

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 04/11/2023.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba

Campus de São João da Boa Vista

NELSON CAMILO DE ALMEIDA

**Rede Híbrida LoRa em Malha – LoRaWAN para
Aplicações de Internet das Coisas**

Sorocaba

2022

NELSON CAMILO DE ALMEIDA

**Rede Híbrida *LoRa* em Malha – *LoRaWAN*
para Aplicações de *Internet* das Coisas**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Interunidades, entre o Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba e o Campus de São João da Boa Vista da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

Área de Concentração: Automação

Linha de Pesquisa: Mecatrônica

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Paciência Godoy

Sorocaba

2022

A447r	Almeida, Nelson Camilo de Rede Híbrida LoRa em Malha – LoRaWAN para Aplicações de Internet das Coisas / Nelson Camilo de Almeida. -- Sorocaba, 2022 84 p. : il., tabs., fotos, mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: Eduardo Paciência Godoy 1. Engenharia elétrica. 2. Automação. 3. Internet das coisas. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

As redes de comunicação LoRaWAN são uma tecnologia de comunicação sem fio que permite o envio de dados por longas distâncias. Assim, a pesquisa sobre estas redes pode trazer muitos benefícios para a sociedade, impactando na melhora da gestão de recursos como: naturais, resíduos, tráfego, energia, saúde e bem-estar e a eficiência da agricultura.

LoRaWAN communication networks are a wireless communication technology that allows data to be sent over long distances. Thus, research on these networks can bring many benefits to society, improving the management of resources such as: natural resources, waste, traffic, energy, health and well-being and the efficiency of agriculture.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Sorocaba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

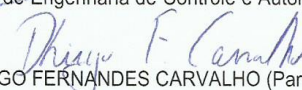
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Rede Híbrida LoRa em Malha – LoRaWAN para Aplicações de Internet das Coisas

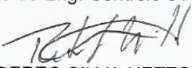
AUTOR: NELSON CAMILO DE ALMEIDA

ORIENTADOR: EDUARDO PACIÊNCIA GODOY

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Automação pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. EDUARDO PACIÊNCIA GODOY (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba


Prof. Dr. DHIEGO FERNANDES CARVALHO (Participação Presencial)
Departamento de Eng. Controle e Automação / Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Sorocaba - ICTS


Prof. Dr. ROBERTO SILVA NETTO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário FACENS

Sorocaba, 03 de novembro de 2022

Agradecimentos

Nesta caminhada de mestrado, agradeço primeiramente a Deus por permitir termos força para continuar caminhando! Agradeço a minha esposa Fabiane que com sua perspicácia possibilitou que eu começasse essa caminhada que agora se completa. A meus filhos, Diego e Juliana, que não entendem ainda os motivos de tanto trabalho. Gostaria de enviar um abraço forte ao Prof. Dr. Eduardo Paciência de Godoy por sempre indicar o melhor caminho a seguir, que com sua visão sabe conduzir muito bem os trabalhos e ainda por apresentar um mundo novo de possibilidades que foi para mim. Aos colegas do Laboratório Gasi, que sempre me apoiaram com tantas boas palavras e sempre ajudando a todos para seguir no caminho: Rodrigo Rolle, Maria Fernanda, Murilo Ferreira, Ricardo Pasquati, José Neto, Marcos Fábio e tantos outros em suas maneiras. Um agradecimento especial à Prof. Dra. Juliana Verona, diretora da Fatec de Itu, por abrir espaço para os trabalhos e a todos da Fatec que fixaram seus pensamentos de apoio.

*"A mente que gera o problema
é a mesma mente que cria a solução"*
(Autor desconhecido)

Resumo

A *Internet das Coisas (IoT)* possibilita o sensoriamento e controle remotos, obtenção e análise de dados e deve permitir a conexão de mais dispositivos. Uma infraestrutura de rede de comunicação é necessário para habilitar a troca de informações entre os elementos de uma aplicação de *IoT*. Neste sentido, várias tecnologias de comunicação em rede foram desenvolvidas e têm sido utilizadas para este fim. Entre essas tecnologias, as recentes *LPWANs* que permitem conexões de rede sem fio de longa distância e baixo consumo de energia em dispositivos normalmente conectados a baterias, porém, com baixas taxas de transmissão de dados. As tecnologias *LPWANs* mais comuns são: *SigFox*, *NB-IoT* e *LoRaWAN*, sendo que todas estas enfrentam um problema de aplicação em comum: a presença de obstáculos e localização topográfica dos dispositivos originam áreas de sombra (sem cobertura) dentro da área de cobertura de comunicação. A topologia utilizada nessas redes (estrela-de-estrelas) agrava ainda mais esta situação. Neste sentido, faz-se necessário buscar alternativas para melhorar a cobertura dessas redes e a possibilidade de superar estes obstáculos permitindo assim que áreas, antes de sombra, possam ser sensoreadas permitindo um melhor aproveitamento dos protocolos de longa distância. Este trabalho apresenta uma solução para este problema através do desenvolvimento de uma rede híbrida composta pela integração de uma rede *LoRa* em malha com uma rede *LoRaWAN*. Essa rede híbrida é baseada em um *hardware* de baixo custo, chamado de *Proxy* que coordena uma rede *LoRa* em malha e conecta, de forma transparente, os dispositivos dessa rede à rede *LoRaWAN*. Essa solução habilita a comunicação de dispositivos em áreas de sombra da cobertura *LoRaWAN*, além da possibilidade de estender a área de cobertura *LoRaWAN* através da rede *LoRa* em malha.

Palavras-chave: *LPWAN*, *LoRaWAN*, Cidades Inteligentes, Áreas de sombra, *LoRa*, malha.

Abstract

The Internet of Things (IoT) enables remote sensing and control, data obtaining and analysis, and should allow the connection of more devices. An infrastructure of network communication is necessary to promote the exchange of information between the elements of an IoT application. In this sense, several network communication technologies have been developed and have been used for this purpose. Among these technologies, the most recent LPWANs enable low-power, long-distance wireless network connections in devices normally connected to batteries, however, with low data rates of transmission. The most common LPWANs technologies are SigFox, NB-IoT, and LoRaWAN, all of which face a common application problem: the presence of obstacles and topographic location of devices give rise to shadow areas (no coverage) within the communication coverage area. The topology used in these networks (star-of-stars) makes this situation even worse. In this sense, it is necessary to seek alternatives to improve the coverage of these networks and the possibility of overcoming these obstacles thus allowing areas, before shadow, to be sensed allowing better use of long-distance protocols. This job presents a solution to this problem by developing a Hybrid Network composed of the integration of a LoRa Mesh network with a LoRaWAN network. That hybrid network is based on low-cost hardware, called a Proxy that coordinates a LoRa Mesh Network and transparently connects the devices on that network to the LoRaWAN network. This solution enables device communication in shadow areas of LoRaWAN coverage, in addition to the possibility of extending the LoRaWAN coverage area through the LoRa Mesh network.

Keywords: LPWAN, LoRaWAN, Smart Cities, Shadow areas, LoRa, Mesh.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Infraestrutura em malha: (a) infraestrutura/ <i>backbone</i> , (b) roteadores em malha, (c) clientes em malha, (d) <i>WMNs</i> Híbridas.	16
Figura 2 – Pacote <i>LoRa</i> .	18
Figura 3 – Distribuição de canais para a América do Norte.	19
Figura 4 – Tecnologia da pilha <i>LoRaWAN</i> .	20
Figura 5 – Janelas de recepção <i>LoRaWAN</i> .	20
Figura 6 – Janelas de recepção <i>LoRaWAN</i> Classe B.	21
Figura 7 – Janelas de recepção <i>LoRaWAN</i> Classe C.	21
Figura 8 – Topologia da rede <i>LoRaWAN</i> .	22
Figura 9 – Segurança da rede <i>LoRaWAN</i> .	23
Figura 10 – Ativação da rede <i>LoRaWAN</i> : (a) <i>OTAA</i> e (b) <i>ABP</i> .	24
Figura 11 – Diagrama de funcionamento do <i>e-Node</i> quando em ativação <i>ABP</i> .	30
Figura 12 – Apresentação da rede <i>LoRa Mesh / LoRAWAN</i> .	33
Figura 13 – Módulo <i>Heltec ESP32 Wi-Fi LoRa 32</i> .	34
Figura 14 – Módulo <i>NideRF SX1276</i> .	35
Figura 15 – Módulo <i>Espressif DevKitC</i> .	35
Figura 16 – <i>Gateway LoRaWAN RD43HAT / RD43HATGPS</i> .	36
Figura 17 – <i>Gateway LoRaWAN</i> - Unesp Sorocaba: (a) <i>Gateway</i> instalado e (b) antena externa.	37
Figura 18 – <i>ChirpStack</i> interface de controle.	38
Figura 19 – <i>ChirpStack</i> diagrama de blocos.	39
Figura 20 – Exemplo de <i>Gateway LoRaWAN ChirpStack</i> .	40
Figura 21 – Estado dos serviços do <i>Gateway LoRaWAN ChirpStack</i> em funcionamento.	41
Figura 22 – Diagrama de blocos dos dispositivos em malha.	42
Figura 23 – Detalhes dos dispositivos <i>LoRa</i> em malha: a) sensor DHT11, b) identificador e c) conexões internas.	43
Figura 24 – Parâmetros dos dispositivos <i>LoRa</i> em Malha.	44
Figura 25 – Algoritmo dos dispositivos da Malha.	45
Figura 26 – Rota do dispositivo 0xB4 para o <i>Proxy</i> .	46
Figura 27 – Pacote de dados do dispositivo 0xB4.	46
Figura 28 – Diagrama de blocos do <i>Proxy</i> .	47
Figura 29 – (a) <i>Proxy</i> em campo e (b) aspectos construtivos.	49
Figura 30 – Algoritmo de gerenciamento da rede em malha.	52
Figura 31 – Algoritmo de reencaminhamento do <i>Proxy</i> .	54
Figura 32 – Virtualização de dispositivos no <i>Proxy</i> .	55
Figura 33 – Criando uma Aplicação no <i>ChirpStack</i> .	56

Figura 34 – Adicionando um dispositivo da malha no <i>ChirpStack</i> .	57
Figura 35 – Cadastro das credenciais LoRaWAN no <i>ChirpStack</i> .	58
Figura 36 – Dispositivos cadastrados no <i>ChirpStack</i> para o teste da rede em malha.	58
Figura 37 – Dispositivo <i>Proxy</i> interligando a rede <i>LoRa</i> em malha a um <i>gateway Lo-</i> <i>RaWAN</i> .	59
Figura 38 – Configuração da Integração do <i>LoRaWAN</i> ao Banco de Dados <i>InfluxDB</i> .	60
Figura 39 – Configuração da Integração do <i>LoRaWAN</i> ao Banco de Dados <i>InfluxDB</i> e indicação da função <i>Decode</i> .	61
Figura 40 – <i>Script</i> em <i>Python</i> que envia os dados ao Banco de Dados <i>InfluxDB</i> .	61
Figura 41 – Visualização dos dados apresentado pelo <i>Grafana</i> .	62
Figura 42 – Teste de cobertura da rede <i>LoRaWAN</i> e o posicionamento do <i>Proxy</i> .	63
Figura 43 – Posicionamento do <i>Proxy</i> para teste da Rede Híbrida.	64
Figura 44 – Áreas de cobertura (a), sombra (b) para a rede <i>LoRaWAN</i> e o posicionamento do <i>Proxy</i> .	65
Figura 45 – Posicionamento dos dispositivos para o teste da rede <i>LoRa</i> em malha.	67
Figura 46 – Visualização dos pacotes <i>LoRaWAN</i> dentro da <i>interface</i> do <i>ChirpStack</i> destacando em vermelho o <i>DevAddr</i> recebido.	68
Figura 47 – Demonstração do tempo utilizado pelo <i>Proxy</i> para gerenciar a criação de uma rede com 2 vizinhos. (a) início do processo de criação da rede, (b) descoberta do primeiro vizinho: 0xB4, (c) descoberta do segundo vizinho: 0xDE, (d) final da descoberta de vizinhos e rotas válidas e (e) custo das rotas criadas.	70
Figura 48 – No detalhe pode ser visto os dispositivos vizinhos do dispositivo ndD2.	71
Figura 49 – Aplicação de teste da rede <i>LoRa</i> em Malha apresentada pelo <i>Grafana</i> .	72
Figura 50 – Rendimento dos dispositivos da Rede <i>LoRa</i> em Malha.	74

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação entre <i>LoRa SF</i>	18
Tabela 2 – Taxa de rendimento dos dispositivos da malha.	73
Tabela 3 – Taxa de <i>PDR</i> da rede Híbrida <i>LoRa</i> em Malha / <i>LoRaWAN</i>	74

Lista de abreviaturas e siglas

ABP	<i>Activation By Personalization</i>
ADR	<i>Adaptative Data Rate</i>
AES	<i>Advanced Encryption Standard</i>
AODV	<i>Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing</i>
AppKey	<i>Application Key</i>
AppSKey	<i>Application Session Key</i>
API	<i>Application Programming Intercafe</i>
AS	<i>Application Server</i>
AU915	<i>Australian 915MHz band</i>
AWS	<i>Amazon Web Server</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BW	<i>Band width</i>
CR	<i>Code Rate</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DevAddr	<i>Device Address</i>
DevEUI	<i>Device End-device Unique Identifier</i>
DSDV	<i>Destination Sequenced Distance Vector</i>
DSR	<i>Dynamic Source Routing</i>
EU868	<i>European 868MHz band</i>
EUI	<i>End User Identifier</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
Gasi	Grupo de Automação e Sistemas Integráveis

GPS	<i>Global Position System</i>
gRPC	<i>Google Remote Procedure Call</i>
HWMP	<i>Hybrid Wireless Mesh Protocol</i>
ID	<i>Identificator</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial Scientific Medical</i>
LMIC	<i>LoRaWAN Made In C</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
MPR	<i>Multi-path Relays</i>
NB-IoT	<i>Narrow Band for Internet of Things</i>
NS	<i>Network Server</i>
NwkSKey	<i>Network Session Key</i>
OLED	<i>Organic Light Emitter Diode</i>
OTAA	<i>Over-The-Air Activation</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RREP	<i>Route Reply</i>
RREQ	<i>Route Request</i>

RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SF	<i>Spread Factor</i>
SNR	<i>Signal-to-noise Ratio</i>
TOA	<i>Time on Air</i>
TTN	<i>The Things Network</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
US902	<i>United States 902MHz band</i>
VPS	<i>Virtual Private Server</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Networks</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	11
1.2	OBJETIVO	13
1.3	ESTRUTURA E CONTEÚDO	14
2	CONCEITOS RELACIONADOS	15
2.1	Rede em Malha	15
2.1.1	Arquitetura em Malha	15
2.2	LoRa	16
2.3	LoRaWAN	19
2.3.1	Características do protocolo	19
2.3.2	Segurança	23
2.3.3	Métodos de ativação	24
2.3.3.1	Ativação OTAA	25
2.3.3.2	Ativação ABP	25
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
4	REDE HÍBRIDA LORA EM MALHA / LORAWAN	32
4.1	Proposta do Trabalho	32
4.2	Materiais	33
4.2.1	Dispositivo LoRa em Malha	33
4.2.2	Módulo transceptor LoRa SX1276	34
4.2.3	Módulo Espressif ESP32-DevKitC	34
4.3	Infraestrutura LoRaWAN	35
4.4	Servidor de Rede e de Aplicação ChirpStack - GatewayOS	37
5	DESENVOLVIMENTO	42
5.1	Dispositivos LoRa em malha	42
5.1.1	Algoritmo dos dispositivos LoRa em Malha	44
5.2	Dispositivo Proxy	46
5.3	Integração LoRa em Malha – LoRaWAN	48
5.3.1	Algoritmo gerenciador da rede LoRa em Malha	50
5.3.2	Algoritmo redirecionador: Proxy	51
5.3.3	Virtualização dos dispositivos da malha para a rede LoRaWAN	54
5.4	Infraestrutura LoRaWAN (ChirpStack)	55

5.5	Aplicação para visualização dos dados da Rede em Malha	59
6	RESULTADOS	63
6.1	Verificação da comunicação <i>LoRaWAN</i> utilizando o <i>ChirpStack</i> . .	67
6.2	Testes de Comunicação e Validação da Rede <i>LoRa</i> em Malha . . .	69
6.3	Testes de Comunicação da Rede Híbrida <i>LoRa</i> em Malha / <i>LoRaWAN</i>	72
6.3.1	Taxa de entrega de pacotes - <i>PDR</i> dos dispositivos da malha	73
6.3.2	Taxa de entrega de pacotes - <i>PDR</i> da Rede Híbrida <i>LoRaWAN</i>	74
7	CONCLUSÕES	75
7.1	Proposta de melhorias	77
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Em sensoriamento, utilizando redes de sensores sem fio, principalmente utilizando redes *LoRaWAN*, fatores externos podem fazer com que apareçam áreas de sombra para esta rede, mesmo estando próximos a um *gateway* pode não ser possível o envio de dados entre um dispositivo e um *gateway LoRaWAN*. O presente trabalho apresenta uma solução para estas problemática e através deste desenvolvimento outras melhorias são apontadas.

1.1 JUSTIFICATIVA

O termo *IoT* (*Internet of Things*), conhecido no Brasil como *Internet das Coisas*, refere-se à interligação de objetos físicos e virtuais em rede permitindo que ocorra a coleta, compartilhamento e armazenamento de uma enorme quantidade de dados. Tais dados podem ser processados e analisados bem como podem fornecer inúmeras informações que podem prover serviços em uma escala até então nunca imaginada. Esta tecnologia *IoT* propicia que a informação esteja disponível em qualquer lugar, a qualquer momento, em qualquer situação e de forma integrada às atividades do cotidiano ([TUDO...], 2015). Desta forma, a tecnologia *IoT* trabalha com sistemas que permitem a conexão de dispositivos com identificação por rádio frequência (*RFID - Radio-frequency Identification*), onde estes sistemas abrangem vários tipos de tecnologias de comunicação que estão presentes nas mais diversas aplicações ([LUVISOTTO et al.], 2018).

Atualmente com o acentuado crescimento de tecnologias *IoT*, muitas aplicações podem ser encontradas em diversos campos de aplicação, tais como segurança, agricultura, medição inteligente, *smart cities*, *smart homes*, *smart wearables* entre outros e principalmente como pode ser consumida essa grande quantidade de informação ([MEKKI et al.], 2018). Tal conectividade foi viabilizada pelo crescimento das redes sem fio que torna o acesso e transmissão de dados para a *internet* facilitados.

As aplicações em *IoT* são caracterizadas principalmente como um longo alcance, baixa transferência de dados, baixo consumo de energia e devem ser economicamente viáveis. Alguns sistemas de comunicação sem fio de baixo alcance, tais como *ZigBee*, *Bluetooth* e *Wi-Fi* trabalham em áreas pequenas a centenas de metros, já as tecnologias de comunicação de rede celular 3G e 4G, fornecem um longo alcance, mas exigem um consumo elevado de energia e alto custo ([SINHA; WEI; HWANG], 2017).

As redes citadas e o avanço de aplicações de *IoT* tem-se impulsionado após o ano de 2013 ([SINHA; WEI; HWANG], 2017), o desenvolvimento de novas formas de comunicação sem fio, como as *LPWANs* (*Low Power Area Networks*) ([MEKKI et al.], 2018)

que surgiram como boas alternativas frente às aplicações de *IoT* (USMAN; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Essas aplicações *IoT* têm sido utilizadas de forma mais acentuada tanto no setor industrial como na comunidade acadêmica (MEKKI et al., 2018).

Entre as principais *LPWANs* podem-se destacar *LoRaWAN* (*Long Range Wide Area Network*), *NB-IoT* (*Narrow Band for Internet of Things*), *SigFox* entre outras. Estas redes se caracterizam por possuírem um equilíbrio satisfatório entre distância e alcance de comunicação podendo chegar a quilômetros com um baixo consumo de energia, permitindo uma vida útil extremamente longa de baterias que pode chegar a anos de duração. Tais características estão sendo recentemente empregadas em aplicações de *IoT* (USMAN; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017), (SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2017). Embora várias tecnologias baseadas em *LPWAN* estejam sendo desenvolvidas, no Brasil observa-se um avanço e disponibilidade de uso da rede *LoRaWAN* mas, as redes *SigFox* e *NB-IoT* utilizam, no Brasil, rede baseadas nas operadoras de celular, o que introduz custos altos. Já a rede *LoRaWAN* utiliza comunicação em bandas sub-GHz não licenciadas e de uso livre, oferecendo um custo mais baixo.

LoRaWAN utiliza o protocolo *LoRa*, acrônimo de *Long Range* (Longo Alcance) e *NB-IoT* utiliza um protocolo de banda estreita (SINHA; WEI; HWANG, 2017). O autor apresenta um roteiro do funcionamento da rede em malha desenvolvida e as características do *gateway LoRaWAN* utilizado *et. al.*, algumas destas características podem ser usadas para escolher qual tecnologia *LPWAN* utilizar e indica que o *LoRa* pode ser utilizado junto a aplicativos de baixo custo enquanto o *NB-IoT* é direcionado para aplicações que exigem alta qualidade de serviço e baixa latência.

O protocolo *LoRa* possibilita um longo alcance de transmissão de dados, da ordem de alguns quilômetros (km) em ambientes urbanos e 15km em ambiente rural (ABRARDO et al., 2019) e para sua utilização se faz necessário a implantação de uma certa infraestrutura como os dispositivos (*end points*) onde são conectados sensores ou atuadores, os *gateways* que fazem a interconexão de rádio entre os dispositivos até o gerenciador de rede permitindo acesso até a aplicação do usuário utilizando servidores dedicados, como por exemplo a rede *TTN* (*The Things Network*) que é uma rede *IoT* aberta e global mantida pelos seus usuários, a *American Tower ATC* que é uma rede particular *LoRaWAN* e até infraestruturas locais como é o caso do Servidor de Rede e Aplicação *ChirpStack*.

Nos *gateways* são instaladas antenas que proporcionam uma boa área de cobertura para o *link* de dados *LoRa* proveniente dos dispositivos. Estes *gateways* devem ainda ter conexão com a *internet*, seja ela *Wi-Fi*, *ethernet* ou celular 3G/4G. Porém, algumas situações podem dificultar o alcance dos *gateways LoRaWAN*, tais como: a presença de obstáculos como paredes ou grandes construções e ainda obstáculos naturais como montanhas, florestas ou colinas. Estes obstáculos diminuem muito a distância de comunicação entre um dispositivo e o *gateway* próximo e fazem com que apareçam áreas de sobra onde

os dispositivos *LoRaWAN* não consigam transmitir os dados a nenhum *gateway*. Uma solução possível seria reposicionar o *gateway* para minimizar essas áreas de sombra, porém, o *gateway* necessita de conexão com a *internet* para retransmitir os dados o que restringe a possibilidade de reposicionamento para áreas onde o *gateway* esteja dentro da cobertura de uma rede *Wi-Fi*, por exemplo.

Diante desta situação, várias possibilidades de melhoria do alcance da rede *LoRa* e *LoRaWAN* vem sendo estudadas, como por exemplo:

- a criação de uma rede *point-to-point* (ponto a ponto) de sensores que estende o alcance da rede *LoRa*, mas não faz conexão entre as redes *LoRa* e *LoRaWAN*, apresenta ainda alguns inconvenientes em que se um dispositivo intermediário falhar ou desligar, não existe outro caminho para os dados continuarem trafegando do último dispositivo até a aplicação tornando esta solução pouco eficaz (ABRARDO et al., 2019).
- outra possibilidade é um extensor *multi-hop* (multi-saltos) para a rede *LoRa* convencional que permitiria a retransmissão dos dados provenientes de sensores através de dispositivos retransmissores nas proximidades, denominados *Relay Nodes*, organizados de forma a estender a cobertura da rede *LoRaWAN* (ASLAM et al., 2020).
- outro extensor para a rede *LoRaWAN* foi discutido em (SISINNI et al., 2019) onde os autores desenvolvem um dispositivo especial que permite o reenvio dos dados para um dispositivo que esteja mais distante, aumentando assim o alcance da rede *LoRaWAN*. Este extensor apresenta total compatibilidade com o protocolo *LoRaWAN* garantindo assim a comunicação de dados com um dispositivo mais distante através do *e-Node* (*extender node* - nó extensor) permitindo assim que os dados sejam transmitidos e recebidos respeitando o protocolo *LoRaWAN*.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho apresenta uma possível solução: a Rede Híbrida *LoRa* em Malha / *LoRaWAN* através do desenvolvimento de um dispositivo especial denominado *Proxy* que permite a comunicação com uma infraestrutura *LoRaWAN* já existente e fará a ponte entre as redes *LoRa* em Malha e *LoRaWAN*, permitindo que em regiões de sombra para a rede *LoRaWAN*, possam ser sensoreadas e assim, permitir que se possa aumentar a área de cobertura para um ou outros *gateways* próximos sendo que, em caso de falha de um ou outro dispositivo a reorganização da rede em malha possa encontrar outra rota para enviar os dados, possibilitando um maior alcance na transmissão *LoRaWAN* e maior confiabilidade mesmo que um dispositivo venha a falhar.

O objetivo deste trabalho é então, desenvolver um dispositivo concentrador, denominado *Proxy*, totalmente compatível com a rede *LoRaWAN*, que fará a interconexão entre a Rede Híbrida *LoRa* em Malha e *LoRaWAN*, de tal forma que amplie o alcance da rede *LoRaWAN* em áreas de sombra, utilizando para isto uma topologia de malha. O *Proxy* é um dispositivo compatível com a rede *LoRaWAN* e tem duas funções: gerenciar a rede *LoRa* em Malha, permitindo a comunicação dos dados recebidos dos dispositivos *LoRa* em Malha e reencaminhando os dados para um *gateway LoRaWAN* próximo.

1.3 ESTRUTURA E CONTEÚDO

A estrutura deste trabalho está dividida em 7 capítulos, considerando esta introdução e desconsiderando as referências bibliográficas.

O capítulo 2 trata dos conceitos relacionados aos principais tópicos acerca do tema proposto com relação à rede *LoRaWAN*, bem como do protocolo *LoRa* e os protocolos de roteamento para a rede em malha.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos relacionados ao tema proposto e apresenta alguns estudos que demonstram a importância do presente trabalho.

O capítulo 4 traz a proposta de trabalho que é o desenvolvimento de uma Rede Híbrida *LoRa* em Malha / *LoRaWAN* e apresenta o *hardware* utilizado em toda infraestrutura para o funcionamento dos dispositivos *LoRaWAN*, o *Proxy* e *LoRa* em malha.

O capítulo 5 mostra o Servidor de Rede e Aplicação utilizado bem como seus principais detalhes e o desenvolvimento dos elementos do trabalho, tais como: a infraestrutura do *gateway LoRaWAN*, o *Proxy*, os dispositivos *LoRa* em malha e versa sobre a proposta da integração da rede *LoRaWAN* e *LoRa* em malha. Também apresenta um roteiro do funcionamento da rede em malha desenvolvida e as características do *gateway LoRaWAN* utilizado.

O capítulo 6, por sua vez, apresenta os resultados obtidos com o desenvolvimento do *Proxy*, da rede *LoRa* em malha e como são feitas as leituras dos dados na *interface* do *ChirpStack* e *Grafana*. Apresenta também, os resultados dos testes de campo realizados em área de sombra para a cobertura do *gateway LoRaWAN* instalado no Campus da Unesp e algumas considerações sobre os testes.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as considerações finais e as conclusões obtidas com a elaboração do trabalho, bem como, aponta possibilidades de melhorias sobre os resultados obtidos.

7 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou e descreveu o desenvolvimento de uma Rede Híbrida *LoRa* em Malha / *LoRaWAN*, através do desenvolvimento do dispositivo *Proxy*, que gerencia a rede *LoRa* em Malha e atua como ponte entre a rede em malha e a rede *LoRaWAN* formando, assim, a Rede Híbrida *LoRaWAN*. Este dispositivo *Proxy* é compatível com as especificações *MAC* versão 1.0.3 da rede *LoRaWAN* em Classe C e permite futuras atualizações. O desenvolvimento desta solução se deve ao fato de que a rede *LoRaWAN*, através dos *gateways*, que fazem a comunicação dos dispositivos *LoRaWAN* com Servidores de Rede e de Aplicação, apresenta um bom alcance nas transmissões de dados, porém, fatores externos, relacionados ao local onde estes *gateways* são instalados e a presença de obstáculos para a transmissão dos pacotes *LoRaWAN*, podem fazer com que apareçam áreas com sombra, para os pacotes transmitidos o que faz com que estes locais de sombra não sejam cobertos pela rede *LoRaWAN*.

O presente desenvolvimento do dispositivo *Proxy*, proporciona a interconexão da Rede *LoRa* em Malha à rede *LoRaWAN*, sendo que, não é necessária nenhuma alteração na infraestrutura já existente de *gateways LoRaWAN*, devido ao fato de que o dispositivo *Proxy* é totalmente compatível com os *gateways* já disponíveis virtualizando os dispositivos da malha para a rede *LoRaWAN* utilizando o método de ativação *ABP*, ainda apenas para envio (*uplink*) de pacotes, sendo o *downlink* da rede *LoRaWAN* não implementado. É indicado para futuras versões deste projeto, a implementação do método de ativação *OTAA*, para melhor segurança das aplicações e da função de *downlink* na rede Híbrida *LoRaWAN*.

Sendo a rede *LoRaWAN*, uma das *LPWANs* que mais crescem no cenário mundial, vários trabalhos recentes apontam possíveis soluções para as áreas de sombra tanto em zonas rurais, no setor industrial, doméstico ou híbridos. Neste caso, a utilização de uma rede Híbrida *LoRa* em Malha / *LoRaWAN* permite que, locais onde não possa ocorrer a transmissão *LoRaWAN*, mesmo dentro da área de cobertura de um *gateway LoRaWAN*, um dispositivo ligado em malha possa transmitir e receber dados até uma aplicação utilizando a rede em malha aqui apresentada e, enviar os dados para a rede *LoRaWAN* através do referido *Proxy*, sendo este posicionado dentro da área de cobertura de um *gateway LoRaWAN* devidamente operante.

A rede em malha permite, através do seu gerenciamento de rede, que se algum dispositivo venha a desligar, outra rota seja utilizada, adicionando assim, um fator de confiabilidade na transmissão dos pacotes de dados, porém, uma confirmação de envio/recebimento se faz necessário, mas poderia causar um atraso na rede ou maior dificuldade de

gerenciamento das transmissões, tanto na criação da rede, quanto no envio dos dados com a rede em funcionamento. Esta rede em malha desenvolvida não apresenta confirmação de transmissão de pacotes de dados.

Quanto a utilização de memória: um fator relevante na seleção do microcontrolador utilizado foi: o microcontrolador *ESP32* possui 520KB de memória *RAM*, o que facilitou o desenvolvimento e gerenciamento das filas de transmissão e tabelas de rotas. A quantidade de memória utilizada supera a disponibilidade de memória de outros microcontroladores de mercado atuais. Outro fator importante é que, a plataforma *ESP LoRa 32 WiFi V2* apresenta *hardware* de baixo custo e com todas as características essenciais para este projeto.

O consumo de energia não foi abordado nos dispositivos da malha, mas observa-se que para manter a rede em malha operando é interessante que o microcontrolador esteja funcionando integralmente, não possibilitando que este entre em modos de economia de energia, sendo classificado como de Classe C, pelo fato de enviar dados de forma assíncrona, esteja sempre em modo de recepção para os pacotes de dados de um dispositivo vizinho, assim sendo, deve por estar sempre em modo de interrupção por recepção, para reencaminhar os pacotes recebidos de um vizinho para o *Proxy*. Uma possibilidade seria, o gerenciamento de tempos de transmissão agendados, onde os dispositivos acionem em intervalos de tempo pré-definidos e retornem ao estado de economia de energia.

Uma situação constatada é que, se os dispositivos estiverem próximos, a formação de redes com 1 salto é mais constante, o que para os testes foi fator determinante tendo em vista que a distância entre os dispositivos necessitou ser bem estudada, já que a rede *LoRa* é conhecida pela transmissão em longas distâncias, desta forma optou se por utilizar *SF7* que possui o menor alcance para a realização dos testes. Uma possível solução para os testes é a limitação do valor de *RSSI*, onde se verificou que, para valores menores que -102dBm, a quantidade de pacotes perdidos aumenta consideravelmente, inviabilizando o teste da rede em malha, já que com poucos saltos a comunicação em malha não é validada.

Quanto às características do protocolo *AODV*, tais características facilitaram o desenvolvimento do presente projeto, mas se torna interessante o teste de novas variantes deste mesmo protocolo, pois podem adicionar novas funcionalidades ao gerenciamento de rotas de formas mais eficientes em relação à rede em malha.

Os dispositivos instalados na área de sombra, demonstram que a solução apresentada é uma boa opção para sensoriamento remoto, cidades inteligentes e controles autômatos, facilitados pela instalação da Rede Híbrida *LoRa* em Malha / *LoRa WAN*.

Outra possibilidade que se apresenta é, a extensão da rede *LoRa WAN*, sendo que os *links* da rede *LoRa* em Malha podem chegar a vários quilômetros de distância e apresentam uma solução com um rendimento superior a 80%, aproveitando este bom indicador, porém,

não sendo indicada para situações críticas de comunicação.

Atendendo aos itens propostos, este projeto demonstrou a utilização da Rede em Malha, utilizando o protocolo *LoRa*, comunicando com a rede *LoRaWAN*, sendo esta uma rede bastante importante em aplicações de *IoT*. A Rede em Malha, aliada ao longo alcance da comunicação *LoRa*, permitem uma área de cobertura muito grande sendo uma excelente opção às redes mais tradicionais, tais como, *Wi-Fi*, *Bluetooth* ou *3G/4G*. Outros pontos favoráveis são: os fabricantes disponibilizam bibliotecas para programação, e ainda, a existência de uma comunidade ativa de desenvolvedores que oferecem um bom suporte a atualizações de *software* para vários sistemas de microcontroladores do mercado.

Os resultados apresentados validam o desenvolvimento do presente projeto, aqui apresentado, como uma possível solução para a problemática da comunicação em áreas de sombra e a extensão do alcance da rede *LoRaWAN*. O dispositivo *Proxy*, principal elemento da rede Híbrida *LoRa* em Malha / *LoRaWAN*, atuando como gerenciador da Rede em Malha, constitui um elemento que permite que mais dispositivos se conectem à rede *LoRaWAN*, estendendo seu alcance e melhorando a conectividade em áreas de sombra.

7.1 Proposta de melhorias

A seguir, apresentam-se algumas propostas de melhorias verificadas:

- melhorar o gerenciamento da rede em malha;
- adicionar suporte a ativação *OTAA*;
- adicionar suporte a mensagens de *downlink* para os dispositivos da malha através do *Proxy*;
- criptografia entre os dispositivos da malha;
- contador de pacotes salvo em memória *flash*;
- análise de consumo de energia e melhora na duração da bateria;
- possibilidade de limitar o *RSSI* na descoberta de novos vizinhos, a fim de otimizar a rede em malha.

Referências

- ABRARDO, A. et al. Black Powder Flow Monitoring in Pipelines by Means of Multi-Hop LoRa Networks. In: *2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0 IoT)*. [s.n.], 2019. p. 312–316. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/METROI4.2019.8792890>.
- AKYILDIZ, I. F.; WANG, X. A survey on Wireless Mesh Networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 43, n. 9, p. S23–S30, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2005.1509968>.
- ALMEIDA, N. C.; ABUD, R. B.; GODOY, E. P. Infraestrutura LoRaWAN para Aplicações didáticas de Internet das Coisas. *4º Congresso Pós-Graduação do IFSP - 2019*, 11 2019.
- ALMEIDA, N. C. de. *Hybrid LoRa Mesh*. 2022. Acesso em 20 out. 2022. Disponível em: <https://github.com/ncamilo/hybrid-lora-mesh>.
- ALMEIDA N. C.; ROLLE, R. G. E. P. F. P. S. E. Proposal of a hybrid lora mesh / lorawan network. In: *2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 702–707.
- ANATEL. *ATRIBUIÇÃO DE FAIXAS DE FREQUÊNCIAS NO BRASIL*. [S.l.], 2014. Acesso em 22 jun. 2020. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documentoVersionado.asp?numeroPublicacao=&documentoPath=radiofrequencia/qaff.pdf&Pub=&URL=/Portal/verificaDocumentos/documento.asp>.
- ANGRISANI, L. et al. LoRa protocol performance assessment in critical noise conditions. In: *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*. [s.n.], 2017. p. 1–5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/RTSI.2017.8065952>.
- ASLAM, M. S. et al. Exploring Multi-Hop LoRa for Green Smart Cities. *IEEE Network*, v. 34, n. 2, p. 225–231, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900269>.
- AZHARI, R. Y.; FIRMANSYAH, E.; BEJO, A. Simple Protocol Design of Multi-Hop Network in Lora. In: *2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*. [s.n.], 2019. p. 177–181. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISRITI48646.2019.9034662>.
- CHIRPSTACK, open-source LoRaWAN®Network Server. 2022. Acesso em: 01 set. 2022. Disponível em: <https://www.chirpstack.io/>.
- DIAS, J.; GRILO, A. Multi-hop LoRaWAN uplink extension: specification and prototype implementation. In: *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. [s.n.], 2020. p. 945–959. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ISRITI48646.2019.9034662>.
- DUONG, C. T.; KIM, M.-K. Reliable Multi-Hop Linear Network Based on LoRa. *International Journal of Control and Automation*, v. 11, p. 143–154, 04 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2018.11.4.13>.

- ESPRESSIF SYSTEMS. *Espressif ESP32 DevKitC*. 2022. Acesso em 20 set. 2022. Disponível em: <<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>>.
- G-NICERF®. *G-NiceRF® LoRa127X module*. 2022. Acesso em 20 set. 2022. Disponível em: <<https://www.nicerf.com/products/detail/sx1276-lora-module-lora1276-1.html>>.
- GEMALTO; ACTILITY; SEMTECH. *LoRaWAN Security, Full End-to-End Encryption for IoT Application Providers*. 2017. Acesso em: 01 set. 2020. Disponível em: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2019-05/lorawan_security_whitepaper.pdf>.
- LORA-ALLIANCE. 2020. Acesso em: 01 set. 2020. Disponível em: <<https://www.lora-alliance.org>>.
- LORA-ALLIANCE. *RP2-1.0.1 LoRaWAN® Regional Parameters*. [S.l.], 2020. Acesso em 22 jun. 2020. Disponível em: <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2020-06/rp_2-1.0.1.pdf>.
- LORAWAN-NODE. 2019. Acesso em: 01 set. 2019. Disponível em: <<https://github.com/ncamilo/LoRaWAN-node>>.
- LUNDELL, D. et al. A routing protocol for lora mesh networks. In: *2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM)*. [s.n.], 2018. p. 14–19. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12652-019-01207-3>>.
- LUVISOTTO, M. et al. On The Use Of LoRaWAN For Indoor Industrial IoT Applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, Hindawi, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2018/3982646>>.
- MEKKI, K. et al. A Comparative Study Of LPWAN Technologies For Large-Scale IoT Deployment. *Wireless Communications and Mobile Computing*, ICT Express. Elsevier BV., 2018. Acesso em 11 abr. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>>.
- RADIOENGE. *Gateway LoRaWAN RD43HAT*. 2020. Disponível em: <<https://www.radioenge.com.br/solucoes/iot/18-gateway-lorawan.html>>. Acesso em: 15 set. 2020.
- SANCHEZ-IBORRA, R.; CANO, M.-D. State of the art in LP-WAN solutions for industrial IoT services. In: _____. [s.n.], 2017. p. 241 – 254. ISBN 9783038423706. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s16050708>>.
- SEMTECH. *LoRa Modulation Basics*. [S.l.], 2015. Acesso em 15 jun. 2020. Disponível em: <<http://wiki.lahoud.fr/lib/exe/fetch.php?media=an1200.22.pdf>>.
- SEMTECH CORPORATION. *LoRa Modulation LoRaWAN A Technical Overview*. [S.l.], 2019. Acesso em 20 jun. 2020. Disponível em: <https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf>.
- SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S.-H. A survey on LPWAN technology: LoRa and NB-IoT. In: _____. [s.n.], 2017. v. 3, p. 14–21. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.03.004>>.

SISINNI, E. et al. Lorawan range extender for industrial iot. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 16, n. 8, p. 5607–5616, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TII.2019.2958620>.

SOLé, J. M. et al. Implementation of a lora mesh library. *IEEE Access*, v. 10, p. 113158–113171, 2022.

TUDO CONECTADO. Revista da Sociedade Brasileira de Computação. Sociedade Brasileira de Computação, n. 4, 2015. Acesso em 10 abr. 2020. Disponível em: https://www.sbc.org.br/images/flippingbook/computacaobrasil/computa_29_pdf/comp_brasil_2015_4.pdf.

USMAN, R.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>.

VARGHESE, S. G. et al. Comparative study of zigBee topologies for IoT-based lighting automation. *IET Wireless Sensor Systems*, v. 9, n. 4, p. 201–207, 2019. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-wss.2018.5065>.

ZHANG, Y.; LUO, J.; HU, H. *Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards*. [S.l.]: CRC Press, 2006. (Wireless Networks and Mobile Communications). ISBN 9781420013542.