de rota do robô. [10] utiliza essa combinação para propor um protocolo que é mais eficiente em energia e mais confiável no processo de agrupamento.

Neste trabalho, é proposta uma arquitetura de duas camadas e mista, estrela-*mesh*, para redes de sensores IoT, e um algoritmo de alocação desses sensores é desenvolvido utilizando Algoritmo Genético (AG) binário e K-Medoids para agrupamento. Para as redes *mesh* (ZigBee) e estrela (LoRa) formadas, foram utilizados Algoritmos de Dijkstra e AG de codificação real, respectivamente, para alocar os recursos de forma a minimizar o consumo de energia da rede e garantir, matematicamente, a comunicação. A escolha das tecnologias LoRa e ZigBee utilizadas para cada topologia será apresentada na Seção 3. Os dados utilizados nos algoritmos foram obtidos experimentalmente, em campo, e parte deles foi gerada computacionalmente. Com o propósito de funcionar como uma "ponte" entre as tecnologias propostas (LoRa e ZigBee), foi desenvolvido um *hardware* e produto em parceria com a empresa 2Solve.

A Figura 1 ilustra as topologias de rede em estrela (a), *mesh* (b) e a híbrida proposta (b) aplicadas em redes de sensores para regiões urbanas, onde o *gateway* conectado à *internet* é a estação rádio-base. Na Figura 1(a), utilizando a rede estrela LoRa, os sensores na região sombreada não conseguem estabelecer comunicação. Na Figura 1(b), utilizando a rede *mesh* ZigBee, não foi possível se conectar à *internet* devido à longa distância até a radio-base. Como visto na Figura 1(c), apenas foi possível estabelecer a comunicação de todos os pontos com a estação radio-base utilizando a topologia híbrida proposta neste trabalho.

### 1.1 Motivação

Uma estratégia robusta para o planejamento de uma rede IoT, garantindo boa cobertura e eficiência de consumo de energia, requer uma escolha adequada da topologia e da tecnologia de comunicação, além de um protocolo apropriado. Para tanto, neste





Figura 1 – Topologias de rede em (a) estrela, (b) *mesh* e (c) híbrida aplicadas em redes de sensores para regiões urbanas.

trabalho, é proposta uma arquitetura híbrida: uma solução que combina as topologias de rede *mesh* e estrela. Para a topologia estrela são utilizadas LoRa e LoRaWAN e para a topologia *mesh* é utilizada a tecnologia ZigBee, como mostrado na Figura 2.

O objetivo da arquitetura de rede proposta é agregar as características das duas topologias ao aliar o baixo consumo de energia e cobertura em longas distâncias da topologia estrela (LoRa) com a capacidade de cobrir regiões, que estariam em sombras para o gateway LoRa, com a topologia mesh (ZigBee). Além disso, os dispositivos ZigBee possuem configurações que permitem que os end-nodes hibernem (sleep mode) para economizar bateria.

A vantagem da topologia híbrida estrela-*mesh* proposta é a melhoria da cobertura de comunicação da rede IoT, cobrindo áreas de sombra para uma rede apenas em estrela. Em uma rede convencional LoRaWAN, os sensores na zona sombreada não podem enviar os seus dados à rede devido a obstáculos, ou à topografia da região — o que não ocorre na topologia proposta ao se criar uma rede *mesh*. Essas regiões de sombreamento para uma rede LoRaWAN podem surgir por diversos motivos no meio urbano, tais como prédios,



Figura 2 – Rede híbrida estrela (LoRa) e mesh (ZigBee) proposta.

construções ou irregularidade do terreno. Já no meio rural, as regiões de sombreamento surgem devido a árvores, vegetação e, principalmente, irregularidade do terreno [11].

O planejamento de uma rede de sensores com muitos dispositivos é um desafio e requer alocação otimizada de recursos e definição das configurações de cada dispositivo. Esse cenário será recorrente com a massificação do IoT. Por isso, neste trabalho, além da proposta de melhoria da qualidade de serviço (QoS) com cobertura de zonas sombreadas, foram propostos algoritmos de otimização para planejar a topologia e para garantir o consumo eficiente de energia, visto que os sensores em uma rede IoT são geralmente alimentados por bateria. O planejamento dos agrupamentos e a seleção dos *cluster-heads* (pontos da rede que funcionam com as duas tecnologias embarcadas) são realizados utilizando AG binário com K-Medoids dentro da função objetivo. O planejamento para alocação de recursos na rede *mesh* é feito através de um algoritmo que utiliza Dijkstra, enquanto o planejamento da rede LoRa utilizando o AG de codificação real.

Não há tecnologia disponível no mercado que utilize as duas tecnologias de comunicação escolhidas neste trabalho de forma simultânea. Por isso, para realizar a interface entre as duas tecnologias de comunicação (*cluster-head*) foi desenvolvido, em parceria com a empresa 2Solve, um produto que atendesse a essa necessidade. Ele possui dois *slots* de comunicação em que podem ser acoplados os módulos LoRa e ZigBee, além de outras tecnologias, caso seja necessário. A placa de circuito impressa projetada pode ser vista na Figura 3.



Figura 3 – Placa de circuito impresso projetada para funcionar como cluster-head.

### 1.2 Trabalhos correlacionados

LoRa é um padrão de IoT de longo alcance e baixa potência que usa a técnica de espectro de propagação de pulsos de radar de alta intensidade comprimido *chirp* (do inglês, *Compressed High Intensity Radar Pulse*). De acordo com [12], em uma rede LoRa, as possibilidades de configuração da camada física presente nessa tecnologia não só fornecem grande flexibilidade entre a taxa de dados e a sensibilidade do receptor, mas também impactam na conectividade para acessos múltiplos de dispositivos ao *gateway*. Ainda em [12], os autores desenvolveram uma rede com múltiplos saltos, em topologia estrela, para melhorar a capacidade da rede. Cada sub-rede com raiz em um nó coletor é alocada a uma configuração específica de fator de espalhamento com base no *cluster* de rede, permitindo que a transmissão de pacotes em paralelo se torne viável.

Em [13] é proposta uma rede híbrida com LoRa *Mesh* e LoRaWAN para lidar com o desafio das áreas de sombra da rede. Nessa proposta, uma rede em malha de nós LoRa é conectada a um nó Proxy que funciona como um coordenador de malha e também está conectado à rede LoRaWAN. A arquitetura híbrida proposta pode ser vista na Figura 4.

Em [11], é demonstrado que apesar da LoRa apresentar bom desempenho para transmissão de longo alcance, os seus sinais de rádio podem ser atenuados com a distância, edifícios, árvores e interferências externas de rádio. LoRa requer implantação densa de gateways LoRa, em meios urbanos, para garantir que os dispositivos LoRa internos possam transferir dados para gateways remotos. Ainda de acordo com os autores, a rede mesh sem fio é uma solução para aumentar o alcance da comunicação e a taxa de entrega de pacotes sem a necessidade de instalar gateways adicionais. O estudo ainda apresenta um sistema de rede mesh LoRa para monitoramento de aplicações IoT em grandes áreas.

Na tese [14], são abordadas e propostas soluções na área de projeto e avaliação de desempenho de redes de sensores sem fio, baseadas na topologia de rede em árvore com foco na eficiência energética e comportamento em tempo real. Os protocolos IEEE



Figura 4 – Rede híbrida com tolopogia estrela e *mesh* utilizando LoRa [13].

802.15.4/ZigBee, que são as tecnologias líderes para redes de sensores sem fio (RSSF), foram escolhidos por sua capacidade de fornecer garantias de QoS para aplicações sensíveis ao tempo e com eficiência energética.

Em trabalhos correlacionados, observa-se que as topologias *mesh* e estrela apresentam prós e contras, assim como as tecnologias LoRa e ZigBee. Foram apresentadas as desvantagens de se utilizar uma rede LoRaWAN, devido ao sombreamento, bem como as vantagens de mesclar com outra topologia, criando uma rede em dois níveis. Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho com a proposta deste estudo, a saber: mesclar as tecnologias LoRa e ZigBee em uma mesma rede.

De acordo com [6], uma das limitações predominantes em redes de sensores sem fio é o consumo de energia. Nesse artigo é investigada a aplicação potencial de uma arquitetura descentralizada de duas camadas, em redes de sensores sem fio de grande escala, em que uma rede de área local sem fio (WLAN) de camada superior atua como *backbone* para uma rede de sensores sem fio. Assim, os autores pretendiam fornecer serviços mais confiáveis e menor consumo de energia na rede de sensores subjacente e, para tal, foi utilizado o protocolo IEEE 802.11 WLAN [15] no topo do protocolo IEEE 802.15.4 projetado para redes de área privada sem fio de baixa taxa (LR-WPAN).

Em [16], os autores investigaram uma comunicação eficiente em termos de energia das redes de sensores devido à energia limitada da bateria dos dispositivos-sensores. A fim de resolver o problema uma versão do algoritmo genético foi criada, Algoritmo Genético Dominante, que determina a rota entre nós sensores e define a trajetória para maior eficiência energética. Resultados experimentais mostraram que o algoritmo entrega a melhor solução, além de possuir rápida convergência. Em [17], é implementada uma otimização para localização de roteadores de rede sem fio baseado em algoritmo genético, com restrição de energia de sensores usados para monitoramento de incêndios florestais em terreno irregular. A função objetivo (FO), a distância total entre os roteadores, deve ser minimizada de forma a otimizar a vida útil da rede de sensores sem fio. A Figura 5 mostra como ficaram dispostos os roteadores.



Figura 5 – Rede de sensores em fio em terreno irregular [17].

Existem diversas aplicações de K-medoids em redes de sensores, geralmente para reduzir o consumo de energia e prolongar a vida útil da rede por meio do particionamento em *clusters*, o que reduz a distância de comunicação dos nós sensores. Em [18], os pontos principais e concentradores de cada *cluster*, chamados de *cluster-heads*, foram definidos e os resultados mostraram que houve um equilíbrio da carga da rede entre os *clusters* e a eficiência energética pôde ser melhorada, bem como o tempo de vida da rede pôde ser estendido de forma eficaz. O K-medoids também pode ser associado a outros algoritmos, como em [19], em que após a geração dos *clusters*, o algoritmo de árvore de extensão mínima aumenta a eficácia da rede.

Na literatura científica, o algoritmo de Dijkstra possui inúmeras aplicações em redes de sensores sem fio. Ele pode ser usado para reconfiguração de rota dos dados que foram concentrados nos *cluster-heads* (CH) em situações de falhas e perdas de rotas [20]. Em [21], os autores agruparam sensores em *clusters*, elegeram os *cluster-heads* e melhoraram consideravelmente o consumo de energia de uma rede de sensores sem fio ao utilizar o Algoritmo de Dijkstra. Dessa maneira, os autores atingiram o objetivo de prolongar a vida útil da rede de sensores. Funções de pesos multiobjetivos para redes de sensores são tratadas em [22] e um método sistemático dorme-acorda em [23], gerados a fim de garantir a redução do consumo de energia e aumentar a taxa de dados (*throughput*) da rede. Em [24], é elaborada a programação de roteamento de dados via cobertura de área de energia eficiente no protocolo de rede de sensores sem fio com base no algoritmo Dijkstra *Front-Back* proposto. Esse protocolo melhora o desempenho da rede e permite fazer as melhores escolhas quanto ao uso de apenas um nó em cada *cluster* para monitorar e comunicar dados usando o caminho mais curto com o menor custo.

Como pode ser observado nos trabalhos citados, o uso de recursos computacionais para o planejamento da rede e alocação de recursos é necessário para se obter bons resultados e uma rede mais eficiente, com menor consumo de energia e garantia de *links* de comunicação. Diante disso, neste trabalho, para se definir quais pontos da rede híbrida serão da rede *mesh* e quais serão da rede estrela foi desenvolvido um Algoritmo Genético Binário, em que o K-medoids faz parte da função objetivo. Esse algoritmo também define quais os pontos da rede serão os *cluster-heads*. Para a configuração de cada dispositivo da rede estrela LoRa foi desenvolvido um Algoritmo Genético Real. Para a configuração de cada dispositivo da rede *mesh* ZigBee foi desenvolvido um algoritmo que utiliza Dijkstra. Os algoritmos desenvolvidos não são métodos já descritos na literatura e foram desenvolvidos neste trabalho para atingir os objetivos de planejamento e alocação de recursos da rede híbrida proposta, utilizando os dados obtidos em campo e gerados no computador.

Quanto à aplicação da topologia proposta nesta dissertação, de acordo com [25], uma topologia híbrida *mesh*-estrela pode ser utilizada em aplicações agrícolas, onde vários sensores são conectados em malha a um nó sorvedouro que, por sua vez, se conecta a um ponto de acesso operando como um *gateway* responsável por completar a ligação com a *internet*. A ilustração deste tipo de topologia é mostrada na Figura 6.



Figura 6 – Topologia híbrida entre uma rede *mesh* ZigBee e o ponto de acesso estrela [25].

Para [26], as aplicações para agricultura de precisão utilizando rede de sensores IoT de baixa latência são diversas, como monitoramento atmosférico, monitoramento de solo, monitoramento de água, monitoramento de plantas, controle de irrigação, controle de fertilizantes, pesticidas e controle de iluminação. Algumas tecnologias utilizadas na literatura, bem como a frequência de envio de leitura de dados e referências, podem ser vistas na Tabela 1. A topologia proposta pode ser utilizada para todos esses casos, melhorando o QoS (por incluir regiões sombreadas) e sendo planejada para melhorar a eficiência do consumo de energia.

Domínio Aplicação	Tec. de rede sem fio	Geração de tráfego	Referência
Controle de irrigação	Wi-Fi HaLow	4 minutos	[27]
Monitoramento de vinhedos	LoRaWAN e 3G	30 minutos	[28]
Monitoramento de plantas	Wi-Fi Mesh	5 a 15 minutos	[29]
Monitoramento atmosférico	Wi-Fi e 4G	10 minutos	[30]
Monitoramento de vinhedos	$4\mathrm{G}$	15 minutos	[31]
Telemetry	Wi-Fi e Bluetooth	1 minutos	[32]

Tabela 1 – Aplicações agrícolas em que a topologia proposta pode ser utilizada

Em aplicações de controle de irrigação são utilizados sensores de umidade e temperatura, que medem as condições climáticas e umidade do solo mediante as leituras dos sensores e regras pré-determinadas. Em [33], foi utilizada uma WSN híbrida ZigBee e Wi-Fi para um sistema inteligente de irrigação. Em [34], os autores utilizaram o ZigBee e GPRS para automatizar o processo de irrigação e investigar o desempenho e a qualidade do enlace de rádio através de medições com o indicador de potência RSSI (em inglês, *Received Signal Strength Indicator*). Além disso, os autores monitoraram a vida útil da bateria para os nós sensores e puderam verificar como o tempo de vida da bateria do sensor afeta na robustez da implantação da rede de sensor sem fio. Utilizando a topologia proposta neste trabalho, ao invés do Wi-Fi ou GPRS, seria utilizado LoRaWAN, tecnologia que consome menos energia que as duas anteriores.

Além das aplicações agrícolas, uma rede de sensores sem fio com a topologia hibrida LoRa e ZigBee pode ser utilizada para diversas outras aplicações, tais como urbanas, industriais, casas inteligentes e monitoramento ambiental, desde que não demandem aplicações em tempo real.

### 1.3 Objetivos gerais e específicos

O principal objetivo é projetar uma rede IoT de longo alcance e baixa potência para alta latência. Para tanto, são utilizadas as redes em estrela, para aumentar a distância de cobertura, *mesh*, para cobrir as zonas sombreadas. A fim de atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Propor técnicas de agrupamento e otimização para planejamento de rede com topologia híbrida estrela e *mesh*;
- Otimizar os recursos em rede Zigbee considerando a potência de transmissão (*PL*) e o tipo dispositivo (*end-node*, roteador ou coordenador);
- Otimizar os recursos em rede LoRa considerando a largura de banda (BW), o fator de espalhamento (SF) e a potência transmitida (PTx);
- Obter dados experimentais para validação do modelo proposto;
- Desenvolver *hardware* que se comunique utilizando as duas tecnologias de comunicação utilizada.

### 1.4 Principais contribuições

As principais contribuições deste trabalho estão presentes nas seguintes publicações:

 Santos, Willian G. V.; Costa, Wesley S.; Faber, Menno J.; Silva, Jair A. L.; Rocha, Helder R.; Segatto, Marcelo E. V., Sensor Allocation in a Hybrid Star-Mesh IoT Network using Genetic Algorithm and K-Medoids, em 2019 IEEE Latin American Conference on Communications (LATINCOM), Salvador, Brasil, 2019.

Em "Sensor Allocation in Hybrid Star-Mesh IoT Network using Genetic Algorithm and K-Medoids", foram publicados os resultados de um dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho, que teve como objetivo definir quais pontos da rede pertenciam à rede mesh e quais pertenciam à rede estrela, além de definir os cluster-heads, através de um Algoritmo Genético Binário com K-Medoids na função objetivo.

 Costa, Wesley S.; Silva, Jair. A.; Rocha, Helder. R.; Santos, Willian. G. V.;Silva, Yngrid. S. P, Planejamento de Sistemas Heterogêneos de Comunicações para Medições Smart Grids baseado em Algoritmo Genético, em LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2019, Limeira. Anais eletrônicos. Campinas, Galoá, 2019.

Neste trabalho, foi publicado um dos estudos iniciais desta dissertação, que avaliou o uso de Algoritmo Genético para o planejamento de redes híbridas com uma rede sem fio ZigBee se conectando em um *backbone* de fibra óptica para aplicações em *Smart Grids*.

 Faber, Menno J.; Zwaag, Klaas. M. V.; Santos, Willian G. V. D.; Rocha, Helder R.; Segatto, Marcelo E. V.; Silva, Jair A. L., A Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology, em IEEE Sensors Journal, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2987776. Em "A Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology" foi publicada parte dos experimentos de campo utilizados nesta dissertação, mas com o propósito de se estudar a propagação do sinal LoRa e avaliar o modelo de atenuação Okumura-Hata. Essa etapa foi importante para a alocação de recursos da rede estrela LoRa, podendo garantir, matematicamente, a comunicação com o gateway utilizando a menor energia por bit.

### 1.5 Estrutura da dissertação

O trabalho está organizado da seguinte maneira: o Capítulo 2 trata das topologias de rede usadas. Logo depois, as tecnologias de comunicação sem fio para IoT com ênfase nas tecnologias LoRa e ZigBee são apresentados no Capítulo 3. Em seguida, no Capítulo 4, são abordadas as técnicas de inteligência artificial (IA) aplicadas à rede de sensores. A metodologia de planejamento e alocação de recursos de uma rede híbrida ZigBee e LoRa é descrita no Capítulo 5. Os experimentos realizados para validar os algoritmos desenvolvidos e os resultados são apresentados no 6. Finalmente, o Capítulo 7 apresenta as conclusões e os trabalhos futuros.

## 2 Topologias de rede

Vários tipos de topologias de rede podem ser usados para criar uma rede de sensores IoT e as mais comuns são: ponto-a-ponto, estrela, árvore e *mesh*. Cada uma apresenta suas vantagens e desvantagens que devem ser consideradas na fase de projeto da rede e escolha da tecnologia de comunicação. A topologia da rede de sensores sem fio afeta a conectividade e a organização da rede, bem como várias métricas de desempenho, como confiabilidade da comunicação, escalabilidade da rede, auto-organização, capacidade, eficiência de energia, tempo de vida da rede, latência de dados, entre outros [4]. Sendo assim, é necessário analisar e estudar as topologias de rede.

Para [35], a primeira decisão a ser considerara na implantação de uma rede de sensores sem fio é referente à arquitetura da rede, incluindo, entre outros fatores, os protocolos de comunicação e a topologia. De acordo com [36], a arquitetura e os protocolos de rede são os principais influenciadores na determinação da vida útil da bateria de um nó, na capacidade da rede, na qualidade do serviço, na segurança e na variedade de aplicações atendidas pela rede. Outros fatores que podem influenciar os projetos de redes de sensores sem fio (WSNs - *Wireless Sensor Networks*), e que devem ser bem analisados, são: o ambiente de operação, a tolerância a falhas, a escalabilidade, as restrições de *hardware*, os meios de transmissão e o consumo de energia da rede. Entende-se, portanto, que encontrar uma arquitetura escalável, flexível, segura, econômica e capaz de lidar com o complexo cenário de IoT é um dos principais obstáculos à rápida adoção da IoT.

Enquanto as redes estrela e *mesh* são utilizadas para conectar multiplos nós ou *end-devices*, a topologia ponto a ponto é utilizada para conectar dois dispositivos um ao outro. Uma das vantagens desta topologia é a simplicidade quando comparada às topologias estrela e *mesh*, uma vez que a topologia é um fluxo de dados unidirecional ou bidirecional entre dois pontos. A maior desvantagem da topologia de rede ponto a ponto é a inutilidade para a IoT, já que não é aplicável ter um receptor falando com um único nó em vez de diversos outros nós [37]. Por isso, ela geralmente é usada em Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*), sistemas de dados de tráfego ou em sistemas de transmissão ponto a ponto (como rádios da polícia e/ou dos bombeiros).

### 2.1 Redes estrela e árvore

A rede estrela é uma das formas mais simples de topologia de comunicação, uma vez que possui um roteador, ou *gateway*, que se conecta a todos os terminais, ou nós, da rede. A maioria das tecnologias de rede de longa distância, como LoRaWAN, 2G, 3G, além

de redes Wi-Fi, usa a topologia de rede em estrela [4]. A Figura 7 ilustra a topologia em estrela na conexão entre os sensores e os *gateway*.



Figura 7 – Topologia de rede em estrela.

A vantagem da topologia estrela é que toda a complexidade da rede é direcionada para um nó central, de modo que todos os outros, precisem somente de se comunicar em seu tempo ou intervalo de frequência. Isso torna a expansão da rede mais fácil e faz com que a falha em um nó, ou sensor, não afete o restante da rede. Em contrapartida, uma falha no dispositivo central impossibilita a transmissão de dados ao longo da rede [37].

Uma extensão natural e lógica da topologia estrela é a topologia em árvore, na qual o nó coletor é a raiz e os nós em diferentes níveis na hierarquia são conectados por meio de *links* diretos. É possível ver na Figura 7 a conexão dos *Cluster Heads* com a estação base *Base Station*, criando uma nova hierarquia [4].

Nesse tipo de topologia, a área de cobertura fica limitada ao alcance de comunicação da estação base. Segundo [38], uma parte considerável das novas tecnologias de rede de área ampla e de baixa potência (LPWAN - *low-power wide-area network*) utiliza a topologia em estrela. O autor destaca ainda que em relação à topologia em malha, a topologia em estrela e LPWAN forneceriam um melhor desempenho no consumo de energia, visto que em uma rede em malha grande parte da energia seria desperdiçada por conta das retransmissões necessárias ao encaminhamento do tráfego. Uma das desvantagens da topologia estrela se dá quando um ponto de acesso e um determinado nó estão ligados por um enlace muito longo, pois mais energia é consumida para enviar uma mensagem e também podem ocorrer retransmissões caso o pacote não alcance o destino final.

### 2.2 Rede *mesh*

Na topologia *mesh*, todos os nós cooperam com a destinação dos pacotes de dados. Nessa disposição dos nós, cada sensor não apenas transmite e recebe pacotes, mas também possui a função de roteador para os pontos vizinhos. A comunicação ocorre entre os nós e o *Gateway* (que se conecta à rede externa) ou entre os próprios nós. Essa topologia é mostrada na Figura 8 e normalmente é utilizada para automação residencial, medição inteligente de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC), edifícios inteligentes, entre outros. Os padrões que dependem da topologia *mesh* incluem Zigbee, Z-Wave e Thread [4] [37].



Figura 8 – Topologia de rede em mesh.

A maior vantagem da topologia mesh é a sua alta tolerância às falhas, pois oferece caminhos redundantes por toda a rede. Por exemplo, se um nó de roteamento falhar ou o *link* entre dois nós tornar-se indisponível, a rede se reconfigurará automaticamente em torno do componente com falha [39].

A principal desvantagem da topologia *mesh* é que as distâncias de comunicação entre dois nós são bastante limitadas, comparando-se à topologia estrela, já que é necessário utilizar parte dos pacotes para gerenciar e manter a rede, utilizando-se mais banda. Isso significa que nós desnecessários são adicionados nós à rede apenas para manter a malha conectada quando se deseja conectar pontos que estão distantes da rede. Desse modo, se um nó for perdido em um ponto de estrangulamento, parte da rede poderá falhar [37] [39].

Nesse modo de operação, obstáculos que impedem a comunicação podem ser evitados através dos nós intermediários, ampliando-se, assim, a confiabilidade da rede.
Múltiplos caminhos podem ser construídos dinamicamente para levar os dados de uma extremidade a outra da rede, expandindo-se a área de cobertura. Embora a topologia em malha tenha sido amplamente usada para estender a cobertura de redes sem fio de curto alcance, seu alto custo de implantação é uma desvantagem considerável na conexão de um grande número de dispositivos distribuídos geograficamente, por causa dos pontos de rede extras tão somente para a repetição dos pacotes [38].

Padrões de comunicação de curto e médio alcance, como o ZigBee, podem se beneficiar dessa característica de múltiplos caminhos para ampliar o alcance de comunicação em áreas extensas. Essa topologia é adequada, por exemplo, para uma grande área de cobertura, onde haverá muitos nós de sensores e onde a latência não seja um fator crítico, como demonstra [40]. Devido a protocolos e algoritmos específicos, a topologia em malha propicia às redes de comunicação sem fio a capacidade de auto-organização, roteamento e cooperação, ao custo de uma maior complexidade na implementação. A abordagem de gerenciamento auto-organizado dos nós pode melhorar consideravelmente a robustez da rede, resultando em uma tecnologia de rede em malha com possibilidade de regeneração através de algoritmos [41].

# 3 Tecnologias de comunicação sem fio para IoT

A fim de possibilitar a conexão de diversos dispositivos em uma rede IoT, diversas tecnologias são utilizadas como GPRS, Sigfox, *Narrowband* IoT (NB-IoT), LoRa, ZigBee, entre outras. Na maioria das aplicações, além dos requisitos de taxa de transmissão e alcance, os requisitos de energia e vida útil da bateria são extremamente importantes, pois a maioria é alimentada por bateria (e não por fontes externas). Uma tecnologia de comunicação ou topologia não servirá para todas as aplicações de IoT, pois diferem em diversos aspectos. De acordo com os requisitos do projeto, é possível escolher a tecnologia mais adequada para a aplicação [42].

Tecnologias como GPRS e Wi-Fi (por exemplo, IEEE 802.11a/b/g/n/ac) são consideradas mais sofisticadas por ter maiores taxas de transmissão e alcance; porém, exigem nós com maior capacidade de *hardware*, armazenamento, processamento e energia. Essas tecnologias não foram originalmente desenvolvidas para atender aplicações de medição, controle e comunicação da IoT. Contudo, são utilizadas para esse fim [25]. Outras tecnologias como o Sigfox, WiFi HaLow e LoRaWAN foram projetadas para atender aos requisitos do novo cenário de redes IoT, apesar de outras limitações e especificidades.

A padronização dessas tecnologias de comunicação está sob responsabilidade de diversas alianças industriais e organizações de desenvolvimento de padrões como ZigBee Alliance, LoRa Alliance, WEIGHTLESS-SIG, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 3GPP (Third Generation Partnership Project) e IETF (Internet Engineering Task Force). Esses órgãos têm se empenhado para desenvolver soluções de baixa potência e unificar interfaces, protocolos e serviços para que vários sistemas possam ser interligados na IoT. O uso de bandas de rádio sub-1 GHz não licenciadas (ISM - Industrial Sientific and Medical) e de técnicas de modulação de faixa estreita com espalhamento espectral diferem entre países e regiões devido a regulamentações locais, leis ou outras restrições operacionais. Entretanto, faixas comuns incluem as bandas sub-1 GHz de 902<sup>°</sup>928 MHz (EUA/Brasil), 868<sup>°</sup>870 MHz (UE), 433, 05<sup>°</sup>434, 79 MHz (EUA/UE) e 314<sup>°</sup>316 MHz (Japão) [43].

Dependendo das distâncias entre os nós e as taxas de transmissão, as tecnologias de acesso podem ser classificadas em quatro categorias, quais sejam: rede de área local sem fio (*Wireless Local Area Network* - WLAN), rede de área pessoal sem fio (*Wireless Personal Area Network* - WPAN), rede de área de longa distância sem fio (*Wireless Wide Area Network* - WWAN) e rede de área metropolitana sem fio (*Wireless Metropolitan Area Network* - WMAN) [41]. A Figura 9 mostra uma representação abstrata da relação entre as taxas de transmissão e o alcance de algumas tecnologias de comunicação. Com base nisso, as

tecnologias são comparadas em termos de parâmetros como taxa de transmissão e alcance do sinal, como apresentado. A Tabela 2 complementa o resumo dessas características com a quantidade de dispositivos por ponto de acesso, topologia e faixa de frequência.



Figura 9 – Taxa de transmissão versus alcance das tecnologias [25].

Tecnologia	Número de dispositivos	Topologia	Tipo
Bluetooth (IEEE 802.15.1)	limitado pela aplicação	Malha, Estrela	WPAN
ZigBee (IEEE 802.15.4)	até 65.000	Malha, Estrela	WPAN
Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah)	até 8.000	Estrela	WLAN
LoRaWAN	até 100.000	Estrela	WWAN
Sigfox	até 1.000.000	Estrela	WWAN
NB-IoT	até 50.000	Estrela	WWAN
DASH7	N/A (com. sem conexão)	Malha, Estrela	WWAN
Weightless	Não especificado	Estrela	WWAN

Tabela 2 – Características de desempenho das tecnologias

Os Serviços Gerais de Pacote por Rádio (GPRS) são serviços de pacote de rádio construídos sobre uma rede do Sistema Global de Comunicações Móveis (GSM) [44]. Por isso, usam a modulação estreita da faixa (GMSK) e são multiplexados por divisão de frequência (FDM). Esse protocolo é baseado em um topologia estrela em que cada dispositivo se comunica com uma estação base que retransmite as informações de e para um servidor central baseado no protocolo da *internet* (IP). GPRS fornece uma densidade espectral bastante ineficiente, que pode ser usada de forma dinâmica e opera em bandas licenciadas (além de possibilitar uma conexão de 40 kbps).

O Sigfox é uma tecnologia proprietária que opera nas faixas de frequência não licenciadas de 862 a 928 MHz, podendo variar entre países, e usa modulação *Ultra-Narrow Band* (UNB) com *Differential Binary Phase-Shift Keying* (DBPSK) a 100 bps [45]. As operações globais da empresa SigFox são divididas em seis regiões geográficas, as chamadas de RC (*Radio Configuration*), RC1 a RC6 [46]. Cada RC define a frequência central e taxa de dados de *uplink* e *downlink*, potência máxima de transmissão, além de outras especifidades que variam de acordo com o órgão regulamentador e de país para país. Por exemplo, Brasil, Canada, México, Porto Rico e Estados Unidos utilizam RC2. A transmissão nessa tecnologia se dá em pacotes de três *uplinks* em sequência com o espectro centrado em três frequências de portadoras aleatórias, diminuindo a possibilidade de perda de pacotes na transmissão através da redundância.

O Sigfox utiliza frequências de rádio ISM, que devem cumprir restrições legais limitando o compartilhamento de canal com o *duty cycle* de 1%; ou seja, dependendo da região, existe limitação na quantidade de mensagens que podem ser enviadas por dia, quantidade de saltos de frequência e o tamanho em *bytes*. A título de exemplo, na região RC1, o número máximo de transmissões realizadas é limitado a 144 mensagens de 8 a 12 *bytes* por dia (6 mensagens por hora com o *duty cycle* de 1%) [47]. Os dispositivos SigFox possuem alta sensibilidade nos receptores permitindo um alcance considerável e seguro, apesar das taxas de transmissão muito baixas.

O Narrowband-IoT (NB-IoT) é também é conhecido como *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), uma vez que possui consumo baixo de energia e permite conexões de dados em redes de longa distância. Foi desenvolvido pela organização 3GPP como uma tecnologia de comunicações sem fio para IoT compatível com as tradicionais redes celulares. Essa tecnologia ocupa apenas 180 kHz de largura de banda [48]. Além disso, o NB-IoT pode ser implantado a baixo custo, pois é diretamente aplicável ao GSM e ao Sistema Universal de Telecomunicações Móveis (UMTS).

A cobertura do NB-IoT é ampla, possibilitando a aplicação da tecnologia em áreas rurais, fábricas, garagens subterrâneas, tampas de bueiros e similares. Essa tecnologia minimiza o consumo de energia, desenvolvendo aplicativos de pequeno volume e taxa de dados. O baixo custo do NB-IoT se reflete principalmente na reutilização da estação base. Diferentemente das outras tecnologias IoT, o NB-IoT não precisa restabelecer a rede de comunicação, além de multiplexar as estações base e as antenas.

O padrão NB-IoT suporta 3 cenários de implantação diferentes: *In-band operation*, *Standalone* e *Guard-band operation*. Na operação *In-band* o NB-IoT compartilha a estação base, o *hardware* e a potência de transmissão, utilizando uma banda reservada no mesmo canal do LTE. No modo *Standalone*, o NB-IoT trabalha de forma independente utilizando toda a potência de transmissão da estação base, aumentando a cobertura. Já no modo de operação *Guard-band*, o NB-IoT compartilha o canal com o LTE, mas é transmitido entre duas bandas, compartilhando o mesmo amplificador de potência e o poder de transmissão do canal LTE. Em aplicações rurais, algumas dificuldades podem acometer a implantação do NB-IoT, limitando o uso de estações base 4G/LTE (pois muitas dessas áreas, e suburbanas, não possuem essa cobertura).

Além dessas tecnologias apresentadas, duas se destacam pela popularidade no cenário IoT: ZigBee e LoRa. A tecnologia ZigBee possui densa abordagem na literatura. Empresas conhecidas do grande público, como a Amazon, já estão adotando essa tecnologia em produtos de automação residencial. Ela apresenta a vantagem de ter certa flexibilidade na topologia de rede, sendo normalmente utilizada na arquitetura de rede *mesh*. O LoRa, mais recente do que o ZigBee, vem se popularizando pelo baixo custo, robustez de comunicação, longas distâncias de comunicação e baixo consumo de bateria. Ambas as tecnologias são exploradas neste trabalho e serão aprofundadas nas seções que seguem.

#### 3.1 LoRa

LoRa (do inglês, *Long Range*) é uma tecnologia de comunicação sem fio para conectividade de dispositivos IoT em aplicações com sistemas embarcados que necessitam de baixo uso de energia e transfiram uma quantidade pequena de dados a longas distâncias. LoRa permite comunicação bidirecional segura, de baixo custo para aplicações de IoT e IoT Industrial (IIoT), cidades inteligentes, máquina para máquina (M2M) e aplicações industriais [42]. A LoRa se enquadra na categoria LPWA (*Low Power Wide Area*), um termo genérico para um grupo de tecnologia para comunicação de área ampla (WWAN) com baixo consumo de energia (*low power*). A tecnologia LoRa tem ganhado rápida adesão e é a preferida para sistemas embarcados de IoT por causa de seu longo alcance, alta capacidade de nós na rede, bateria de longa duração, bidirecional, rede segura e eficiente e imunidade a interferências e *jamming*. Um único *gateway* pode cobrir uma área de cem quilômetros quadrados. O alcance da tecnologia LoRa é devido ao seu *link budget*, que é o cálculo final de potência em todo o percurso entre o transmissor e o receptor, e à modulação de espectro de espalhamento (CSS - *chirp spread spectrum*) empregada, que será explorada na seção seguinte. [49].

#### 3.1.1 Modulação LoRa

LoRa é uma camada física que fornece um *link* de comunicação de longo alcance. Essa tecnologia foi desenvolvida pela *SemTech Corporation* e promovida pela *LoRa Aliance*. A camada física desse dispositivo foi padronizada e estendida com a adição de uma camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC) LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*). Isso define a arquitetura da rede e o protocolo de comunicação. A especificação LoRaWAN é padronizada e de código aberto pela aliança LoRa. A rede LoRaWAN é de longo alcance baseada em *Chirp Spread Spectrum* (CSS), técnica de espalhamento espectral na qual os *chirps* são usados para a transmissão dos dados. A camada física da LoRa possui cinco características inerentes à modulação: a frequência da portadora, a potência de transmissão, o fator de espalhamento (SF), a largura de banda (BW) e a taxa de código (CR).

As frequências principais de portadora para a tecnologia Lora são faixas de frequências ISM não licenciadas 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz, em que a LoRa opera. [50]. As taxas de transmissão de *downlink* DL e *uplink* UL variam entre 27 kb/s e 100 kb/s, dependendo das regulamentações de cada país [51]. O *link budget* do LoRa é alto, o que é responsável por sua alta sensibilidade e menor a potência de transmissão. A potência do sinal pode ser configurada entre -4 dBm e 20 dBm [52].

A CSS é uma técnica de espalhamento que possui como vantagens baixa requisição de consumo de potência e imunidade a multipercursos e desvanecimento do sinal fading. Por isso, esse sistema possui uma frequência inicial em que é convertido o número de bits. É possível observar no gráfico da frequência em função do tempo mostrado na Figura 10 que os chirps são as rampas amarelas que variam entre  $f_{min}$  e  $f_{max}$  (em um up-chirp) ou entre  $f_{max}$  para  $f_{min}$  (conhecido como down-chirp). Os chirps deslocados são responsáveis pelo transporte da informação.



Figura 10 – Sinal típico LoRa. Neste exemplo,  $f_{max} = 600$  kHz para  $f_{min} = 400$  kHz.

O número de *bits* coincide com o fator de espalhamento, que varia entre 7 a 12. Os *chirps* são de amplitude constante e realizam a varredura de toda a extensão de frequência possível (BW). Essa variação ocorre de forma linear em um tempo do símbolo de *chirp* de duração  $T_g = 2^{SF}/BW$  [53].

A taxa de *bits* de modulação LoRa é expressa por :

$$R_b = SF \times \frac{1}{\frac{2^{SF}}{BW}} \left[ bit/seg \right] \tag{1}$$

Uma extensa largura de banda do sinal fornece dados livres de erros que são transmitidos por longa distância. No entanto, a quantidade de dados transportados é maior e, por conseguinte, a energia também consumida é maior. Um pacote de *uplink* é composto por um preâmbulo, com o objetivo de identificar o início de um pacote, um cabeçalho, um campo de verificação cíclica da informação transportada (do inglês, *Cyclic Redundancy Check* - CRC), responsável pela verificação da integridade da mensagem, e um campo de informação útil (chamada de *payload*). A taxa de codificação (CR - *Code Rate*) é a taxa Código de Correção de Erro (FEC - *Forward Error Correction*) usada pelo dispositivo LoRa e oferece proteção contra erros dos sinais de informação. Os valores de CR são 4/5, 4/6, 4/7 ou 4/8. Altos valores de CR oferecem mais proteção, mas aumentam o tempo no ar. O demodulador pode funcionar até uma certa relação sinal-ruído (SNR) e, abaixo desse nível, o sinal não pode mais ser demodulado (sendo passível de ocorrência de bloqueio de sinal).

#### 3.1.2 LoraWAN

Em redes LoRaWAN, os pontos de acesso operam como *gateways*, ou pontes, na retransmissão de mensagens entre os dispositivos finais (*end nodes*) e um servidor de rede central no *backend*. Esses pacotes dos *end nodes* são encaminhados para os servidores de rede baseados em nuvem por meio de *backhaul*, quais sejam Ethernet, Wi-Fi, entre outros. Os dispositivos sensores finais transmitem através da comunicação sem fio, com um único salto, para um ou diversos pontos de acesso (*gateways* LoRa) [36].

A LoRaWAN é baseada na topologia em estrela, o que diminui a complexidade da rede. Ela diminui o consumo de energia, aumentando a vida útil da bateria, quando comparada com a rede *mesh* convencional. Na topologia em estrela, os *switches* (ou *gateways*) estão conectados ao *backhaul*, caracterizando a infraestrutura hierárquica [54]. A Figura 11 ilustra a arquitetura descrita.

O padrão LoRaWAN requer investimentos reduzidos, comparado com outras tecnologias, devido à capacidade de cobertura de uma mesma área com uma menor quantidade de nós, além da longevidade dos equipamentos da rede.



Figura 11 – Arquitetura da Rede LoRaWAN [36].

#### 3.1.3 Regulamentação Lora no Brasil

No Brasil, de acordo com as regulamentações determinadas por órgãos de padronização de comunicações, só é permitido que dispositivos transmitam nas bandas de frequências utilizadas pelo LoRaWAN e que enviem mensagens em 1% do tempo no período de uma hora (equivalente a 36 segundos por hora). Além do mais, cada transmissão deve aguardar no mínimo 1,8 s para uma nova transmissão com o objetivo de evitar congestionamento da rede [55].

## 3.2 ZigBee

ZigBee é um dos protocolos desenvolvidos pela ZigBee Alliance para ser aplicado em redes de sensores sem fio e otimizar seus recursos. Os dispositivos baseados nesse protocolo são de baixo custo, baixa *thoughtput* (taxa de dados), alcance de transmissão relativamente curto, escalabilidade, confiabilidade, baixa potência e design de protocolo flexível, e baseado no padrão IEEE 802.15.4 [56]. O seu alcance é de torno de 100 metros e largura de banda de 250 kbps e as topologias que funcionam são estrela, *cluster tree* e *mesh*. O ZigBee é classificado como um padrão sem fio de curto alcance e é capaz de utilizar a topologia em malha, que permite estender a cobertura e propicia implantações densas de dispositivos conectados em redes descentralizadas de múltiplos saltos [25]. Essa tecnologia é utilizada em automação residencial, agricultura digital, controles industriais, monitoramento médico e sistemas de energia [57].

#### 3.2.1 Modulação ZigBee

A camada física do ZigBee segue o padrão IEEE 802.15.4 e estabelece 3 bandas (com 27 canais especificados) para a comunicação em ZigBee: 2.4 GHz - 16 canais (ISM/Worldwide), 250 kbps-868.3 MHz - 1 canal (ISM/Europe), 20 kbps-902-928 MHz -10 canais (ISM/Americas), 40 kbps. O espaçamento entre os canais é de 5 MHz.

A codificação dessa modulação é a Sequência Direta de Espalhamento do Espectro (em inglês, *Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS), que reduz o consumo de energia devido à baixa potência utilizada na transmissão de dados — além de aumentar a resistência ao *jamming* e reduzir o efeito do multipercurso [58]. Um símbolo em DSSS é composto por 4 *bits* de cada octeto agrupado, que forma na camada física o *PHY Protocol Data Unit* (PPDU). Essa sequência de 32 *bits* também é conhecida como sequência de *chip* ou sequência de ruído pseudo-aleatório [58].

Com o DSSS, os dados são divididos e transmitidos simultaneamente em tantas frequências quanto possíveis dentro de uma banda de frequência. Essa técnica adiciona *bits* redundantes de dados conhecidos como *chips* aos dados para representar 0s ou 1s binários [59]. Tal proporção de *chips* para dados é conhecida como taxa de espalhamento: quanto maior a proporção, mais imune à interferência o sinal é — porque se parte da transmissão for corrompida, os dados ainda podem ser recuperados da parte restante do código de *chip*. O DSSS também protege contra perda de dados por meio das transmissões redundante e simultânea de dados [60].

#### 3.2.2 Configuração dos dispositivos

De acordo com 61, os dispositivos numa rede ZigBee podem ser configurados como coordenador, roteador e dispositivo final (*end node*). O dispositivo coordenador inicia a rede e seleciona o canal e PAN ID (Identificação da Rede de Área Pessoal, em inglês, *personal area networks identification*). Ele também armazena pacotes de pacotes de dados sem hibernar e gerencia outras funções de manutenção da rede, e deve estar ligado todo o tempo.

O roteador é um nó Zigbee considerado completo com capacidade de aderir a redes existentes e de transmitir, receber dados e informações de rota. Além disso, ele pode armazenar pacotes em *buffers* de dados e permitir acesso de outros roteadores e dispositivos finais, conectando-os à rede. Como mencionado, os roteadores devem estar ligados todo o tempo, podendo ter inúmeros dispositivos roteadores numa mesma rede.

Assim, o *end node* é uma versão reduzida de um elemento roteador. Ele é capaz de ingressar em redes existentes e, portanto, de enviar e receber informações. Entretanto, não pode ser intermediário entre dispositivo (mensageiro); não possui permissão para liberar que outros dispositivos adentrem a rede; e o *hardware* é mais barato e pode desligar-se da rede

de forma intermitente (hibernar), a fim de economizar energia ao entrar temporariamente em um modo de hibernação sem resposta.

As configurações dos dispositivos acima descritas podem ser encontradas em uma rede como mostra a Figura 12, em que E representa o *end node*; R, o roteador; e C, o coordenador.



Figura 12 – Configurações para o Zigbee [61].

#### 3.2.3 Regulamentação ZigBee no Brasil

De acordo com 62, os dispositivos de radiofrequência XBee ZigBee e XBee-Pro ZB estão em conformidade com os padrões estabelecidos pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Os modelos permitidos são: Digi Model: XB24CZ7PIS-004, XB24CZ7PISB003, XB24CZ7RIS-004, XB24CZ7RISB003, XB24CZ7UIS-004 e XB24CZ7UISB003 e Digi Model: XBP24CZ7PIS-004, XBP24CZ7RIS-004, XBP24CZ7UIS-004.

# 4 Técnicas de IA aplicados à rede de sensores

A seguir, são apresentados os algoritmos de otimização aplicados às redes de sensores neste trabalho. Os algoritmos foram utilizados no planejamento da rede e na alocação de recursos. Para o planejamento da rede de duas camadas híbrida *mesh*-entrela, foi utilizado um algoritmo genético binário, com K-medoids na função objetivo, que realiza o agrupamento e definição de quais sensores pertencem à rede *mesh*, quais pertencem à rede estrela e quais seriam os CHs que ligariam as duas topologias e tecnologias de comunicação. Para as redes *mesh* (ZigBee) e estrela (LoRa) formadas, foram utilizados Algoritmo de Dijkstra e Algoritmo Genético de codificação real, respectivamente, para alocar os recursos de forma a minimizar o consumo de energia da rede e garantir, matematicamente, a comunicação.

### 4.1 K-Medoids

O processo de agregar um conjunto de objetos físicos ou abstratos em classes de objetos semelhantes é chamado de agrupamento, um exemplo de aprendizagem nãosupervisionada. Um medoide de um conjunto de dados finito é um ponto desse conjunto, cuja dissimilaridade média para todos os pontos de dados é mínima; ou seja, é o ponto mais central no conjunto. O K-medoid, também conhecido como particionamento em torno dos medoides (PAM - *Partitioning Around Medoids*), é uma técnica de particionamento de *cluster* que agrupa o conjunto de dados de objetos n em número K de *clusters* conhecido a priori [63].

O K-Medoids é uma variação de outro algoritmo de agrupamento, K-Means; porém, ele é menos influenciado por valores extremos [63] [64]. Ainda contrastando com o algoritmo K-means, o K-medoides escolhe os pontos de dados como centros (chamados medoides) e pode ser usado com distâncias arbitrárias, minimizando a soma das dissimilaridades de pares. No K-means, o centro de um *cluster* não é necessariamente um dos pontos de dados de entrada (definido como a média entre os pontos do *cluster*) através da soma das distâncias euclidianas quadradas.

O método de particionamento é executado com base no princípio de minimizar a soma das diferenças entre cada objeto e seu ponto de referência, designado como o centro desse *cluster* correspondente; ou seja, um critério de erro absoluto deve ser utilizado e pode ser definido como:

$$E = \sum_{j=1}^{k} \sum_{p \in C_j} |p - o_j|,$$
(2)

Onde E é a soma do erro absoluto para todos os objetos no conjunto de dados; p é o ponto no espaço que representa um determinado objeto no cluster  $C_j$ ; e  $o_j$  é o objeto representativo de  $C_j$ . Em geral, o algoritmo itera até que, eventualmente, cada objeto representativo seja realmente Medoid — ou o objeto localizado mais centralmente, em seu *cluster*. Uma desvantagem do K-medoids é que sua aplicação é ineficiente para grande número de nós [65].

A Figura 13 mostra o fluxograma para o algoritmo de determinação de K-medoids. Inicialmente, é definido como entrada do algoritmo quantos K clusters são desejados na solução. Logo após, uma solução inicial é definida arbitrariamente. Após a seleção inicial, inicia-se um processo iterativo e, caso o cálculo de E apresente um erro menor para a nova solução, então é classificada como melhor. Essa qualidade é estimada por meio de uma função de custo que mede a dissimilaridade média entre um objeto e o objeto representativo de seu cluster.

### 4.2 Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético (AG) é um método de pesquisa baseado nos princípios da seleção natural e genética proposta pelo naturista e biólogo natural, Charles Darwin. O conceito foi formalizado pela primeira vez em 1957 por Holland [66]. O AG faz parte dos algoritmos utilizados em problemas combinacionais, e as soluções dos problemas possuem estruturas de cromossomos, que podem ser representados de forma binária, inteira ou real [67], definindo o alfabeto do AG. A forma de codificação do AG utilizada como solução depende do problema abordado.

Após modelar o problema nos cromossomos e escolher os parâmetros de adequação que diferencia as soluções entre boas e más, o AG é adequado para encontrar a melhor solução [68, 69]. A inicialização da população candidata à solução pode ser realizada de forma aleatória. As operações básicas de um Algoritmo Genético são a seleção, o cruzamento e a mutação.

O cruzamento é a combinação de partes de duas ou mais das principais soluções para obter soluções novas e mais adaptadas, mantendo informações relevantes à solução do problema abordado. Existem várias maneiras de se realizar esse processo e o desempenho eficiente depende do mecanismo de recombinação, que deve ser projetado adequadamente. No momento em que dois ou mais cromossomos parentais são operados para recombinação e geração dos filhos (cruzamento), há chances de mutações; ou seja, alterações na cadeia do



Figura 13 – Fluxograma para a determinação de K-medoids.

código binário (DNA) invertendo um bit aleatoriamente, no caso do AG com codificação Binária. [70].

Durante o processo evolutivo, uma função objetivo (FO) é usada para discriminar os melhores indivíduos de cada geração, quantificando a adequação das soluções candidatas. Posteriormente, são selecionados indivíduos com alto nível de aptidão e imposta aos candidatos a ideia de sobrevivência do mais apto, rejeitando-se os menos adaptados [68]. Entre os procedimentos que podem ser utilizados na seleção, destacam-se a roleta, o *turner* e o *ranking*. De forma geral, eventos que não são adequados à solução são penalizados. Os procedimentos para confecção do AG acima descritos podem ser concatenados no fluxograma da Figura 14:



Figura 14 – Fluxograma do Algoritmo Genético.

Aplicações de Algoritmos Genéticos em planejamentos de redes de sensores sem fio (WSN) podem ser vastamente encontrados na literatura. Em [71], o planejamento das redes inteligentes de redes elétricas dotadas de sistemas de comunicação é realizado através de AG com solução inteira. Esse processo tende a ser mais complexo com o aumento de medidores inteligentes na rede. Este trabalho objetivou minimizar os custos de implementação para as características do projeto de redes heterogêneas (óptica e radiofrequência) proposto. Em [72], o AG é usado para otimizar a vida útil dos sensores da WSN em dois passos: na primeira etapa, o algoritmo determina os *clusters* da rede e, num segundo momento, os *cluster-heads* são dinâmicamente determinados.

#### 4.3 Algoritmo de Dijkstra

O Algoritmo de Dijkstra foi publicado em 1959 pelo cientista da computação holandês, Edsger Dijkstra [73]. Esse algoritmo de busca encontra o caminho mais curto (caminho de custo mínimo) para um grafo dirigido ou não, e de pesos não negativos. Ele é desenvolvido em uma árvore de caminhos mínimos. A complexidade do algoritmo é  $O(m + n \times log_{10}n)$ , onde m é o número de arestas e n, de vértices. Uma desvantagem do algoritmo de Dijkstra é sua limitação para grafos com grande quantidade de vértices, aumentado o uso dos recursos computacionais para se atingir o resultado [74].

A Figura 15 mostra o Fluxograma do Algoritmo de Djikstra, conforme descrito por [75]. Inicialmente, os vértices V do grafo são numerados, o que resulta em uma matriz de vínculos e pesos que pode ser usada como base para se desenvolver a lógica do programa. Nesse esquema, busca-se partir do vértice inicial  $(u_0)$  até que se atinja o vértice de destino  $(u_f)$ . Na sequência, criam-se dois conjuntos de vértices, o M dos vértices marcados, e o D dos vértices desmarcados. De forma geral, a marcação pode ser feita por meio de um vetor com dados do tipo booleano. Assim, aqueles marcados poderiam ter valor verdadeiro e aqueles desmarcados, falso. Na sequência, são criados os vetores para definir os comprimentos acumulados (L) e o vértice anterior (A). Eles guardam as informações relativas ao nó em estudo. Os vértices desmarcados recebem a distância acumulada  $\infty$  e não possuem vértice anterior (simbolizado por ter o valor A(v) nulo).

Com as etapas anteriores, as estruturas de dados para o desenvolvimento do algoritmo estão prontas, sendo possível o início da rotina de verificação vértice a vértice ao se partir do vértice inicial  $(u_0)$  até atingir o vértice de destino  $(u_f)$ , através de execução de interações. A interação é baseada nos seguinte passos: a) verificar as conexões do vértice da vez  $(u_i)$  que não foram usadas (desmarcadas); b) calcular as distâncias acumuladas das conexões disponíveis; c) identificar entre as conexões disponíveis qual delas apresenta a menor distância acumulada e marcá-la; d) repetir a rotina até o vértice da vez ser o vértice de destino  $(u_i = u_f)$ . Após a definição das distâncias mínimas, faz-se necessária uma rotina para varrer os vértices anteriores partindo-se do vértice destino  $(u_f)$ , a sequência em ordem inversa dos caminhos mínimos. O algoritmo ainda contempla a verificação do caso de não existir a conexão entre os vértices inicial  $(u_0)$  e final  $(u_f)$  [75].



Figura 15 – Fluxograma do algoritmo de Djikstra [75].

# 5 Metodologia de planejamento de uma rede híbrida ZigBee e LoRa

Na topologia híbrida proposta estrela-*mesh*, com as tecnologias de comunicação escolhidas, uma rede estrela LoRaWAN é formada com nós em posições onde se sabe que é possível estabelecer comunicação, chamados de *cluster head* (CH). Ele ainda faz a interface entre as duas tecnologias e topologias, como pode ser visto na Figura 2. O dispositivo pode operar com as duas tecnologias de comunicação, sendo um nó para a rede estrela LoRa e um coordenador para a rede *mesh* ZigBee. Na subseção a seguir, serão apresentados mais detalhes do *hardware* do CH.

A principal desvantagem da arquitetura proposta é a dependência do CH para que os dados dos sensores (*end nodes*) cheguem à *internet*. Uma vez que o CH falhe, todo o *cluster* da rede *mesh* perde sua comunicação. Outra desvantagem que se pode apontar é o gargalo de comunicação ao utilizar uma rede com maior capacidade de trafegar dados (ZigBee) centralizando as informações em um dispositivo que possui menor taxa de transferência (LoRa). Entretanto, o objetivo não é a criação de uma rede em tempo real; assim, o último ponto não é encarado como um problema. Uma das premissas do planejamento da rede utilizando essa topologia híbrida é que haja intervalo entre as aquisições e envios das leituras dos sensores suficientes para que o CH não se torne o gargalo da comunicação.

Pretende-se, pois, resolver o seguinte problema: diversos sensores distribuídos em uma região devem ser conectados à *internet*, formando uma rede IoT. Entre os diversos sensores, sabe-se, *a priori*, que alguns possuem posicionamento estratégico para a rede, por estarem em regiões mais altas ou que há visada direta, possibilitando estabelecer comunicação com um *gateway* LoRa. Esses pontos são possíveis CHs que farão a interface da rede estrela com a *mesh*. O cenário descrito pode ser visto na Figura 16 (a), onde o ponto de acesso à *internet* é o *gateway* LoRa. Diante disso, pretende-se, através de algoritmos e metaheurísticas, fazer o planejamento da configuração de toda a rede, definindo para a rede LoRa quais serão os CHs e para a rede *mesh* quais serão os roteadores, o coordenador e o *end devices*. Além disso, cada dispositivo deverá ser parametrizado de forma a garantir a maior eficiência energética da rede e, assim, estender sua vida útil. Na LoRa, esses parâmetros serão o fator de espalhamento, a largura de banda e a potência de transmissão; já na rede ZigBee, será a potência de transmissão. Desse modo, há uma rede - como mostrado na Figura 16 (b).

Posto isso, nas próximas subseções, serão apresentados o *hardware* desenvolvido e proposto para a função de CH, o planejamento dos agrupamentos e seleção dos CHs



Figura 16 – Desafio: rede antes e depois da configuração com os algoritmos propostos.

utilizando AG com K-Medoids, o planejamento para alocação de recursos na rede *mesh* utilizando Dijkstra e o planejamento da rede LoRa utilizando o AG.

### 5.1 Hardware para interface ZigBee e LoRa - Cluster Head

Para fazer a interface entre as duas tecnologias de comunicação, conforme Figura 17, foi desenvolvido um *hardware* em parceria com a empresa 2Solve. O dispositivo se tornou uma solução comercial chamado de 2Sense [76]. O 2Sense está preparado para a conexão de diversos tipos de sensores e possui barramento multi-mestre I<sup>2</sup>C e 1-*Wire*, uma entrada digital, uma saída digital, cinco entradas analógicas (4 - 20 mA ou 0 - 10 V) e uma entrada para sensor de temperatura (termopar, PT100 ou PT1000). Além disso, a alimentação desse *hardware* é flexível e, dependendo dos componentes soldados na placa, ele pode ser alimentado com bateria de 12 Vdc, 24 Vdc ou com baterias de lítio de 3,7 Vdc recarregáveis. O dispositivo construído também é preparado para conexão de um painel solar, que pode recarregar a bateria.



Figura 17 – Cluster Head: interface entre tecnologias LoRa e ZigBee.

O 2Sense possui dois *slots* de comunicação no mesmo formato da solução Digi XBee, conforme a Figura 18. Eles foram desenvolvidos nas mesmas dimensões e configurações de pinos, módulos de comunicação LoRa, SigFox,Bluetooth, Ethernet, GPRS, WiFi e GPS. Isso torna o *hardware* capaz de combinar qualquer uma dessas tecnologias. Para a topologia proposta neste trabalho, o objetivo é utilizar LoRa no *slot* 1 e XBee (ZigBee) no *slot* 2.



Figura 18 – Formato do XBee adotado para módulos de comunicação [77].

A placa eletrônica (ver a Figura 19) mostra o *hardware* que foi desenvolvido com o propósito de funcionar como CH da solução híbrida. Os módulos de comunicação ZigBee e LoRaWAN já estão conectados nos *slots* na Figura 19. A solução utiliza um microcontrolador ATSAMD21G18 e também possui interface de comunicação para os padrões RS232 e RS485, comumente utilizados na indústria, podendo se comunicar através do Modbus RTU.

Como a taxa de transmissão do XBee é maior do que a da LoRa, os dados podem ser armazenados no cartão SD, que também foi adicionado na placa eletrônica, e transmitidos posteriormente, através de *buffers* e gerenciamento de pacotes. Embora o *hardware* preveja esse afunilamento de dados, gerado pelos sensores entre as redes ZigBee e LoRa, uma premissa do projeto de planejamento da rede híbrida é a alta latência. Por isso, a topologia proposta nunca deverá ser utilizada em aplicações de tempo real de monitoramento. No planejamento da rede, deverão ser considerados o tamanho dos dados dos sensores, a quantidade de sensores conectados a cada *cluster head* e a frequência de aquisição dos dados.



Figura 19 – 2Sense: Hardware do CH.

# 5.2 Planejamento da rede híbrida com Algoritmo Genético e K-Medoids

Na primeira etapa da resolução do problema, dados os sensores que formam a rede IoT, conforme a Figura 20(a), foi desenvolvido um algoritmo para formar os agrupamentos, que *a posteriori* compuseram as redes *mesh*, e selecionar o CH de cada rede entre os pontos elegíveis. Para tanto, foi utilizado um algoritmo híbrido combinando o AG Binário com o K-Medoids. O resultado, após execução do algoritmo, pode ser visto na Figura 20(b).

As redes *mesh* foram definidas através do algoritmo K-Medoids, enquanto os CH foram definidos através do AG. Os dois algoritmos foram mesclados de forma que o K-Medoids fizesse parte da função objetivo do Algoritmo Genético. Como os centroides iniciais do K-medoids foram escolhidos aleatoriamente, o algoritmo pôde dar respostas diferentes cada vez que fosse executado e, por isso, cada indivíduo da população teve seus *clusters* definidos através do K-medoids; Ademais, o K foi diferente para cada indivíduo da população e teve relação com a quantidade de CH de cada solução [78].

Cada indivíduo da população foi definido através de um vetor de *bits* e cada posição do vetor representou um CH elegível. Quando, no vetor, a posição foi preenchida por "1", representou a seleção do ponto como um CH; quando "0", tornou-se um *end-node* para a rede.

 $[1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ \dots\ 0]$ 

Para a seleção, ou determinação dos CHs entre os pontos possíveis, foi utilizado o AG em que a minimização da FO foi a solução (Equação 3). Os *clusters* foram criados



Figura 20 – Rede antes e depois do planejamento da rede híbrida com AG e K-Medoids

através do método K-medoids, que seriam redes mesh, e deveriam garantir que em cada cluster houvesse um CH.

O problema de minimização da função objetivo no AG é modelado por:

$$FO = \sum_{i=1}^{N_{ch}} X_i + P,$$
(3)

onde o primeiro elemento, Xi, é a quantidade de CH na solução. Como cada *cluster* deve possuir um CH, as soluções que não o possuem são penalizadas em P. Essa penalidade é definida de acordo com a Equação 4, onde para cada *cluster* sem CH, uma penalidade de  $Y_1$  é adicionada e, no final, um peso de penalidade  $Y_2$ , reforçando que na solução desejada não deve haver *clusters* sem CH. A penalidade  $Y_3$  é a quantidade de sensores que ficou no maior *cluster* da solução. Já a penalidade  $Y_4$  é maior distância entre os sensores e o CH da solução que está sendo avaliada.  $Y_3$  e  $Y_4$  garantem equilíbrio no tamanho dos *cluster* e distância dos sensores ao CH.

$$P = Y_1 * \#Clusters_{semCH} + Y_2 + Y_3 + Y_4.$$
(4)

Em suma, cada indivíduo da população teve uma quantidade n de CH escolhida aleatoriamente, por cruzamento e mutação. O algoritmo de agrupamento K-medoids foi usado para formar n clusters com todos os sensores que se desejavam ligar à rede. Após isso, avaliou-se se em cada cluster havia um CH alocado e, em caso afirmativo, uma penalidade fixa foi dada. Para cada cluster sem CH, uma penalidade menor foi aplicada. Por último, quando essas condições foram satisfeitas, buscou-se pela solução com o menor número de CH.

#### 5.3 Alocação de recursos para rede *mesh*

Após a execução da primeira etapa, conforme seção 5.2, obteve-se a rede de acordo com a Figura 20 (b), com uma rede *mesh* em cada *cluster* e o CH selecionado. Na sequência, através do algoritmo desenvolvido para essa etapa, foram parametrizados, para cada rede *mesh*, o ID da rede e, para cada dispositivo, a potência de transmissão (PL) e o tipo de dispositivo, conforme a Figura 21.



Figura 21 – Rede ZigBee após alocação de recursos definindo tipos de dispositivo.

Para a rede ZigBee na proposta híbrida, foram utilizados os módulos XBee da Digi International. Eles podem ser configurados e reconfigurados através de comandos AT (instruções usadas para controlar um *modem* utilizando a porta serial). Os dispositivos só podem se comunicar com outros que tenham o mesmo identificador de rede e canal configurado. Ao receber um pacote, o dispositivo verifica a identificação da rede após o ID do preâmbulo. A faixa de possíveis IDs de rede está entre 0 - 0x7FFF [77]. Diante disso, para cada sensor, haverá uma configuração de ID que representa em qual *cluster* está localizada e com quais dispositivos pode se comunicar.

Além do ID da rede, outro parâmetro que pode ser configurado através de comandos AT é o PL (*Power Level* - Nível de Potência), que define o nível de potência em que o dispositivo transmite. Os níveis de potência, de acordo com o fabricante [77], são apresentados na Tabela 3.

A parametrização do PL é importante para configurar uma rede IoT utilizando XBee que seja eficiente no consumo de energia, uma vez que afeta diretamente a corrente drenada pelo dispositivo. Quanto maior o PL, maior a corrente consumida na transmissão de dados, de acordo com a Tabela 4. Outra característica para uma rede ZigBee com consumo eficiente de energia é a parametrização dos dispositivos. Apesar de configurar os

PL	Nível de potência
0	+7  dBm (5  mW)
1	+15  dBm (32  mW)
2	+18  dBm (63  mW)
3	+21  dBm (125  mW)
4	+24  dBm (250  mW)

Tabela 3 – Nível de potência do XBee

sensores como R (roteadores) seja vantajoso, para que haja mais pontos de regeneração da rede, é importante ressaltar que dispositivos configurados dessa forma não podem hibernar. Como também pode ser visto na Tabela 4, a corrente consumida por um roteador inativo é de 29 mA, e quando um dispositivo está hibernado é de 2,5  $\mu$ A. Essa capacidade de hibernar está presente apenas em dispositivos configurados como E (end device). Trata-se, pois, de um trade-off. Quanto mais roteadores, mais caminhos alternativos existem para os dados dos sensores chegarem ao coordenador. Porém, como desvantagem, a rede terá menos pontos capazes de hibernar e, consequentemente, consumirá mais energia.

Especificação	Valor
Tensão de Alimentação	2,1 até $3,6$ Vdc
	PL = 4: 215  mA typical, (290  mA max)
Corrente Transmissão	PL = 3:160  mA typical
	PL = 2: 120  mA typical
	PL = 1:95  mA typical
	PL = 0:60  mA typical
Corrente Inativo/Recepção	29  mA typical em  3,3 V (35  mA max)
Corrente Hibernando	2,5 uA

Tabela 4 – Correntes do XBee

Diante disso, para uma rede fictícia gerada com 50 dispositivos, conforme a Figura 22 (a), foi utilizada a representação de grafos onde cada sensor é um vértice e as possíveis conexões são as arestas. O CH eleito, nesse exemplo, se encontra no ponto 4. Assim, foi calculado o menor caminho através do Algoritmo de Dijkstra de todos os sensores da rede até o CH, como será visto adiante. Isso auxiliou na configuração do PL e na seleção do tipo de dispositivo para que houvesse eficiência de consumo de energia. Na Figura 22 (a), pode-se ver, em vermelho, o menor caminho entre o sensor no ponto 49 e CH em 4. Também, é possível observar, na Figura 22, que não foi possível estabelecer a conexão com o ponto 36. Essa informação pode ser utilizada para se adicionar um nó extra na rede e, assim, garantir a comunicação desse ponto.

Para definir os pesos das aresta que seriam utilizados no Algoritmo de Dijkstra,



Figura 22 – Rede ZigBee para validação do algoritmo e caminhos de cada sensor ao coordenador utilizando menor potência.

foi avaliada a potência recebida entre cada conexão possível, conforme Equação 5, bem como foi avaliado se a potência recebida está acima da sensibilidade do receptor, que é -101 dBm, segundo o fabricante [77]. Para cada conexão, o algoritmo verifica, de forma incremental da menor potência até a maior, qual é a menor potência possível de estabelecer comunicação para, então, definir o *PL*.

$$P_{rec} = PL_{powerlevelXBee} - P_{Hata} \tag{5}$$

Onde  $P_{rec}$  é a potência recebida,  $P_{hata}$  é a atenuação em dB, calculada através do modelo de Okumura-Hata e  $PL_{powerlevel}$  é a potência de transmissão em dBm e depende do PL selecionado, conforme a Tabela 3.

O modelo de Okumura-Hata é um dos mais populares usados para calcular a perda de caminho para *links* de rádio até 1500 MHz e 100 km [79]. Ele prevê vários ambientes diferentes, incluindo áreas urbanas, suburbanas e abertas. De acordo com esse modelo, a perda de caminho (*path loss*),  $P_{hata}$ , para uma certa distância d (em metros) em áreas urbanas pode ser calculada como:

$$P_{Hata,U}(d)[dB] = 69,55 + 26,16 * log_{10}(f_c) - 13,82 * log_{10}(h_{TX}) - C_{RX} + (44,9-6,55 * log_{10}(h_{Tx})) * log_{10}(d)$$
(6)

Onde  $f_c$  é a frequência central em MHz,  $h_{TX}$  a altura do transmissor em metros e  $h_{RX}$  é a altura do receptor. O coeficiente de correlação,  $C_{RX}$ , da antena receptora, para uma área de cobertura pequena ou média, é calculada através de:

$$C_{RX} = 0,8 + (1,1 * \log_{10}(f_c) - 0,7)h_{RX} - 1,56 * \log_{10}(f_c).$$
(7)

Para uma área cobertura maior:

$$C_{RX} = \begin{cases} 8,29(log_{10}(1,54*h_{RX}))^2 - 1,1; & \text{se } 150 \le f_c \le 200MHz. \\ 3,2(log_{10}(11,75*h_{RX}))^2 - 4,97; & \text{se } 200 \le f_c \le 1500MHz. \end{cases}$$
(8)

Além disso, para áreas suburbanas  $(P_{Hata;SU})$  e abertas  $(P_{Hata;A})$ , a perda de caminho pode ser obtida como segue:

$$P_{Hata,SU}(d)[dB] = P_{Hata,U}(d) - 2 * (log_{10}(f_c/28))^2 - 5,4$$
(9)

е

$$P_{Hata,A}(d)[dB] = P_{Hata,U}(d) - 4,78 * (log_{10}(f_c))^2 + 18,33 * (log_{10}(f_c)) - 40,94$$
(10)

Como os valores da potência recebida,  $P_{rec}$  que é resultado da Equação 5, são negativos e no Algoritmo de Dijkstra os pesos precisam ser positivos, foi feito um ajuste multiplicando a matriz peso por -1. Como se pode observar na matriz abaixo, o peso da aresta da conexão entre os pontos 1 e 5 é 90, 1856. Isso significa que o resultado da Equação 5 é -90, 1856 dB, onde foi utilizado o modelo de Okumura-Hata entre os pontos 1 e 5 (considerando-se a altura do receptor e o transmissor de 1, 5 m urbano) e a carga útil, em *bytes*, e *PL* parametrizado na configuração mais econômica onde se pode estabelecer comunicação (neste caso, PL = 0).

$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	90, 1856
$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
90,1856	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$

Ao se traçarem as rotas entre todos os sensores até o CH, obtém-se uma rede em árvore, conforme a Figura 22(b) e o PL, que deve ser configurada para cada sensor. Para definir o tipo de dispositivo, um vetor é inicializado em que cada posição representa um sensor. Ele é inicializado de forma que todos os dispositivos são roteadores (R). O CH será o coordenador da rede ZigBee; logo, a sua posição do vetor é substituída por C.Na sequência, o algoritmo desenvolvido para alocação de recursos da rede *mesh* avalia quantos sensores trafegam dados para cada aresta. Em todas as arestas onde há apenas um dispositivo trafegando os dados, o sensor é configurado como *end device* (E).

Na Figura 23, é possível observar, após a execução do algoritmo desenvolvido, a configuração de cada sensor (E, R ou C), bem como a quantidade de sensores conectados, representando um peso para as arestas. O vetor de configuração possui o formato como apresentado a seguir:





Figura 23 – Rede ZigBee após execução do algoritmo que define o tipo de dispositivo

Após a execução da rotina descrita para uma rede-exemplo com 50 sensores a serem ligados, 24 deles podem ser configurados como *end devices*, 25 como roteadores e 1 como coordenador. O formato da tabela de configuração é apresentado na Tabela 5.

Sensor	$\mathbf{PL}$	Tipo Dispositivo
1	1	Е
2	2	R
3	2	${ m E}$
4	1	$\mathbf{C}$
5	2	${ m E}$
6	1	Ε
50	1	Ε

Tabela 5 – Configurações de PL e o tipo de dispositivo para cada sensor

# 5.4 Alocação de recursos para rede estrela

Após a definição e parametrização dos sensores na rede *mesh*, foram alocados os recursos para a rede estrela LoRa. Ela fez a conexão dos CHs com o *gateway* LoRa,

conforme Figura a 24. Para essa etapa de planejamento, foi utilizado o Algoritmo Genético de codificação real, diferentemente da Seção 5.2 em que foi utilizado o AG de codificação binária.



Figura 24 – Rede estrela LoRa para otimizar recursos

A largura de banda (BW), o fator de espalhamento (spread factor-SF) e a potência de transmissão (Pt) foram parametrizados de forma a garantir a comunicação, minimizar a energia por *bit* consumida e evitar bloqueios na recepção de sinal no *gateway*.

Para gerenciar com eficácia as restrições de *design* do sistema de tempo no ar e a sensibilidade do receptor, é necessário calcular o tempo no ar de uma determinada configuração de modem [80]. O pacote é composto por vários elementos, conforme apresentado na Figura 25. O tempo no ar do pacote  $T_{packet}$  é dado pela soma do tempo no ar do preâmbulo  $T_{preamble}$  e o tempo no ar da carga útil  $t_{payload}$ .

A duração do preâmbulo é dada por  $T_{preamble} = (4, 25 + N_p) \times T_{symbol}$ , onde  $N_p$  é o número de símbolos no preâmbulo e  $T_{symbol}$  é a duração do símbolo (sendo determinado como  $T_{symbol} = 2^{SF}/BW$ ). A duração da carga útil é dada por  $T_{payload} = N_{payload} \times T_{symbol}$ . Segundo [81], o tempo no ar do pacote impacta na colisão de pacotes na recepção. Isso ocorre quando dois CHs configurados com o mesmo SF transmitirem dados ao mesmo tempo no mesmo canal. Ao reduzir o tempo no ar do pacote, reduz-se a probabilidade dessas colisões ocorrerem.

Para minimizar o consumo de energia e avaliar a performance energética dos dispositivos, foi utilizado um modelo para o consumo de energia por *bit* útil  $(E_{bit})$  proposto



Figura 25 – Estrutura do pacote LoRa

por [82]:

$$E_{bit} = \frac{P_{cons}(P_t) \times (N_{Payload} + N_p + 4, 25) \times 2^{SF}}{8 \times PL \times BW},\tag{11}$$

onde  $N_p$  é o número de símbolos no preâmbulo,  $P_{cons}(P_t)$  é a potência consumida em relação à potência de transmissão, ver a Tabela 6, de acordo com [83] e modelado conforme Equação 15.  $N_{payload}$  é o número de símbolos, de acordo com [80], e modelado da seguinte forma:

$$N_{payload} = 8 + max \left( ceil \left( \frac{\Theta(PL, SF)}{\Gamma(SF)} \right) \times \frac{1}{CR}, 0 \right), \tag{12}$$

onde:

$$\Theta(PL, SF) = 8 \times PL - 4 \times SF + 16 + 28 - 20 \times H \tag{13}$$

e que H = 0 quando o cabeçalho (*header* está ativado e H = 1 quando o cabeçalho está desativado e

$$\Gamma(SF) = SF - 2 \times DE; \tag{14}$$

com DE = 1 quando a otimização de baixa taxa de dados está ativada e DE = 0 caso contrário.

Tabela 6 – Relação entre  $P_t$  e  $P_{cons}$ 

$P_t(dBm)$	$P_{cons}(mW)$
20	412,5
17	297
13	92,4
7	95,4

$$P_{cons}(P_t) = \begin{cases} -0.5 \times P_t + 98, 9; & \text{se } P_t \le 13. \\ -1,8071 \times P_t^2 + 105, 36 \times P_t - 971, 93; & \text{se } P_t > 13. \end{cases}$$
(15)

Para o cálculo da potência recebida  $(P_r, dBm)$ , utilizou-se a Equação 16, onde  $P_t$ é potência transmitida em dBm,  $G_{sistema}$  é o ganho total do sistema em dBi e  $P_{hata}$  é a atenuação do sinal em dB, utilizando o modelo de Okumura-Hata para as áreas urbana, suburbana e rural, conforme explicado na Seção 5.3 e em [84].

$$P_r = P_t + G_{sistema} - P_{hata} \tag{16}$$

A sensibilidade do receptor é calculada conforme equação 17, onde NF é a figura de ruído (*Noise Figure*) e SNR é a relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio*). Para definir o SNR e NF, foram utilizados os parâmetros apresentados pelos dispositivos da Semtech SX1276 e SX1301, sendo o primeiro projetado para dispositivos finais e o segundo para os gateways [85] [86]. 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 visto na Tabela 7.

$$S = -174 + 10 \times \log_{10}(BW) + NF + SNR \tag{17}$$

Tabela 7 – Valores de SNR mínimo requeridos para a decodificação de uma mensagem dado o SF

SE	SNR(dB)		
DL.	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	

Para o Algoritmo Genético, cada indivíduo da população define a configuração de todos os CHs que desejam se conectar ao *gateway* e possui o seguinte formato:

$$\begin{bmatrix} BW_1 & \dots & BW_N & SF_1 & \dots & SF_N & P_{t1} & \dots & P_{tN}, \end{bmatrix}$$

onde para cada CH *i*, são definidos o BW,  $SF \in P_t$ .

Definidos os valores de SF, BW e  $P_t$  para cada CH, notou-se como eles impactam diretamente na energia por *bit*  $(E_{bit})$ , na possibilidade de se estabelecer comunicação  $(S \in P_t)$  e no tempo no ar do pacote  $(T_{packet})$ . Esses três parâmetros foram utilizados na função objetivo (FO), a qual se desejou minimizar no Algoritmo Genético. Após os cálculos dos parâmetros  $(E_{bit}, T_{packet}, S \in P_t)$ , a função objetivo foi calculada conforme a Equação 18, sendo N a quantidade de CHs que se deseja otimizar.

$$FO = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N} (E_{bit}(i) + T_{packet}(i)/40); & \text{se } P_r(i) \ge S(i). \\ \sum_{i=1}^{N} (E_{bit}(i) + T_{packet}(i)/40 + 50000 * (P_r(i) - S)/P_r(i)); & \text{se } P_r(i) < S(i). \end{cases}$$

$$(18)$$

Após a execução do Algoritmo Genético e K-Medoids para planejamento da rede híbrida, conforme a Seção 5.2, os sensores foram divididos em *clusters* e o CH foi eleito para cada um, conforme a Figura 26(a). Após executar os algoritmos para alocação de recursos para as redes *mesh* (Seção 5.3) e estrela, como apresentado nesta seção, a rede fica parametrizada (ver a Figura 26(b)).



Figura 26 – Rede antes e depois da execução dos algoritmos para alocação de recursos.

# 6 Experimentos e resultados

Com a finalidade de obter dados para a validação dos algoritmos desenvolvidos neste trabalho, foi realizado o experimento em campo descrito a seguir. O transmissor (LoRa End-Device) consiste em um módulo LoRa RFM95W que se comunica com o microcontrolador ATSAMD21G18. O microcontrolador define a localização através de um módulo GPS e a cada minuto envia um pacote contendo os dados da sua localização. A Figura 27 mostra um diagrama do arranjo experimental utilizado e os parâmetros usados no experimento para transmissão são apresentados na Tabela 8.

Paâmetro	Sigla	Valor	Unidade
Largura de Banda	$B_W$	125	kHz
Fator de Espalhamento	SF	7, 8 10	a.u.
Taxa de Código	CR	1	a.u.
Frequência	Freq	902.3, 902.5 903.7	MHz

Tabela 8 – Parâmetros do sistema.

O receptor (LoRa Gateway) é controlado por um Raspberry Pi, que possui uma conexão com a *internet* através de um modem 3G inserido em uma porta USB. Os dados são armazenados no banco de dados em nuvem. A comunicação entre o LoRa *End-Device* e o LoRa *Gateway*, bem como a integração com a base de dados, podem ser vistos na Figura 27.



Figura 27 – Configuração do experimento.

O experimento foi realizado nas cidades de Vitória e Vila Velha, no estado do Espírito Santo, Brasil. A arquitetura estrela foi montada com o LoRa *Gateway* instalado no "Convento da Penha", na cidade de Vila Velha, a uma altura de aproximadamente 154 m do nível do mar. O dispositivo final LoRa foi fixado no teto de um carro que percorreu a cidade de Vitória. O resultado obtido é mostrado no mapa da Figura 28, na qual os pontos vermelhos mostram os locais onde foi possível estabelecer comunicação com o *Gateway*. Ao redor desses pontos foram adicionados outros aleatoriamente, que representam outros sensores espalhados pela cidade que desejavam se conectar à rede (em amarelo na Figura 28).



Figura 28 – Mapa com localização dos sensores experimentais e gerados

Por fim, houve um total de 380 sensores espalhados pela cidade de Vitória que desejavam se ligar à rede e à *internet*, formando uma rede IoT. As localizações que foram obtidas experimentalmente — ou seja, das quais se sabe que é possível estabelecer um *link* de comunicação — são os *cluster heads* elegíveis da rede. Ao se traduzirem os dados do mapa para o formato apresentado no Capítulo 5, ver a Figura 16 (a), obteve-se a Figura 29, em que se deseja formar os *clusters* da rede *mesh*, definir os *cluster heads* a partir dos pontos elegíveis e configurar os parâmetros da rede, gerando uma rede como apresentada na Figura 16 (b).

## 6.1 Planejamento da rede híbrida e alocação de recursos

Nesta etapa, foram definidos os *clusters* e *cluster heads* da rede IoT. Os parâmetros, como número de iterações, tamanho da população, entre outros utilizados no algoritmo genético, são apresentados na Tabela 9, na qual as taxas de mutação e cruzamento foram definidos empiricamente.

Descrição	Valor
Número de sensores na rede	380
Número de CH elegíveis	95
Números de Gateways	1
Iterações	120
Tamanho da População	100
Taxa de Cruzamento	80~%
Taxa de Mutação	3~%

Tabela 9 – Parâmetros do AG binário para planejamento de rede híbrida



Figura 29 – 380 sensores experimentais e gerados para ligar à rede através dos algoritmos apresentados e na topologia proposta

A execução do programa desenvolvido levou em consideração a parametrização e penalidades descritas na seção 5.2. A melhor solução, com o valor mínimo de FO (custo 26), foi alcançada pela primeira vez na 55<sup>a</sup> iteração, conforme apresentado na Figura 30. Portanto, com 26 *clusters* e 26 CHs foi possível cobrir todos os sensores de 380 da rede híbrida proposta.



Figura 30 – Custo versus número de iterações.

A rede planejada pode ser vista na Figura 31, na qual cada *cluster* é representado com uma cor diferente e os CHs são destacados. Na mesma figura, é possível ver um dos

clusters e suas possíveis conexões de rede mesh em destaque. Candidatos CH que não foram escolhidos foram convertidos em nós sensores.



Figura 31 – Redesmeshe CH<br/>s eleitos para rede estrela após a execução do AG com K-Medoids.

Após a definição dos *clusters* e *cluster heads*, foi configurada cada rede *mesh* ZigBee com o algoritmo apresentado na Seção 5.3. Foi utilizada a mesma rede que foi mostrada na Figura 31 para a execução do algoritmo de alocação de recursos da rede *mesh*. O resultado pode ser visto na Figura 32. Dos 10 sensores, 7 foram configurados como *end devices*, 2 como roteadores e o CH foi definido como Coordenador. A configuração do PL de cada sensor, assim como as correntes de transmissão ao se enviar os dados que impactam na vida útil da rede, podem ser verificadas na Tabela 10.



Figura 32 – Rede *mesh* configurada.

Nó	$\mathbf{PL}$	Corrente Transmisão (mA)	Tipo
1	1	95	Е
2	1	95	$\mathbf{C}$
3	1	95	Ε
4	1	95	R
5	1	95	Ε
6	1	95	Ε
$\overline{7}$	0	60	Ε
8	2	120	Ε
9	2	120	Ε
10	1	95	R

Tabela 10 – Configurações para cada dispositivo

Para a parametrização da rede LoRa, desejou-se realizar a alocação de recursos, selecionando os melhores BW,  $SF \in P_t$  ao conectar os *Cluster Heads* ao *Gateway*, conforme Figura 33. Os valores utilizados para BW = [125, 250, 500], para SF = [7, 8, 9, 10, 11, 12] e para  $P_t = [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]$ . Os parâmetros utilizados no AG podem ser vistos na Tabela 11.

Além disso, outros parâmetros utilizados foram Taxa de Código igual a 4/5 (CR = 1), otimização da taxa de dados (DE = 1), cabeçalho e CRC habilitado (H = 1, CRC = 1), 12 símbolos no preâmbulo ( $N_p = 12$ ), carga útil de 51 bytes (PL = 51) e a frequência central 915 MHz. O ganho do sistema é de 6 dBi, sendo 3 dBi na antena do transmissor e 3 dBi no receptor. A figura de ruído igual a sete (NF = 7). Para o Okumura-Hata, a altura do *gateway* é de 154 metros e a altura dos CH é de 1,5 metros (foi considerado o meio urbano).

Tabela 11 – Parâmetros do AG para alocação de recursos na rede LoRa

Descrição	Valor
Iterações	500
Tamanho da População	100
Taxa de Cruzamento	70~%
Taxa de Mutação	3~%



Figura 33 – CHs e *Gateway* para alocação de recursos através do AG.

Na execução do AG, utilizaram-se penalidades conforme parametrização descritas na seção 5.4. A relação custo por iteração pode ser vista na Figura 34. Os resultados da seleção dos parâmetros Pt,  $SF \in BW$  são exibidos na Figura 35. Nela, são apresentadas as relações das seleções do AG com a distância entre os CHs e *Gateway* e o impacto na energia e tempo no ar do pacote. Como pode ser observado no gráfico, relacionando-se energia por *bit* por distância, há uma relação exponencial. Segundo [87], na transmissão de dados em uma rede de sensores sem fio, a potência do sinal está diretamente relacionada à distância de comunicação entre eles; isto é, a distância é inversamente proporcional à potência do sinal e diretamente proporcional à quantidade de energia consumido. Quando as distâncias são longas, isso pode significar que a vida útil de uma rede IoT alimentada por bateria é menor em comparação com distâncias curtas, devido ao maior consumo para manter a comunicação.


Figura 34 – Custo da FO versus número de iterações.



Figura 35 – Resultados para (a) Potência, espalhamento e largura de banda; (b) Energia; e (c) Tempo no ar *versus* distância.

## 7 Conclusão

Com a popularização e o aumento dos dispositivos IoT, surgiram preocupações com a estrutura da rede a fim de aumentar a sua confiabilidade. Por isso, foi proposta uma topologia de rede híbrida com LoRa e ZigBee, com o objetivo de alocar de forma otimizada os recursos e a definição das configurações, além da melhor cobertura, conforme a revisão da literatura. Foram desenvolvidos algoritmos de otimização para o planejamento da topologia e para garantir o consumo eficiente de energia. Por fim, para a validação dos algoritmos desenvolvidos, realizou-se a execução deles em dados obtidos experimentalmente.

A topologia proposta é mais robusta, uma vez que cobre as regiões sombreadas onde a topologia em estrela (LoRa) seria deficiente. Observa-se que a principal desvantagem da topologia de rede proposta é o gargalo de comunicação que pode surgir para os dados da rede *mesh* atingir o *gateway*, através do CH. No entanto, isso pode ser resolvido com os *buffers* e o gerenciamento de pacotes. Além do mais, a premissa do uso dessa topologia é para aplicações que não demandem tempo real.

O conjunto de algoritmos desenvolvidos foram utilizados para planejamento e alocação de recursos de uma rede de sensores obtidos através de dados experimentais, com parte deles gerada aleatoriamente. Foi utilizado LoRaWAN na cidade de Vitória-ES com o *gateway* na cidade de Vila Velha-ES. No total, 380 sensores espalhados que se desejavam conectar à *internet*.

Com o uso dos algoritmos, foi possível estabelecer, matematicamente e através de simulações, a comunicação na rede estrela com a menor quantidade de energia por *bit* e menor tempo no ar do pacote, garantindo menos interferências na recepção. Os 380 sensores ficaram agrupados em 26 *clusters*. Para a rede *mesh*, foi possível planejar a comunicação com menor potência de transmissão, além de garantir que os tipos de dispositivos fossem configurados de forma otimizada. Sendo assim, a principal vantagem observada está relacionada com o aumento da vida útil da rede, com base no consumo de energia.

Como continuidade do trabalho, pode-se explorar o uso de outras metaheurísticas e algoritmos para definir os *clusters*, CH e alocação de recursos nas redes ZigBee e LoRa, com o foco na redundância e aumento da confiabilidade da rede.

## Referências

1 ZANELLA, A. et al. Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, IEEE, v. 1, n. 1, p. 22–32, 2014. Citado na página 1.

2 CANEDO, J.; SKJELLUM, A. Using machine learning to secure iot systems. In: IEEE. 2016 14th Annual Conference on Privacy, Security and Trust (PST). [S.l.], 2016. p. 219–222. Citado na página 1.

3 LEVERAGE. An Introduction to the internet of Things. local: <https://www.leverege.com/iot-intro-ebook>, 2018. Citado na página 1.

4 SHRESTHA, A.; XING, L. A performance comparison of different topologies for wireless sensor networks. In: IEEE. 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security. [S.l.], 2007. p. 280–285. Citado 4 vezes nas páginas 1, 12, 13 e 14.

5 KOUBAA, A.; ALVES, M.; TOVAR, E. A two-tiered architecture for real-time communications in large-scale wireless sensor networks: research challenges. In: *WIP Proceeding of the 17th Euromicro Conference on Real-Time Systems (ECRTS'05), Palma de Mallorca, Spain.* [S.1.: s.n.], 2005. Citado na página 1.

6 KOTTAPALLI, V. A. et al. Two-tiered wireless sensor network architecture for structural health monitoring. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. Smart Structures and Materials 2003: Smart Systems and Nondestructive Evaluation for Civil Infrastructures. [S.1.], 2003. v. 5057, p. 8–20. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 6.

7 LU, Z. et al. Applying k-means clustering and genetic algorithm for solving mtsp. In: SPRINGER. *International Conference on Bio-Inspired Computing: Theories and Applications*. [S.l.], 2016. p. 278–284. Citado na página 2.

8 YONG, Y.; XIN\_CHENG, G. A new minority kind of sample sampling method based on genetic algorithm and k-means cluster. In: IEEE. 2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE). [S.I.], 2012. p. 126–129. Citado na página 2.

9 AIBINU, A. et al. A novel clustering based genetic algorithm for route optimization. Engineering Science and Technology, an International Journal, Elsevier, v. 19, n. 4, p. 2022–2034, 2016. Citado na página 2.

10 BAREKATAIN, B.; DEHGHANI, S.; POURZAFERANI, M. An energy-aware routing protocol for wireless sensor networks based on new combination of genetic algorithm & k-means. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 72, p. 552–560, 2015. Citado na página 2.

11 LEE, H.-C.; KE, K.-H. Monitoring of large-area iot sensors using a lora wireless mesh network system: Design and evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 5.

12 ZHU, G. et al. Improving the capacity of a mesh lora network by spreading-factor-based network clustering. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 21584–21596, 2019. Citado na página 5.

13 ALMEIDA, N. C. et al. Proposal of a hybrid lora mesh/lorawan network. In: IEEE. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT. [S.l.], 2020. p. 702–707. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

14 JURCIK, P. *Real-time communication over cluster-tree wireless sensor networks*. Tese (Doutorado) — Czech Technical University in Prague Czech Republic, 2010. Citado na página 5.

15 CROW, B. P. et al. Ieee 802.11 wireless local area networks. *IEEE Communications magazine*, IEEE, v. 35, n. 9, p. 116–126, 1997. Citado na página 6.

16 SHANTHI, D.; PRASANNA, K. Energy efficient intelligent routing in wsn using dominant genetic algorithm. *International Journal of Electrical & Computer Engineering* (2088-8708), v. 10, 2020. Citado na página 6.

17 TEGUH, R.; MURAKAMI, R.; IGARASHI, H. Optimization of router deployment for sensor networks using genetic algorithm. In: SPRINGER. *International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing*. [S.l.], 2014. p. 468–479. Citado na página 7.

18 WANG, J. et al. A k-medoids based clustering algorithm for wireless sensor networks. In: IEEE. 2018 International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT). [S.l.], 2018. p. 1–4. Citado na página 7.

19 JAIN, S.; BHAROT, N. K medoids based clustering algorithm with minimum spanning tree in wireless sensor network. In: IEEE. 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). [S.l.], 2019. p. 1771–1776. Citado na página 7.

20 Shalma, H.; Rajesh, R. Dynamic cluster based energy controlled routing in wireless sensor networks. In: *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. Citado na página 7.

21 Abderrahim, M. et al. Energy-efficient transmission technique based on dijkstra algorithm for decreasing energy consumption in wsns. In: 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA). [S.l.: s.n.], 2019. p. 599–604. Citado na página 7.

22 RAZZAQ, M.; KWON, G.-R.; SHIN, S. Energy efficient dijkstra-based weighted sum minimization routing protocol for wsn. In: IEEE. 2018 Third International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). [S.I.], 2018. p. 246–251. Citado na página 7.

23 Thomas, S.; Gayathri, I. K.; Raj, A. Joint design of dijkstra's shortest path routing and sleep-wake scheduling in wireless sensor networks. In: 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS). [S.l.: s.n.], 2017. p. 981–986. Citado na página 7.

24 BOUALEM, A. et al. A new dijkstra front-back algorithm for data routing-scheduling via efficient-energy area coverage in wireless sensor network. In: 2019 15th International Wireless Communications Mobile Computing Conference (IWCMC). [S.l.: s.n.], 2019. p. 1971–1976. Citado na página 7.

25 SILVA, C. dos Santos e. Um Estudo sobre Tecnologias de Comunicação sem Fio para Aplicações de IoT em Agricultura de Precisão. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 8, 16, 17 e 22.

26 TALAVERA, J. M. et al. Review of iot applications in agro-industrial and environmental fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, Elsevier, v. 142, p. 283–297, 2017. Citado na página 9.

27 LIBELIUM, C. Precision Farming to control irrigation and improve fertilization strategies on corn crops. 2016. Acessado: 2020-11-17. Disponível em: <a href="https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/">https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/</a> precision-farming-to-control-irrigation-and-improve-fertilization-strategies-on-corn-crops/</a> >. Citado na página 9.

28 LIBELIUM, C. The first smart vineyard in lebanon chooses libelium's technology to face the climate change. 2017. Acessado: 2020-11-17. Disponível em: <a href="https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/">https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/</a> the-first-smart-vineyard-in-lebanon-chooses-libeliums-technology-to-face-the-climate-change/</a> >. Citado na página 9.

29 LIBELIUM, C. Smart Agriculture project in an Australian nursery to ensure crops health and reduce losses. 2017. Acessado: 2020-11-17. Disponível em: <a href="https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/smart-agriculture-project-in-an-australian-nursery-to-ensure-crops-health-and-reduce-losses/">https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/</a> smart-agriculture-project-in-an-australian-nursery-to-ensure-crops-health-and-reduce-losses/</a> >. Citado na página 9.

30 LIBELIUM, C. New weather station sensors integrated in libelium's iot platform perform maximum accuracy. 2017. Acessado: 2020-11-17. Disponível em: <a href="https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/">https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/</a> new-weather-station-sensors-integrated-in-libeliums-iot-platform-perform-maximum-accuracy/</a> . Citado na página 9.

31 LIBELIUM, C. New vineyard project developed with Libelium IoT platform on Agrotech, the app for crop management, powered by Efor and Ibercaja on Microsoft Azure. 2019. Acessado: 2020-11-17. Disponível em: <a href="https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/">https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/</a> new-vineyard-project-developed-with-libelium-iot-platform-on-agrotech-the-app-for-\ crop-management-powered-by-efor-and-ibercaja-on-microsoft-azure/>. Citado na página 9.

32 LIM, W.; TORRES, H. K.; OPPUS, C. M. An agricultural telemetry system implemented using an arduino-android interface. In: IEEE. 2014 International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM). [S.I.], 2014. p. 1–6. Citado na página 9.

33 HU, J. et al. Design and implementation of wireless sensor and actor network for precision agriculture. In: IEEE. 2010 IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security. [S.l.], 2010. p. 571–575. Citado na página 9.

34 MAFUTA, M. et al. Successful deployment of a wireless sensor network for precision agriculture in malawi. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 9, n. 5, p. 150703, 2013. Citado na página 9.

35 BARCELO-ORDINAS, J. M. et al. A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture. In: *Precision agriculture* '13. [S.l.]: Springer, 2013. p. 801–808. Citado na página 12.

36 ALLIANCE, L. A technical overview of LoRa (R) and LoRaWAN TM What is it? 2015. Acessado: 2020-11-26. Disponível em: <a href="https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawanr">https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawanr</a>>. Citado 3 vezes nas páginas 12, 21 e 22.

37 RAY, B. Comparing Mesh, Star Point-To-Point Topology In IoT Networking. 2018. <<u>https://www.link-labs.com/blog/iot-topology</u>>. Acessado: 2019-02-04. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 14.

38 RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.

39 LIU, Y. et al. Wireless mesh networks in iot networks. In: IEEE. 2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition. [S.l.], 2017. p. 183–185. Citado na página 14.

40 RAWAT, P. et al. Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of supercomputing*, Springer, v. 68, n. 1, p. 1–48, 2014. Citado na página 15.

41 YINBIAO, S. et al. Internet of things: wireless sensor networks. White Paper, International Electrotechnical Commission, http://www. iec. ch, p. 11, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

42 DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. Lora technology-an overview. In: IEEE. 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). [S.1.], 2018. p. 284–290. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.

43 WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry—recent development and future perspective. *Computers and electronics in agriculture*, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 1–14, 2006. Citado na página 16.

44 VEJLGAARD, B. et al. Coverage and capacity analysis of sigfox, lora, gprs, and nb-iot. In: IEEE. 2017 IEEE 85th vehicular technology conference (VTC Spring). [S.l.], 2017. p. 1–5. Citado na página 17.

45 ZUNIGA, J. C.; PONSARD, B. Sigfox system description. *LPWAN@ IETF97, Nov.* 14th, v. 25, 2016. Citado na página 18.

46 BUURMAN, B. et al. Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. *IEEE Access*, IEEE, v. 8, p. 17179–17220, 2020. Citado na página 18.

47 MEKKI, K. et al. Overview of cellular lpwan technologies for iot deployment: Sigfox, lorawan, and nb-iot. In: IEEE. 2018 ieee international conference on pervasive computing and communications workshops (percom workshops). [S.l.], 2018. p. 197–202. Citado na página 18.

48 ZHAI, W. Design of narrowband-iot oriented wireless sensor network in urban smart parking. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*, v. 13, n. 12, p. 116–126, 2017. Citado na página 18. 49 AUGUSTIN, A. et al. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016. Citado na página 19.

50 ZOURMAND, A. et al. Internet of things (iot) using lora technology. In: IEEE. 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS). [S.l.], 2019. p. 324–330. Citado na página 20.

51 GILCHRIST, A. Introducing industry 4.0. In: *Industry 4.0.* [S.l.]: Springer, 2016. p. 195–215. Citado na página 20.

52 BOR, M.; ROEDIG, U. Lora transmission parameter selection. In: IEEE. 2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). [S.l.], 2017. p. 27–34. Citado na página 20.

53 GOURSAUD, C.; GORCE, J.-M. Dedicated networks for iot: Phy/mac state of the art and challenges. 2015. Citado na página 21.

54 SORNIN, N. et al. Lorawan specification. LoRa alliance, 2015. Citado na página 21.

55 TEIXEIRA, G. B.; ALMEIDA, J. V. P. d. *Rede LoRa e protocolo LoRaWAN aplicados na agricultura de precisão no Brasil.* Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017. Citado na página 22.

56 MOLISCH, A. F. et al. Ieee 802.15. 4a channel model-final report. *IEEE P802*, Citeseer, v. 15, n. 04, p. 0662, 2004. Citado na página 22.

57 MIHAJLOV, B.; BOGDANOSKI, M. Overview and analysis of the performances of zigbee-based wireless sensor networks. *International Journal of Computer Applications*, v. 29, n. 12, p. 28–35, 2011. Citado na página 22.

58 FARAHANI, S. ZigBee wireless networks and transceivers. [S.l.]: Newnes, 2011. Citado na página 23.

59 CICIORA, W. S. et al. *Modern cable television technology.* [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2004. Citado na página 23.

60 ZHANG, P. Advanced industrial control technology. [S.l.]: William Andrew, 2010. Citado na página 23.

61 RAMYA, C. M.; SHANMUGARAJ, M.; PRABAKARAN, R. Study on zigbee technology. In: IEEE. 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. [S.l.], 2011. v. 6, p. 297–301. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.

62 DIGICONTENT. XBee /XBee Pro S2C Zigbee RF Module - Anatel (Brazil). 2020. <https://www.digi.com/resources/documentation/Digidocs/90002002/Default.htm# Reference/r\_certs\_xbzb\_brazil.htm?TocPath=Regulatory%2520information%257C\_\_\_\_\_5>. Acessado: 2020-11-24. Citado na página 24.

63 CAO, D.; YANG, B. An improved k-medoids clustering algorithm. In: IEEE. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE).
[S.l.], 2010. v. 3, p. 132–135. Citado na página 25. 64 JIN, X.; HAN, J. K-medoids clustering. *Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining*, Springer, p. 697–700, 2017. Citado na página 25.

65 PARK, H.-S.; JUN, C.-H. A simple and fast algorithm for k-medoids clustering. *Expert systems with applications*, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 3336–3341, 2009. Citado na página 26.

66 FRASER, A. S. Simulation of genetic systems by automatic digital computers i. introduction. *Australian Journal of Biological Sciences*, CSIRO, v. 10, n. 4, p. 484–491, 1957. Citado na página 26.

67 MITCHELL, M. An introduction to genetic algorithms mit press. *Cambridge*, *Massachusetts. London, England*, v. 1996, 1996. Citado na página 26.

68 ZEEBAREE, D. Q. et al. Combination of k-means clustering with genetic algorithm: A review. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 12, n. 24, p. 14238–14245, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

69 WHITLEY, D. A genetic algorithm tutorial. *Statistics and computing*, Springer, v. 4,
n. 2, p. 65–85, 1994. Citado na página 26.

70 AHN, C. W.; RAMAKRISHNA, R. S. A genetic algorithm for shortest path routing problem and the sizing of populations. *IEEE transactions on evolutionary computation*, IEEE, v. 6, n. 6, p. 566–579, 2002. Citado na página 27.

71 COSTA, W. S. et al. Planejamento de sistemas heterogêneos de comunicações para medições smart grids baseado em algortimo genético. *LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, SBPO Limeira, 2019. Citado na página 28.

72 BAYRAKLI, S.; ERDOGAN, S. Z. Genetic algorithm based energy efficient clusters (gabeec) in wireless sensor networks. *Procedia Computer Science*, Elsevier, v. 10, p. 247–254, 2012. Citado na página 28.

73 DIJKSTRA, E. W. et al. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959. Citado na página 28.

74 FUHAO, Z.; JIPING, L. An algorithm of shortest path based on dijkstra for huge data. In: IEEE. 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. [S.l.], 2009. v. 4, p. 244–247. Citado na página 28.

75 BARROS, E. A.; PAMBOUKIAN, S. V.; ZAMBONI, L. C. Algoritmo de dijkstra: apoio didático e multidisciplinar na implementação, simulação e utilização computacional. In: SN. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION, São Paulo.* [S.1.], 2007. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

76 2SOLVE. 2Sense: The final IoT solution. 2018. Acessado: 2020-11-20. Disponível em: <a href="https://www.youtube.com/watch?v=cJe8KH6Hdus">https://www.youtube.com/watch?v=cJe8KH6Hdus</a>. Citado na página 32.

DIGI INTERNATIONAL INC. XBee - PRO 900HP/XSC RF Modules - S3 and S3B.
[S.l.], 2020. Rev. 90002173. Citado 3 vezes nas páginas 33, 36 e 38.

78 SANTOS, W. G. dos et al. Sensor allocation in a hybrid star-mesh iot network using genetic algorithm and k-medoids. In: IEEE. 2019 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM). [S.I.], 2019. p. 1–6. Citado na página 34.

79 PARK, J. J. J. H.; CHEN, S.-C.; CHOO, K.-K. R. Advanced Multimedia and Ubiquitous Engineering: MUE/FutureTech 2017. [S.l.]: Springer, 2017. v. 448. Citado na página 38.

80 SEMTECH. *SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem - Designer's Guide*. [S.l.], 2013. Rev. 1. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

81 FERRÉ, G. Collision and packet loss analysis in a lorawan network. In: IEEE. 2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). [S.l.], 2017. p. 2586–2590. Citado na página 41.

82 BOUGUERA, T. et al. Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 7, p. 2104, 2018. Citado na página 42.

83 SEMTECH. *SX1272 Development Kit User Guide;*. 2018. Acessado: 2018-06-29. Disponível em: <a href="https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1272ska\_userguide">https://www.semtech.com/uploads/documents/sx1272ska\_userguide</a>. pdf>. Citado na página 42.

84 FABER, M. J. et al. A theoretical and experimental evaluation on the performance of lora technology. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, 2020. Citado na página 43.

85 SEMTECH. *SX1276/77/78/79 Datasheet*. 2020. Acessado: 2020-11-24. Disponível em: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/ 6EfVZUorrpoKFfvaF\_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE>. Citado na página 43.

86 SEMTECH. *SX1301 Datasheet*. 2017. Acessado: 2020-11-24. Disponível em: <<u>https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/44000000MDnR/</u> Et1KWLCuNDI6MDagfSPAvqqp.Y869Flgs1LleWyfjDY>. Citado na página 43.

87 LEE, B.-S.; LIN, H.-W.; TARNG, W. A cluster allocation and routing algorithm based on node density for extending the lifetime of wireless sensor networks. In: IEEE. 2012 26th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops. [S.I.], 2012. p. 496–501. Citado na página 50.