

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Flavio Eduardo Soares e Silva

**LORAWAN PARA COMUNICAÇÕES DE REDES  
ELÉTRICAS INTELIGENTES EM ÁREAS  
SUBURBANAS E RURAIS**

Santa Maria, RS  
2019

**Flavio Eduardo Soares e Silva**

**LORAWAN PARA COMUNICAÇÕES DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES  
EM ÁREAS SUBURBANAS E RURAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Luciane Neves Canha, Dra.

Santa Maria, RS  
2019

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo autor.

Soares e Silva, Flavio Eduardo.

LORAWAN PARA COMUNICAÇÕES DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES EM ÁREAS SUBURBANAS E RURAIS / Flavio Eduardo Soares e Silva. – 2019.

85 p.; 30 cm.

Orientador: Luciane Neves Canha

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2019.

1. Arquitetura de Dados para Utilities 2. Comunicação para Redes Elétricas Inteligentes 3. IoT para meios Rurais 4. LPWAN 5. LoRaWAN I. Canha, Luciane Neves II. Título.

---

©2019

Todos os direitos autorais reservados a Flavio Eduardo Soares e Silva. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Avenida Roraima, 1000, Prédio 10, Bairro Camobi, Santa Maria, RS, 97105-900

Endereço Eletrônico: seuflavio@gmail.com

---

**Flavio Eduardo Soares e Silva**

**LORAWAN PARA COMUNICAÇÕES DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES  
EM ÁREAS SUBURBANAS E RURAIS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 18 de março de 2019:**

---

**Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)**  
(Presidente/Orientadora)

---

**Carlos Eduardo Pereira, Dr. (UFRGS)** - Videoconferência

---

**Carlos Henrique Barriquello, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2019

*Dedico este trabalho, com muito amor, à  
minha querida esposa Juliana, ao meu filho  
Enrico. Ao meu irmão Claudio, um guerreiro  
que lutou até onde conseguiu e vive no  
coração de todos nós.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que alcancei até hoje e por tudo que poderei alcançar sob sua luz.

À minha esposa Juliana e meu filho Enrico pelo amor e carinho diários e por formarmos uma família maravilhosa.

A meus pais Jurandir e Rosângela por toda dedicação e suor dispendido para formação do meu caráter, educação e apoio na vida adulta.

Aos meus irmãos Marcio, Claudio (em memória) e Marcus Vinicius pelo companheirismo e amizade.

À professora Luciane Neves Canha pela orientação, conhecimento, carinho e paciência.

Ao professor Carlos Henrique Barriquello pelo apoio e por passar seu vasto conhecimento de comunicações durante todo o mestrado. Também agradeço por todo material produzido, os testes realizados e toda a dedicação e entusiasmo para fazer as coisas acontecerem.

Aos professores da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Daniel Bernardon, Alzenira Abaide, Felix Alberto Farret, Vinicius Jacques Garcia e Tiago Marchesan pelos ensinamentos transmitidos, os quais foram fundamentais na construção do meu conhecimento.

Aos membros da banca professores, pelas contribuições e pelo profissionalismo sempre disponibilizado.

Aos colegas de pós-graduação do CEESP: Donorvan Rodrigo, Aline Silva, Daniel Porto, Eric Daza e Marcos Renck pela companhia nas viagens e trocas de experiências.

Aos Colegas de Trabalho AES e CPFL: Marco Barbosa, Thiago Adam, Samuel Flores, Vander Dias, Carlos Albano (em memória), Jociane Dalberto, Gustavo Porto, Alessandro Gonçalves, Lucas Cardoso, Hamilton Schröder, Carlos Berlarmino, Guilherme Rissi e Wagner Seizo Hokama pelo apoio profissional.

Agradeço o suporte técnico e financeiro do CAPES/PROEX, CNPq, FAPERGS, INCT-GD da UFSM e da concessionária de energia elétrica RGE/CPFL através do projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado "Solução inovadora para gerenciamento ativo de sistemas de distribuição" (P&D/ANEEL).

A todos que conviveram comigo e que me incentivaram na realização deste trabalho.

*“Só é lutador quem sabe lutar consigo  
mesmo”*

*Carlos Drummond de Andrade*

## RESUMO

### LORAWAN PARA COMUNICAÇÕES DE REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES EM ÁREAS SUBURBANAS E RURAIS

AUTOR: Flavio Eduardo Soares e Silva  
ORIENTADORA: Luciane Neves Canha

A rede elétrica inteligente (REI), conceituada como um conjunto de elementos monitorados e controlados na cadeia de geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica, permite que se operem os recursos energéticos distribuídos de forma eficiente e com ações em tempo real. Para a comunicação entre os vários dispositivos presentes nas REI e destes com os sistemas supervisórios, tal como o sistema avançado de gerenciamento da distribuição (ADMS) é necessário implantar uma rede de comunicação apropriada para atender aos requisitos de todos os componentes dessa rede inteligente. Considerando as características das redes elétricas inteligentes, as áreas rurais oferecem maiores desafios e requerem a necessidade de estudos à implementação desta tecnologia.

Um problema muito comum encontrado no design e implantação da REI reside na definição da rede de comunicação que servirá o projeto. Muitas maneiras de desenvolver projetos de rede de comunicação foram testadas no Brasil, todas em áreas urbanas onde a rede celular é abundante e os pontos de atendimento estão próximos uns dos outros.

As considerações apresentadas anteriormente motivaram o desenvolvimento desta dissertação que apresenta a metodologia elaborada para auxiliar no processo decisório para a adoção de uma rede de comunicação *LoRaWAN* e quais os requisitos necessários para operar tal rede de comunicação considerando as especificidades das áreas rurais. O trabalho foi desenvolvido e testado em uma rede experimental *LoRaWAN* instalada no Campus da Universidade Federal de Santa Maria e em um estudo de caso realizado em uma zona rural do sul do Brasil.

Os resultados mostraram-se satisfatórios à utilização da rede *LoRaWAN* para aplicações em redes elétricas inteligentes.

**Palavras-chave:** Arquitetura de Dados para Utilities. Comunicação para Redes Elétricas Inteligentes. IoT para meios Rurais. LPWAN. *LoRaWAN*.



## ABSTRACT

### LORAWAN FOR SMART GRID COMMUNICATIONS NETWORKS IN SUBURBAN AND RURAL AREAS

AUTHOR: FLAVIO EDUARDO SOARES E SILVA  
ADVISOR: LUCIANE NEVES CANHA

The Smart Grid, as a concept of monitored and controlled elements in the generation, transmission, distribution and use of electric energy, allows efficient and distributed energy resources to be operated in real time. This communication between various devices present in the smart grid and from these with the supervisory systems, such as the Advanced Distribution Management System (ADMS), is necessary to deploy an appropriate communication network to meet the requirements of all the components of this smart grid. Considering the characteristics of smart grids, a rural area brings greater challenges and requires the study of the implementation of this technology.

A problem encountered in smart grid design and deployment of the communication network that will serve the project. Many ways to develop communication network projects have been tested in Brazil, all in urban areas where the cellular network is abundant and the service points are close to each other.

Those considerations motivated the development of this master thesis that presents the methodology elaborated to assist in the decision making process for the adoption of a LoRaWAN communication network and the minimal requirements to operate such communication network considering rural areas. The work was developed and tested in an experimental network LORAWAN installed in the Campus of the Federal University of Santa Maria (UFSM) and in a case study carried out in a rural area of southern Brazil.

The results were satisfactory to the use of the LoRaWAN network for applications in smart grid works to meter and, in the future, automate the distribution network.

**Keywords:** Utilities Data Architecture. Communication for Smart Grid. IoT for Rural. LPWAN. LoRaWAN.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dependência e impacto potencial de diversas infraestruturas críticas .....	15
Figura 2 – Redes Elétricas Inteligentes – Aplicações em Concessionária de Energia .....	18
Figura 3 – Comunicações em Redes Elétrica Inteligentes .....	20
Figura 4 – Sistema de Comunicação para TI e TO em uma Concessionária de Energia Brasileira .....	21
Figura 5 – Modulação de Lora – CSS .....	23
Figura 6 – Rede de uma Operadora LoRaWAN.....	24
Figura 7 – Arquitetura do Protocolo LoRa.....	24
Figura 8 – Elementos de uma rede LoRaWAN.....	25
Figura 9 – Classes de Dispositivos para LoRaWAN.....	27
Figura 10 – Incidentes de Segurança Cibernética em Indústrias Brasileiras.....	28
Figura 11 – Topologia VPN e Firewall de TO para Segurança Cibernética de REI.....	31
Figura 12 – Solução LTE para comunicação de REI da JRC UK.....	34
Figura 13 – Projeto Redes Inteligentes Eletropaulo – Estrutura .....	35
Figura 14 – Projeto Redes Inteligentes Eletropaulo - Bloco de Telecom (Infraestrutura) .....	36
Figura 15 – Visão Geral dos equipamentos e Software do projeto REI CPFL .....	37
Figura 16 – Topologia RF <i>Mesh</i> para REI – DA - CPFL.....	37
Figura 17 –Área de concessão da Ergon Energy.....	38
Figura 18 – Solução LoRaWAN Ergon Energy – Fonte Actility.....	40
Figura 19 – Fluxograma com a metodologia de Definição do Sistema de Comunicação para REI em meio Rural .....	41
Figura 20 – Rede de Distribuição de URU2 – Uruguaiana – RGE Sul.....	42
Figura 21 – Área de Estudo – Cobertura Telefonía Móvel da Operadora Vivo.....	43
Figura 22 – Arquitetura do sistema multicamada.....	44
Figura 23 – Definição de Espectro por Tecnologia.....	46
Figura 24 – Link budget (dB) vs alcance (km) com transmissor LoRa a 915MHz para SF variável (7 a 12), com 10 dB de margem (p/ fading). Alturas das antenas $h_t = 50m$ e $h_r = 10m$ , com ganhos $G_t = 6dBi$ e $G_r = 9dBi$ . Feito no Servidor TheThings ...	47
Figura 25 – Tela de software de predição IoT – LoRaWAN - SIRADEL .....	48
Figura 26 – Opções para Servidores de Rede LPWAN.....	49
Figura 27 – Topologia completa da solução LoRaWAN. ....	49
Figura 28 – Composição de Preços Recebidas da RFP .....	51
Figura 29 – Fluxo de pacotes em uma rede LoRaWAN .....	52
Figura 30 – Concentrador LoRaWAN, modelo RHF2S008 da Risinghf (à esquerda) e módulo de rádio LoRa (à direita).....	52
Figura 31 – Concentrador LoRaWAN instalado na UFSM (Campus Camobi) (à esquerda), no lado no prédio da reitoria (à direita). ....	53
Figura 32 – Painel de controle do concentrador no servidor de rede TTN .....	54
Figura 33 – Modem USB AT LoRaWAN da Risinghf modelo RHF3M076.....	55
Figura 34 – Janelas de recepção para terminais classe A .....	56
Figura 35 – Mensagens recebidas com sucesso no servidor de rede.....	57

Figura 36 – Mensagem recebida com sucesso no servidor de rede, mostrando payload criptografado e metadados da mensagem .....	57
Figura 37 – Smartphone com aplicativo ttnmapper utilizado nos testes de alcance e cobertura da plataforma piloto .....	58
Figura 38 – Mapa de cobertura da plataforma piloto obtido com o aplicativo ttnmapper .....	58
Figura 39 – Mapa de cobertura da rede LoRaWAN instalada na UFSM.....	59
Figura 40 – Mapa com as posições do modem com variação da distância ao concentrador....	62
Figura 41 – RSSI média (a) e desvio-padrão (b), variando-se distância do endpoint ao concentrador e potência de transmissão com DR0 a 918,2 MHz .....	64
Figura 42 – SNR média (a) e desvio-padrão (b), variando-se distância do endpoint ao concentrador e potência de transmissão com DR0 a 918,2 MHz .....	65
Figura 43 – Disponibilidade média do modem transmitindo com potência de 4dBm, com ganho de antena de 2 dBi a 900 m de distância do concentrador em ambiente fechado.....	66
Figura 44 – Painel do servidor mostrando transmissões bem sucedidas até o concentrador com DR1 e DR2, mas atingindo o limite de 3 retransmissões por mensagem. Ganho de antena de 2 dBi a 900 m de distância do concentrador em ambiente fechado .....	67
Figura 45 – RSSI, nível de ruído e SNR de baixo para cima para uplink (marcados com ‘o’) e downlink (marcados em ‘x’). Legenda: No concentrador, RSSI em vermelho, ruído em preto e SNR em rosa. No modem, RSSI em azul, ruído em verde e SNR em amarelo.....	68
Figura 46 – RSSI do uplink (vermelho) e downlink (azul). Ganho da antena do modem: 2dBi .....	69
Figura 47 – RSSI do uplink (vermelho) e downlink (azul). Ganho da antena do modem: 9dBi .....	70
Figura 48 – SNR do uplink (rosa) e downlink (amarelo). Ganho da antena do modem: 2dBi	70
Figura 49 – SNR do uplink (rosa) e downlink (amarelo). Ganho da antena do modem: 9dBi	71
Figura 50 – Taxa de entrega de pacotes (verde) e média (vermelho). Ganho da antena do modem: 2dBi .....	72
Figura 51 – Taxa de entrega de pacotes (verde) e média (vermelho). Ganho da antena do modem: 9dBi. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das principais classes de ameaças .....	30
Tabela 2 – Requisitos de Terminais em Redes Elétricas Inteligentes .....	32
Tabela 3 – RF Mesh x LoRaWAN .....	33
Tabela 4 – Comparativo entre Tecnologias RF para REI.....	45
Tabela 5 – Orçamento Prévio LoRaWAN.....	50
Tabela 6 – Data Rates LoraWAN - parâmetros regionais australianos (AU915). .....	60
Tabela 7 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI a 352 metros do concentrador com variação da frequência de canal .....	63
Tabela 8 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI a 352 metros do concentrador variando-se a taxa de dados (data rate) .....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACK	–	<i>ACKNOWLEDGE</i>
ADMS	–	<i>Advanced Distribution Management System</i>
AMI	–	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
APN	–	<i>Access Point Name</i>
AT	–	Alta Tensão
BGAN	–	<i>Broadband Global Area Network</i>
BT	–	Baixa tensão
CBR	–	<i>Constant Bit Rate</i> - Taxa de bits contínua
COD	–	Centro de Operação da Distribuição
CORE	–	<i>Network core part</i> - Parte Central ou principal da rede
CPFL	–	Companhia Paulista de Força e Luz
CSS	–	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DA	–	<i>Distribution Automation System</i>
GIS	–	<i>Geographical Information System</i>
HAN	–	<i>Home Area Network</i>
IEEE	–	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IoT	–	<i>Internet of Things</i>
ITU-T	–	<i>International Telecommunication Union - Telecommunication Std. Sector</i>
LoRa	–	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	–	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWAN	–	<i>Low Power Wide Area Network</i>
M2M	–	<i>Machine-to-Machine</i>
MPLS	–	<i>MultiProtocol Label Switching</i>
MT	–	Média tensão
NAN	–	<i>Neighborhood Area Network</i>
ONS	–	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&D	–	Pesquisa e Desenvolvimento
PMU	–	<i>Power Meter Unit</i>
PRODIST	–	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
REI	–	Redes Elétricas Inteligentes
RF	–	<i>Radio frequency</i> - Frequência de Rádio
RGE	–	Rio Grande Energia
RSSI	–	Intensidade de sinal recebido
SCADA	–	Sistemas de Controle Supervisório e Aquisição de Dados
SNR	–	Relação sinal-ruído
TIT	–	Tecnologias da Informação e Telecomunicações
UBR	–	<i>Unspecified Bit Rate</i> - Taxa de bits não especificada ou não contínua
UTCAL	–	<i>Utilities Telecom Council America Latina</i>
VSAT	–	Very Small Aperture Terminal
WAN	–	Wide Area Network

## SUMÁRIO

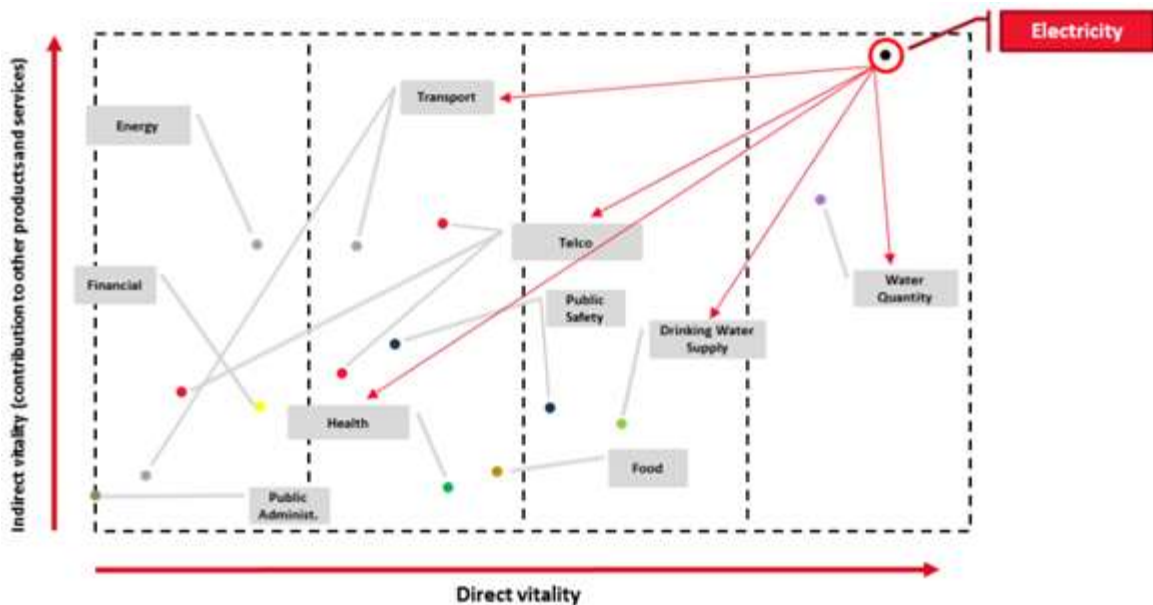
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	16
1.2	OBJETIVOS GERAIS .....	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	17
<b>2</b>	<b>DEFINIÇÃO DE COMUNICAÇÃO PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES</b> .....	18
2.1	REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES (REI) OU <i>SMART GRID</i> .....	18
2.2	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA REI.....	19
2.3	LoRA e LoRaWAN.....	22
<b>2.3.1</b>	<b>LoRa</b> .....	22
<b>2.3.2</b>	<b>LoRaWAN</b> .....	24
2.4	SEGURANÇA CIBERNÉTICA .....	28
2.5	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.6	ESTUDOS DE CASO .....	33
<b>2.6.1</b>	<b>Estudo de Caso AES Eletropaulo</b> .....	35
<b>2.6.2</b>	<b>Estudo de Caso CPFL Paulista</b> .....	36
<b>2.6.3</b>	<b>Estudo de Caso Ergon Energy</b> .....	38
<b>2.6.4</b>	<b>Outros Cases</b> .....	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO EM REI RURAL</b> .....	41
3.1	DEFINIR A ÁREA DO PROJETO DE ACESSO RF (NAN E HAN) .....	41
3.2	DEFINIÇÃO DO PROTOCOLO E FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO.....	45
3.3	PREDIÇÃO E DEFINIÇÃO DE CONCENTRADORES .....	46
3.4	DEFINIÇÃO DO CORE DA REDE.....	48
3.5	CONCLUSÃO DA ARQUITETURA .....	49
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	50
4.1	PROPOSTAS COMERCIAIS RECEBIDAS E DEFINIÇÃO DE CONTINUIDADE .....	50
4.2	IMPLANTAÇÃO DE PILOTO REDE LORAWAN NO CAMPUS UFSM – CAMOBI.....	51
<b>4.2.1</b>	<b>Configuração e operação dos servidores de rede e aplicação (Network Server/App Server)</b> .....	53
<b>4.2.2</b>	<b>Configuração de modem do terminal LoRaWAN</b> .....	54
<b>4.2.3</b>	<b>Experimentos de comunicação <i>downlink</i> e <i>uplink</i> com terminal LoRaWAN</b> .....	56
<b>4.2.4</b>	<b>Experimentos de alcance e cobertura da rede LoRaWAN</b> .....	58
4.3	TESTES EXPERIMENTAIS PILOTO REDE LORAWAN NO CAMPUS UFSM – CAMOBI.....	59
<b>4.3.1</b>	<b>Metodologia experimental</b> .....	59
<b>4.3.2</b>	<b>Experimento 1: intensidade de sinal e razão sinal-ruído</b> .....	61
<b>4.3.3</b>	<b>Experimento 2: desempenho da comunicação – disponibilidade e confiabilidade</b> .....	65
<b>4.3.4</b>	<b>Avaliação dos resultados</b> .....	73

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	74
5.1	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO .....	75
5.2	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE .....	75
5.3	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO .....	76
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	78
	<b>ANEXO - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÃO UTILIZANDO TECNOLOGIA LoRaWAN</b> .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

Como a rede de energia elétrica convencional passa por um processo de forte transformação a partir da instalação dos recursos energéticos distribuídos, automação e fluxo de dados, há a necessidade de implantar uma infraestrutura de medição e controle avançada, permitindo o alto tráfego de informações, medições e atuações em tempo real. Como exemplos das mudanças verificadas nos sistemas de distribuição tem-se a participação da medição inteligente, necessidade de programar a resposta à demanda, bem como a adaptação da geração distribuída e armazenamento de energia elétrica (COCHENOUR, 2014).

Figura 1 – Dependência e impacto potencial de diversas infraestruturas críticas



Fonte: (LUIIJF, 2002).

Neste contexto, onde os serviços públicos de infraestruturas críticas estão sob crescente regulação e pressão para maximizar a utilização da rede de eletricidade e fornecer confiabilidade, faz-se necessária não apenas uma ferramenta que integre todos os dados, que faça a análise e possa tomar decisões em tempo real, mas também se deve avaliar o tipo de comunicação mais adequado para cada aplicação na gestão dessa infraestrutura.

No desenvolvimento desta dissertação, foram investigados diferentes requisitos de rede de comunicação para redes elétricas inteligentes, desde as usadas em medidores e serviços aos consumidores, definidas como Rede de Área Residencial (*Home Area Network - HAN*), além dos serviços de automação e controle de rede de distribuição contidos na Rede de



Área de Vizinhança (*Neighborhood Area Network* - NAN) e a Rede de Área Ampla (*Wide Area Network* - WAN).

Com base em uma variedade de estudos já realizados dentro do Programa Brasileiro de Redes Inteligentes (parte integrante do P&D-ANEEL), em melhores práticas de outros projetos internacionais, da ITU-T e IEEE, buscou-se definir a arquitetura de comunicação e tecnologia de informação mais indicada para aplicação em ambientes de Redes Elétricas Inteligentes no meio rural (SOARES E SILVA, et al., 2016).

O projeto de Redes Elétricas Inteligentes da empresa RGE Sul foi idealizado em área rural pelo ineditismo e peculiaridade de operação de clientes rurais irrigantes do grupo A (demanda superior a 112 kVA), presentes na região da subestação URU-2.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A motivação e justificativa desta dissertação vão de encontro com a necessidade do desenvolvimento e implantação de sistemas de comunicação em Redes Elétricas Inteligentes para áreas rurais e de baixa densidade. A comunicação com sensores, atuadores e demais elementos industriais pode também ser explorada em outros mercados ou demandas por qualquer sistema de comunicação com Internet das Coisas (IoT). O desenvolvimento de um sistema de comunicação aberto, adequado às necessidades dos dispositivos envolvidos e com um custo baixo de projeto e implantação foi a principal motivação para o desenvolvimento desta dissertação.

A defasagem da tecnologia de comunicação em indústrias onde telecomunicação não é a atividade fim, ou é uma área de apoio dentro da empresa, também foi um grande motivador.

Neste contexto da importância da comunicação em REI, o uso do protocolo de comunicação LPWAN-LoRA para o atendimento de última milha para tele medição e com proposta de avanço para redes de automação justifica-se no desenvolvimento da dissertação.

Sistema de comunicação desejado:

- Longo alcance;
- Baixo consumo de energia;
- Baixo custo;
- Alta replicabilidade;
- Segurança;
- Protocolos abertos;
- Espectro sem necessidade de licenciamento.

## 1.2 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo do trabalho foi de desenvolver um sistema de comunicação de redes elétricas inteligentes em área rural ou de baixa densidade, utilizando-se comunicação sem fio a partir do uso do protocolo de comunicação LPWAN-LoRA.

Como objetivos específicos podem ser citados:

- Definição de escopo de atendimento e soluções de acesso;
- Predição dos pontos de atendimento;
- Definição de infraestrutura vertical e pontos de atendimento MPLS a serem solicitados;
- Projeto e implantação de piloto com soluções possíveis;
- Projeto e implantação da solução de comunicação do projeto de REI em URU2;
- Testes de terminais: Medição (Grupos A e B\*), Automação de distribuição e outros elementos de redes inteligentes.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta Dissertação está organizada em cinco capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada introdução, motivação, justificativa, objetivos gerais do trabalho e como ele está organizado.

O Capítulo 2 apresenta a definição de redes elétricas inteligentes e a fundamentação teórica que sustenta a dissertação e trabalhos relacionados de outras empresas de energia elétrica estudados para concepção da metodologia e definição de protocolo.

O Capítulo 3 apresenta o método utilizado para seleção do sistema de comunicação e como deve ser feita a implantação desse sistema.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento prático do trabalho, a implantação do piloto e os resultados dos testes realizados nesse piloto.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões, sugestões para continuidade do trabalho e as publicações realizadas no decorrer do curso de Mestrado.

Ao final são apresentadas as referências utilizadas para a realização deste trabalho e um anexo com a especificação técnica base para a licitação do sistema.

## 2 DEFINIÇÃO DE COMUNICAÇÃO PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Este capítulo tem por objetivo apresentar o conceito de redes elétricas inteligentes (REI) e como o sistema de comunicações é um item de extrema importância quando se trata da implantação física de REI.

### 2.1 REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES (REI) OU *SMART GRID*

As Redes Elétricas Inteligentes (REI) ou *Smart Grid* são conceituadas basicamente como a tecnologia digital que permite a comunicação de duas vias entre a concessionária e seus clientes e entre os dispositivos instalados na rede elétrica e o Centro de Controle. Na figura 1 temos uma ideia do conjunto de serviços em cada setor de uma REI (MME, 2010).

Figura 2 – Redes Elétricas Inteligentes – Aplicações em Concessionária de Energia



Fonte: (MME, 2010).

Existem várias definições para o conceito de redes inteligentes, mas todas convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes que transportam a energia. Esses elementos possibilitam o envio de uma gama de dados e informação para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e controle do sistema como um todo (MME, 2010).

Para se colocar em prática tal conceito, algumas transformações devem ser levadas a cabo, como a modernização da infraestrutura, instalação de camadas digitais, como softwares

e capacidade de processamento de dados, que são a essência da rede inteligente, e mudanças na comercialização, necessárias para ampliar o número de acessos.

As primeiras tentativas de se instalar alguma inteligência na rede advieram da medição eletrônica, que foi usada para monitorar o comportamento da carga de grandes consumidores. Com a instalação de equipamentos de comunicação, esses medidores iriam proporcionar o monitoramento em tempo real e o uso de aplicativos para a resposta de demanda. No início de 2000, um projeto desenvolvido na Itália para a larga instalação de medição eletrônica, chamado de *Telegestore Project*, previu a utilização de cerca de 27 milhões de medidores eletrônicos com capacidade para comunicação via PLC – *Power Line Communications*, que é transmissão de dados via cabo de energia (MME, 2010).

Para a modernização da rede, alguns conceitos devem estar associados:

- Confiabilidade;
- Eficiência;
- Segurança;
- Questões ambientais;
- Competitividade.

As principais funções requeridas em uma rede inteligente são:

- Auto recuperação;
- Motivar consumidores a serem mais participativos;
- Resistir a ataques físicos e cibernéticos;
- Fornecer uma energia de melhor qualidade;
- Permitir vários tipos de geração e armazenagem de energia;
- Maior envolvimento do mercado;
- Permitir uma maior utilização de geração intermitente de energia.

Com a introdução de sensores e controles automatizados, a rede poderá ser capaz de antecipar, detectar e resolver problemas no sistema. Assim, podem-se evitar ou mitigar faltas de energia, problemas na qualidade do serviço e suas interrupções.

## 2.2 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO PARA REI

O sistema de comunicação é a componente chave da infraestrutura de rede elétrica inteligente. Conforme ilustrado na figura 3, todas as iniciativas em REI passam por uma infraestrutura de comunicação.

Com a integração de tecnologias e aplicativos avançados para obter uma infraestrutura de rede elétrica mais inteligente, uma enorme quantidade de dados de diferentes aplicativos será gerada para análise adicional, controle e métodos de precificação em tempo real.

Portanto, é muito importante que as concessionárias de energia elétrica definam os requisitos de comunicação e encontrem a melhor infraestrutura de comunicações para manipular os dados de saída e fornecer um serviço confiável, seguro e econômico em todo o sistema. As concessionárias de energia elétrica tentam chamar a atenção do cliente para participar do sistema de rede inteligente, a fim de melhorar os serviços e a eficiência. A gestão do lado da demanda e a participação do cliente para o uso eficiente da eletricidade são bem compreendidas, além disso, as interrupções após desastres na estrutura de energia existente também chamam a atenção para a importância da relação entre redes elétricas e sistemas de comunicação.

Figura 3 – Comunicações em Redes Elétrica Inteligentes



Fonte: (FALCÃO, 2009).

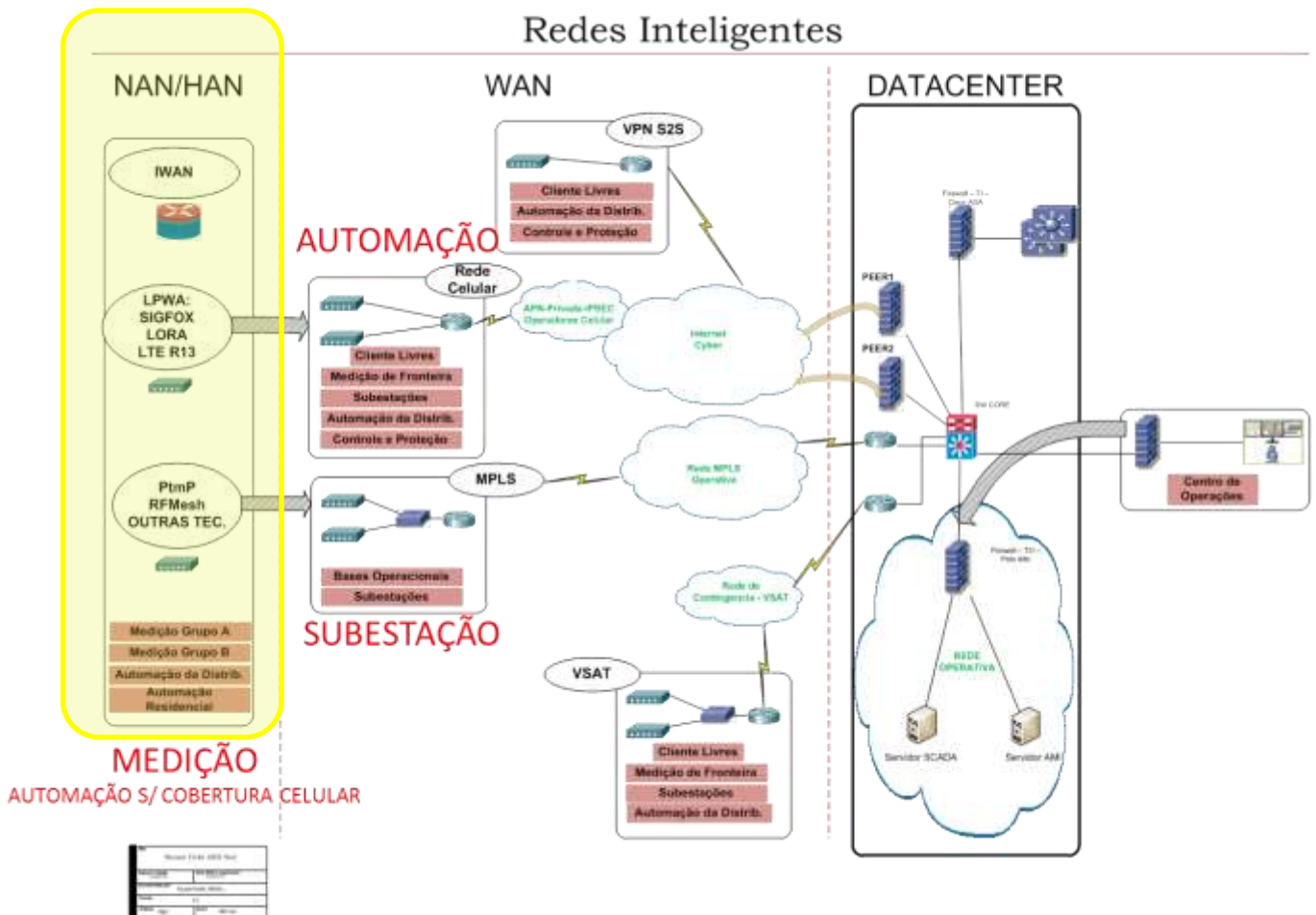
Diferentes tecnologias de comunicação são representadas por dois meios principais de comunicação: com e sem fio. Elas podem ser usadas para transmissão de dados entre medidores inteligentes e utilidades elétricas. Em alguns casos, as comunicações sem fio têm algumas vantagens sobre as tecnologias com fio, como infraestrutura de baixo custo e facilidade de conexão com áreas difíceis ou inacessíveis. No entanto, a natureza do caminho de transmissão pode causar a atenuação do sinal. Por outro lado, as soluções com fio não apresentam problemas de interferência e suas funções não dependem de baterias, como costuma acontecer com as soluções sem fio.

Basicamente, dois tipos de infraestruturas são necessários para o fluxo de informações em um sistema de rede inteligente. O primeiro fluxo é de sensores e aparelhos elétricos para medidores inteligentes, o segundo entre medidores inteligentes e os *datacenters* da concessionária. No entanto, existem fatores limitantes importantes que devem ser levados em conta no processo de implantação de medição inteligente, como tempo de implantação, custos

operacionais, disponibilidade da tecnologia e ambiente (rural/urbano ou interno/externo, etc) (GÜNGÖR, 2011).

Dentro do ambiente de Tecnologia da Informação e Tecnologia da Operação da concessionária RGE Sul, várias tecnologias de comunicações são utilizadas: desde redes MPLS e VSAT no CORE, até redes celulares com APN e redes de RF proprietárias. (SOARES E SILVA, et al., 2016). Essa estrutura de comunicação complexa de uma concessionária de energia elétrica pode ser mais bem esclarecida na figura 4. A estrutura de WAN da empresa já está bem definida com concentradores já instalados em todas as subestações e bases operacionais. Apenas a última milha para alcançar todos os sensores e eventualmente uma rede de acesso, para alcançar os concentradores já disponíveis, devem ser implantadas. Essa rede e as opções estão destacadas na figura 4, como NAN/HAN.

Figura 4 – Sistema de Comunicação para TI e TO em uma Concessionária de Energia Brasileira



Fonte: Autor.

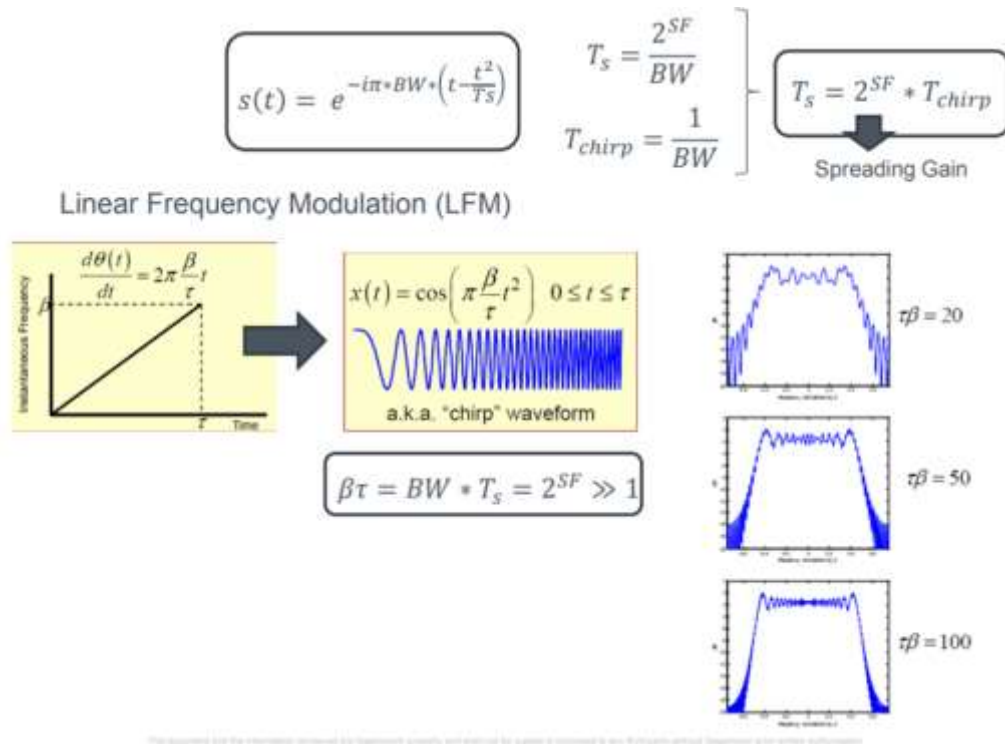
## 2.3 LoRA e LoRaWAN

Nesta seção será apresentada uma visão geral introdutória do protocolo LoRa e da rede LoRaWAN. As redes de baixa potência e de ampla área de cobertura (*Low Power Wide Area - LPWAN*) são projetadas para suportar a maior parte dos bilhões de dispositivos previstos como Internet das Coisas (IoT). LoRaWAN foi desenvolvido de baixo para cima para otimizar LPWAN com a vida útil da bateria, capacidade de transmissão de dados, banda e custo (LORA ALLIANCE, 2018).

### 2.3.1 LoRa

LoRa (*Long Range*) é a camada física ou a modulação sem fio utilizada para criar o link de comunicação de longo alcance. Muitos sistemas sem fio legados usam a modulação FSK (*Frequency Shifting Keying*) como camada física, porque é uma modulação muito eficiente para alcançar baixa potência. O LoRa é baseado na modulação do espectro de propagação chirp, que mantém as mesmas características de baixa potência que a modulação FSK, mas aumenta significativamente o alcance de comunicação. O Chirp *spread spectrum* (CSS) tem sido usado na comunicação militar e espacial há décadas, devido às longas distâncias de comunicação que podem ser alcançadas e a robustez à interferência, mas LoRa é a primeira implementação de baixo custo para uso comercial. Na figura 5 ilustramos os detalhes da modulação LoRa.

Figura 5 – Modulação de Lora – CSS



Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

LoRa herda suas propriedades da tecnologia RADAR e sua maturidade em Telecom a partir de IEEE 802.15.4a (WPAN).

A vantagem do LoRa está na capacidade de longo alcance da tecnologia na cobertura de RF. Um único concentrador ou estação base pode cobrir cidades inteiras ou centenas de quilômetros quadrados, segundo estudos de caso contidos no site de LoRa Alliance (LORA ALLIANCE, 2018). O alcance depende muito do ambiente ou de obstruções em um determinado local, mas o LoRa e o LoRaWAN têm um *link budget* maior do que qualquer outra tecnologia de comunicação padronizada. O *link budget*, geralmente dado em decibéis (dB), é o principal fator na determinação do alcance em um ambiente qualquer. Na figura 6 estão os mapas de cobertura da rede de uma operadora implantados na Bélgica. Com uma quantidade mínima de infraestrutura, países inteiros podem ser facilmente cobertos (LORA ALLIANCE, 2018).



Figura 6 – Rede de uma Operadora LoRaWAN

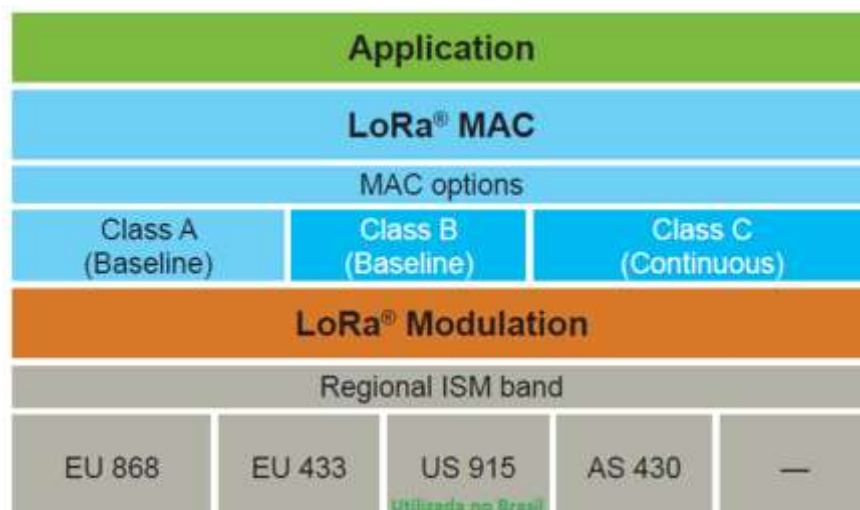


Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

### 2.3.2 LoRaWAN

LoRaWAN define o protocolo de comunicação e a arquitetura do sistema para essa rede, conforme a figura 7, enquanto a camada física LoRa permite que o link de comunicação tenha longo alcance. O protocolo e a arquitetura de rede têm mais influência na determinação da vida útil da bateria de um nó, na capacidade da rede, na qualidade do serviço, na segurança da informação e na variedade de aplicativos atendidos por essa rede.

Figura 7 – Arquitetura do Protocolo LoRa

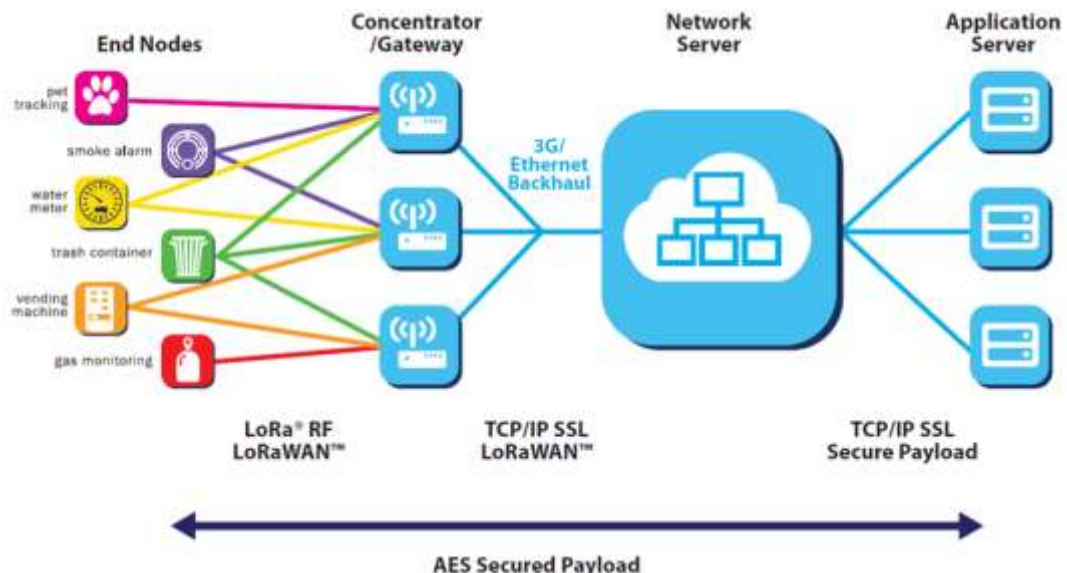


Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

Muitas redes implantadas para REI utilizam uma arquitetura de rede em malha (*RF Mesh*). Em uma rede de malha, os nós finais individuais encaminham as informações de outros nós para aumentar o espectro de comunicação e o tamanho da célula da rede. Embora isso aumente a banda, também aumenta a complexidade, reduz a capacidade da rede e reduz o tempo de vida da bateria à medida que os nós recebem e encaminham informações de outros nós, que provavelmente são irrelevantes para eles.

A arquitetura em estrela de longo alcance é melhor para preservar a vida útil da bateria quando a conectividade puder ser alcançada. LoRaWAN utiliza basicamente a topologia em estrela.

Figura 8 – Elementos de uma rede LoRaWAN



Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

Conforme pode ser observado na figura 8, em uma rede LoRaWAN os nós não estão associados a um concentrador específico. Em vez disso, os dados transmitidos por um nó são normalmente recebidos por vários concentradores. Cada concentrador encaminhará o pacote recebido do nó final para o servidor de rede baseado em nuvem por meio de algum *backhaul* (celular, Ethernet, satélite, Wi-Fi).

A inteligência e a complexidade são transferidas para o servidor de rede, que gerencia a rede e filtrará os pacotes recebidos redundantes, executará verificações de segurança, agendará confirmações por meio do concentrador ideal e executará taxas de dados adaptáveis. Se um nó for móvel ou em movimento, nenhum *handover* é necessário ao se registrar em um

novo concentrador, que é um recurso essencial para ativar aplicativos de rastreamento de ativos - um aplicativo de destino principal vertical para IoT.

Os nós de uma rede LoRaWAN são assíncronos e se comunicam quando têm dados prontos para enviar, sejam eles controlados por eventos ou agendados. Esse tipo de protocolo é baseado no método Aloha, com uma eficiência muito mais em LoRaWAN, versus *pure Aloha* (HAXHIBEQIRI, 2017). Em uma em malha ou síncrona, como celular, os nós frequentemente precisam "acordar" para sincronizar com a rede e verificar se há mensagens.

Essa sincronização consome muita energia e é o principal motivo para redução da vida útil da bateria. Em um estudo recente e comparação feita pela GSMA sobre as várias tecnologias LPWAN, o LoRaWAN mostrou uma vantagem de 3 a 5 maior no item de vida útil da bateria, quando comparado a outras tecnologias LPWAN (LORA ALLIANCE, 2018).

Para viabilizar uma rede em topologia estrela de longo alcance, o concentrador deve ter uma capacidade muito alta de receber mensagens de um volume muito grande de nós (dispositivos). A alta capacidade de uma rede LoRaWAN é obtida utilizando uma taxa de dados adaptável e usando um transceptor multicanal no concentrador para que as mensagens simultâneas em múltiplos canais possam ser recebidas.

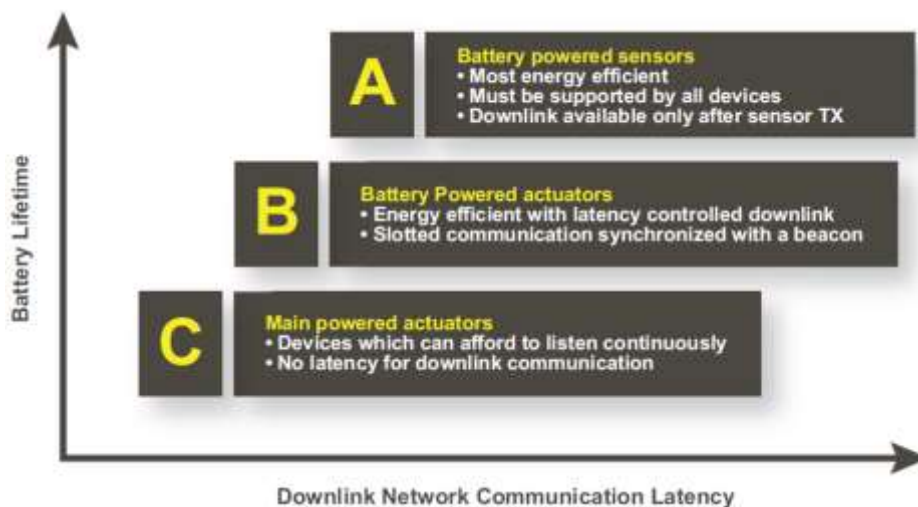
Os fatores críticos que afetam a capacidade são: o número de canais simultâneos, taxa de dados, o tamanho do *payload* e com que frequência as informações dos nós são transmitidos. Como LoRa utiliza *spread spectrum*, os sinais são praticamente ortogonais entre si quando diferentes fatores de espalhamento são utilizados. À medida que o fator de propagação muda, a taxa de dados efetiva também muda.

O concentrador aproveita essa propriedade, sendo capaz de receber várias taxas de dados diferentes no mesmo canal ao mesmo tempo. Se um nó tiver um bom link e estiver próximo a um concentrador, não haverá motivo para usar sempre a menor taxa de dados e preencher o espectro disponível por mais tempo do que o necessário. Deslocando a taxa de dados para cima, o tempo no ar é encurtado, abrindo mais espaço em potencial para que outros nós transmitam. A taxa de dados adaptativa também aperfeiçoa a vida útil da bateria.

Esses recursos permitem que uma rede LoRaWAN tenha uma capacidade muito alta e torne a rede escalável. Uma rede pode ser implantada com uma infraestrutura mínima e, quando necessário, mais concentradores podem ser adicionados, alterando as taxas de dados e reduzindo a latência em outros concentradores. Outras alternativas de LPWAN não possuem a escalabilidade do LoRaWAN devido a defasagem tecnológica, que limitam a capacidade de *downlink* ou tornam o alcance de *downlink* assimétrico à faixa de *uplink* (LORA ALLIANCE, 2018).

Os terminais devem atender a diferentes aplicações e possuem requisitos diferentes de rede. Para aperfeiçoar uma variedade de perfis de aplicativos finais, LoRaWAN utiliza diferentes classes de dispositivos, conforme ilustrado na figura 9. As classes de dispositivos alternam a latência de comunicação de *downlink* da rede com a duração da bateria. Em uma aplicação de controle ou atuação, a latência da comunicação de *downlink* é um fator muito importante.

Figura 9 – Classes de Dispositivos para LoRaWAN



Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

Os dispositivos de Classe A permitem comunicações bidirecionais, em que a transmissão de *uplink* de cada dispositivo é seguida por duas janelas curtas de recebimento de *downlink*. O slot de transmissão programado pelo dispositivo é baseado em suas próprias necessidades de comunicação com uma pequena variação baseada em uma base de tempo aleatório (como no protocolo ALOHA). O dispositivo de Classe A é o dispositivo com menor consumo de energia para aplicações que exigem apenas comunicação de *downlink* do servidor logo após o dispositivo final ter enviado uma transmissão de *uplink*. Comunicações de *downlink* do servidor em qualquer outro momento terão que esperar até o próximo *uplink* agendado. Essa classe é tipicamente utilizada em sensores em geral, onde as medições são armazenadas em algum sistema de aquisição de dados e atualizadas nos agendamentos. Em Medição Inteligente (AMI) sem sistema de corte integrado, podemos utilizar a comunicação por dispositivos de Classe A.

Os dispositivos bidirecionais com slots de recebimento programados são os denominados de Classe B. Além das janelas de recebimento aleatório da Classe A, os

dispositivos de Classe B abrem janelas de recebimento extra em horários programados. Para que o dispositivo abra sua janela de recebimento no horário agendado, ele recebe um sinal, sincronizado no tempo, do concentrador. Isso permite que o servidor saiba quando o dispositivo está escutando. Essa classe pode ser usada em atuadores simples sem necessitar de atuação em tempo real, como medidor inteligente com corte, por exemplo.

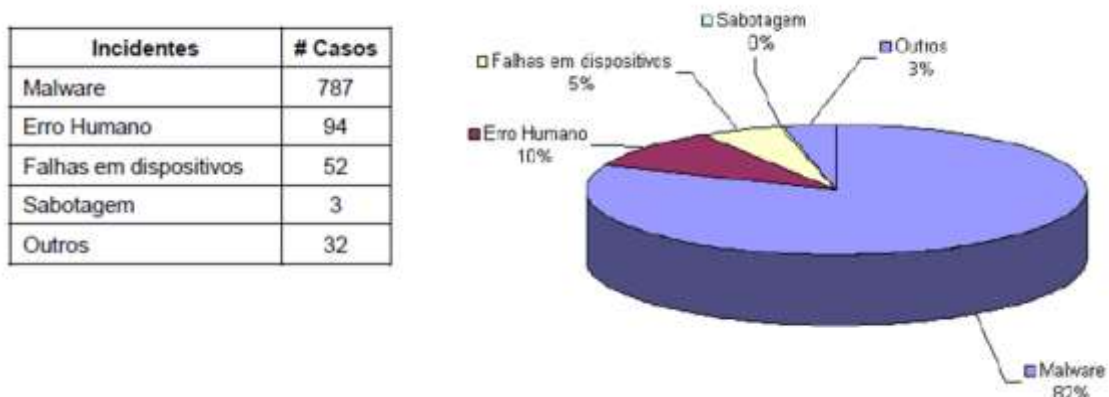
Dispositivos bidirecionais, denominados de Classe C. Esses dispositivos têm quase que continuamente abertas as janelas de recepção de informação, fechadas somente durante a transmissão. Como exemplo de aplicação, seria para atuadores, automação de distribuição (DA) ou qualquer outra comunicação com dispositivos em tempo real, com taxas de até 50 kbps.

## 2.4 SEGURANÇA CIBERNÉTICA

Para que as redes inteligentes possam trazer benefícios sem colocar em risco vidas, nem a infraestrutura da distribuidora, devemos prover a arquitetura de comunicação respeitando as mais rigorosas regras de *cybersecurity* (segurança cibernética).

Dados comprovam que incidentes cibernéticos a indústrias e concessionárias de energia, água e gás do mundo e do Brasil vem crescendo de maneira vertiginosa, e a grande maioria desses incidentes são causados por softwares maliciosos.

Figura 10 – Incidentes de Segurança Cibernética em Indústrias Brasileiras



Fonte: (TISAFE, 2016).

Devido à criticidade dos elementos gerenciados pelas Redes Elétricas Inteligentes, ameaças e possíveis vulnerabilidades devem ser elencadas de forma a quantificar o risco e as

consequências que representam para o sistema. Desta forma, um modelo genérico de avaliação de risco pode ser dado pela equação abaixo (NIST, 2014):

$$\text{Risco} = \text{Ameaça (a)} \times \text{Vulnerabilidade (b)} \times \text{Consequência (c)}$$

Onde:

(a) Ameaça: representam potenciais eventos, atores e ações cuja presença poderá acarretar algum tipo de avaria no sistema;

(b) Vulnerabilidade: representam as fraquezas que podem ser exploradas pelas diferentes ameaças presentes; e

(c) Consequência: representam os resultados de uma vulnerabilidade explorada, quanto do sistema será degradado e quais as consequências na sinergia com outros sistemas, inclusive considerando o efeito cascata que pode ocorrer.

Desta forma, a segurança de uma REI deve considerar os principais atores no sistema, junto a suas ações e as vulnerabilidades presentes no sistema que podem ser exploradas por um adversário (RIZZETTI, 2018).

A tabela 1 apresenta o resumo das principais classes de ameaças.

Tabela 1 - Resumo das principais classes de ameaças

	<b>Ameaças</b>	<b>Consequências</b>	<b>Contramedidas</b>
Integridade	Adulteração de dados na rede de comunicação.	Perda de informações.	Hash criptográfico.
		Comprometer qualquer das aplicações da REI.	
Confidencialidade	Espionagem na rede. Roubo de informações.	Causar vulnerabilidades a serem exploradas por todas as outras ameaças.	Encriptação.
		Comprometer a privacidade.	
Disponibilidade	Inundação do dispositivo ou rede com solicitações e dados falsos. Isolamento da máquina por ataques de DNS.	Perda de informações. Ex.: obter informações pessoais da HAN dos clientes.	Redundância. Firewalls para filtragem de mensagens. Descarte de mensagens indevidas utilizando o menor processamento possível.
		Interrupção da rede ou serviços.	
Autenticação	Personificação de usuário legítimos. Falsificação de dados.	Degradação do desempenho da aplicação ou rede de comunicação.	Técnicas criptográficas: MAC, assinatura digital, certificados digitais, filtros.
		As aplicações com baixa tolerância a latência são seriamente afetadas: Ex.: PMU.	
		Má apresentação do usuário.	
		Presumir validade em informações falsas.	
		Ex.: Medidor inteligente informando dados errados, causando prejuízos financeiros.	

Fonte: (RIZZETTI, 2018).

As principais regras a serem adotadas para segurança cibernética são:

- Segregação de redes operativas e corporativas da distribuidora;
- Investimento em dispositivos de segurança de rede no datacenter, ex.: Firewalls corporativos e operativos, filtro de conteúdo, servidores de autenticação ex.: Radius.
- Gestão de elementos de rede;
- Segregação da Internet;
- Atualização e gestão das aplicações SCADA e AMI.





Para WAN procuramos manter as soluções presentes nas redes operativa e corporativa da concessionária, já para NAN e HAN optamos por definir uma ou várias soluções de RF partindo de um concentrador de rede conectado a WAN. A solução de estrutura radial é mais fácil de desenhar e manter em relação a uma solução em malha.

Também segundo Kuzlu (2014), uma rede LPWA de baixo custo se faz fundamental pela quantidade de dispositivos conectados numa REI, se levarmos em consideração todas as possibilidades de serviços possíveis em uma REI.

Tabela 2 – Requisitos de Terminais em Redes Elétricas Inteligentes

Aplicação	Tamanho típico do dado (bytes)	Amostragem típica	Latência	Disponibilidade (%)	WAN, NAN ou HAN
Automação Residencial	10-100	UBR - Amostra variável e configurável (Ex.: a cada 1min, 15min, etc...)	segundos	>98	HAN
Automação Comercial	>100	UBR - Amostra variável e configurável (Ex.: a cada 1min, 15min, etc...)	segundos	>98	HAN
Leitura de Medição	1600-2400	UBR - 4 a 6 amostras diárias para grupo B e 24 amostras diárias para grupo A	<4h	>98	NAN
Atualização de Tarifa (Utilite - Medidor)	100	UBR - de 2 a 6 amostras por dia	<1min	>98	NAN
Serviços de Energia Elétrica Pré Paga	50-150	UBR - 25 amostras por medidor pré pago por mês	<30s	>98	NAN
Resposta à Demanda - Controle de Carga Direta da utilite ao cliente (Aplicação Inteligente, Veículo Elétrico, etc...)	100	UBR - Um por device por requisição	<1min	>99,5	NAN
Automação da Distribuição - Sistema de distribuição, monitoramento e dados de manutenção de campo	100-1000	UBR - Amostras variadas por aplicação	<5s	>99,5	NAN/WAN
Automação da Distribuição - Controle VOLT/VAR	150-250	UBR - Amostras variadas por aplicação	<5s	>99,5	NAN/WAN
Automação da Distribuição - Reposta à Demanda do sistema de distribuição	150-250	UBR - Amostras variadas por aplicação	<4s	>99,5	NAN/WAN
Automação da Distribuição - Detecção de Falhas	25	UBR - Uma amostra por device por evento	<5s	>99,5	NAN/WAN
Gestão de Interrupção e Restauração	25	UBR - Uma amostra por medida de perda de potência ou retorno	<20s	>98	NAN/WAN
Sistema de Armazenamento de Energia do Cliente	25	UBR - 2 a 6 por período de despacho por dia	<5s	>99,5	NAN/WAN
Veículo Elétrico	100-255	UBR - 2 a 4 por Veículo por dia	<15s	>98	NAN/WAN
Upgrade de FW de devices de rede inteligente	25k-2000k	UBR - 1 por device por evento de broadcast	<2min	>99	NAN/WAN
Mensagens a Clientes e administração de rede inteligente	25-200	UBR - quando necessário	<20s	>98	NAN/WAN

Fonte: Adaptado de (KUZLU, 2014).

Na comparação entre a rede LoRaWAN e RF Mesh, segundo Schroder, Pissolato e Moreli (2016) a rede LoRaWAN tem um custo por terminal até 7 vezes menor que na tecnologia em malha com a agregação de até 150% mais dispositivos por concentrador conforme a tabela 3. Soma-se a isso ainda o nível de maturidade da tecnologia LoRaWAN no Brasil, ao contrário da tecnologia 5G para IoT está prevista para 2020.

Tabela 3 – RF Mesh x LoRaWAN

<b>RF Mesh x LoRaWAN</b>		
<b>Topology</b>	<b>RF Mesh Mesh</b>	<b>LoRaWAN Star</b>
Maximum Data Rate per Terminal	10-100 kbps	50 kbps
Average Latency	700 ms per hop (recommended up to 3 hops)	1 s
Maximum Aggregation per Concentrator	10,000 terminals	15,000 terminals
Outdoor RF Concentrator Average Cost per Terminal	US\$ 0,50	US\$ 0,07
Technology Maturity Level	S.G: Established IoT: In development	In positioning
Mobility of Endpoints	Possible with restrictions	Possible

Fonte: (SCHRODER, PISSOLATO e MORELI, 2016).

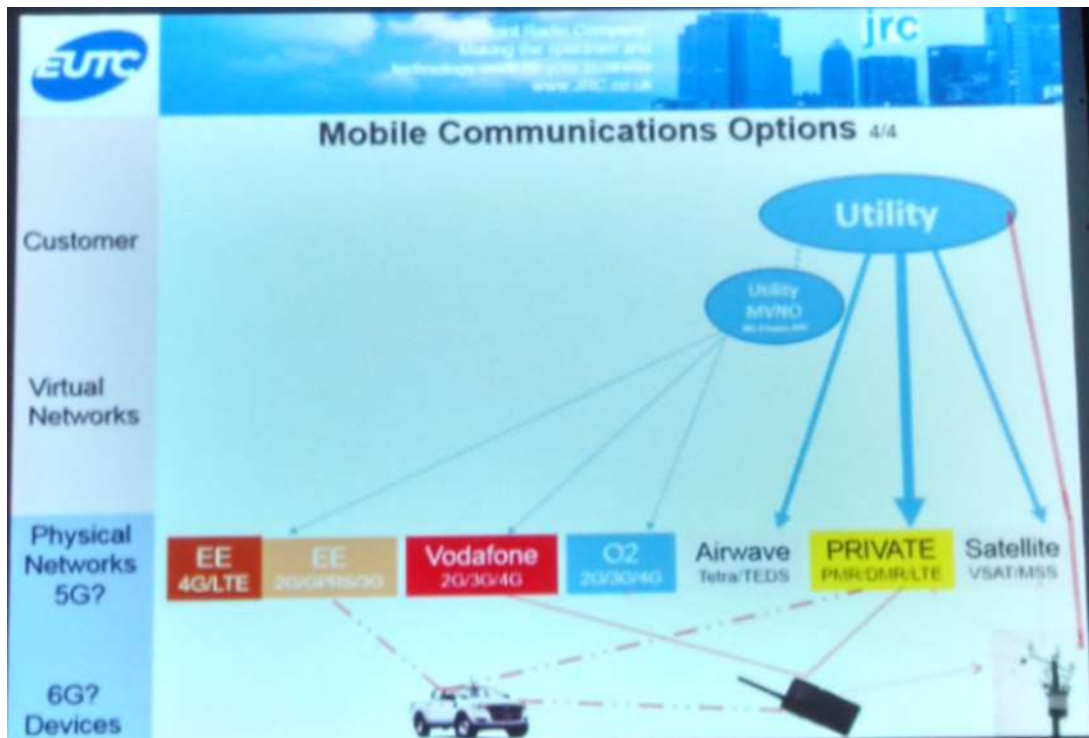
Em testes comparativos com outras tecnologias de RF como FSK atestado por Sanchez-Gomez, Iborra e Skarmeta (2017), o CSS de LoRaWAN se mostrou mais resistente a quedas ou retransmissões e alcançou terminais mais distantes. Em uma área rural se mostra uma tecnologia vantajosa em relação às outras. Com longo alcance (em torno de 20 km para dispositivos Classe A), seguro e podendo chegar a 50 kbps de taxa de dados, suficiente para comunicação com servidores de um REI.

## 2.6 ESTUDOS DE CASO

Em UTCAL (2017) foi verificado que para utilização dos recursos investidos na concessionária de maneira eficiente e com curto prazo de execução, com custos baixos, deve-se maximizar a utilização de conectividade já disponível na infraestrutura de Telecom da concessionária, estrutura corporativa e operativa podem cursar caminhos físicos semelhantes com a segregação e segurança sendo aplicados na camada lógica.

O Case da Joint Radio Company (JRC) - (National Grid (UK) plc e UK Energy Networks Association Ltd), apresentado em UTCAL (2017) na figura 12. Foi utilizada rede de telefonia celular de operadoras locais (várias) além de rede proprietária 3GPP (LTE) entre outras.

Figura 12 – Solução LTE para comunicação de REI da JRC UK



Fonte: (UTCAL, 2017).

Equipamentos para construção de uma rede proprietária LTE têm valores elevados para o mercado brasileiro. A polícia militar do distrito federal implantou uma rede LTE para cobertura de todo o Distrito Federal do Brasil, uma área de aproximadamente 5.800 km<sup>2</sup> (um pouco maior que os 4.200 da área de estudo). Foram implantados 40 pontos concentradores em 700 MHz para transmissão de voz, vídeo e dados a um custo de aproximadamente 115 milhões de reais (HUAWEIELTE, 2019).

Durante a concepção desta dissertação, informações de três projetos similares foram avaliadas. O primeiro caso é o da AES Eletropaulo, que era empresa do grupo AES, quando esse projeto P&D começou. O segundo do grupo CPFL, empresa que comprou a AES Sul, que teve o nome alterado para RGE Sul e mais recentemente apenas RGE. O último caso da Ergon Energy, empresa australiana com uma grande área de concessão com baixa densidade demográfica no estado de Queensland, no nordeste da Austrália, utilizando LoRaWAN.

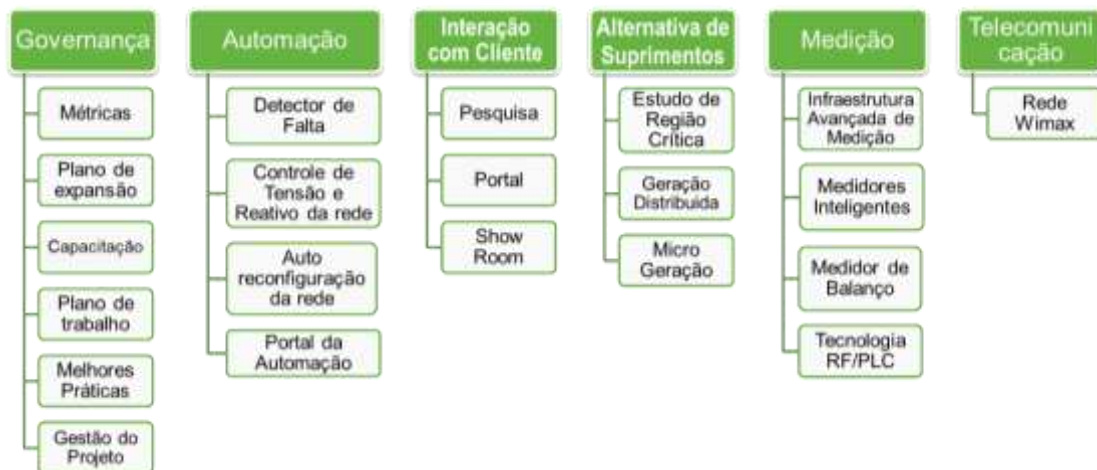
### 2.6.1 Estudo de Caso AES Eletropaulo

A empresa AES Eletropaulo, atualmente chamada de ENEL Distribuição São Paulo, atende a região metropolitana e capital do estado de São Paulo, a Grande São Paulo. A concessionária atende mais de 17 milhões de pessoas, 91% dos clientes estão localizados em 28% da área de concessão, o que significa 4.600 clientes por km<sup>2</sup>.

O projeto P&D da companhia foi iniciado com a chamada pública nº 011/2010 da ANEEL, de julho de 2010, denominado “Projeto Estratégico de P&D - Programa Brasileiro de Redes Inteligentes”. Um projeto com orçamento de aproximadamente 75 milhões de reais.

A área escolhida pela companhia compreendia a cidade de Barueri-SP, por apresentar características peculiares a toda área de concessão da companhia.

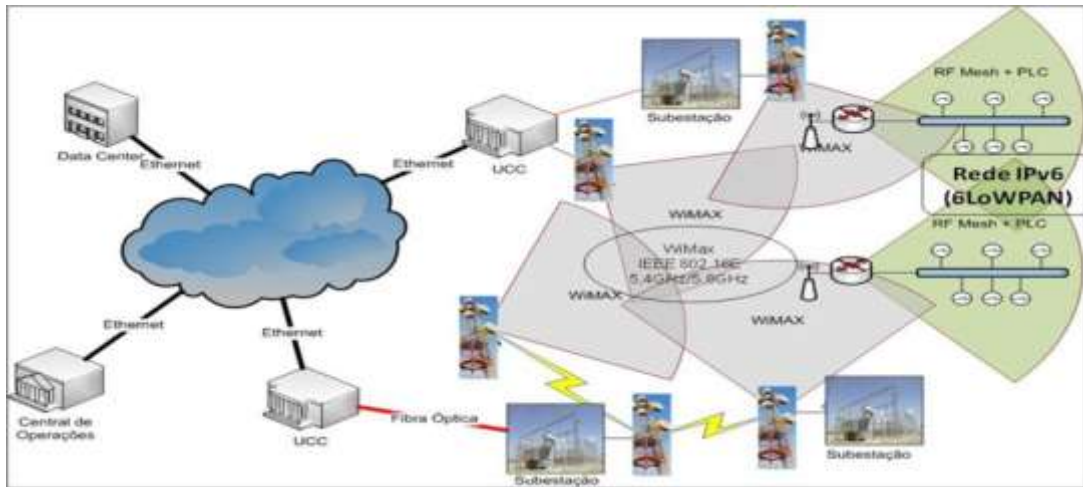
Figura 13 – Projeto Redes Inteligentes Eletropaulo – Estrutura



Fonte: (UTCAL, 2016).

Podemos observar na figura 13 que a vertical de Telecomunicações do projeto contemplava a comunicação utilizando redes Wimax. Essa foi uma tecnologia proposta no início das prospecções de espectro para comunicações para redes elétricas inteligentes por estudos e especialistas. A rede Wimax não vingou comercialmente para as operadoras de Telecom no espectro licenciado de 3,5 GHz, no projeto da Eletropaulo foram utilizados 5,4 GHz e 5,8 GHz não licenciados. Na figura 14 verificamos que o *backhaul* consistia numa rede contingenciada RFMesh + PLC utilizando protocolo 6LoWPAN. A empresa Cisco foi o principal parceiro de comunicações nesse projeto. Não existiam dados disponíveis de desempenho dessa rede.

Figura 14 – Projeto Redes Inteligentes Eletropaulo - Bloco de Telecom (Infraestrutura)



Fonte: (UTCAL, 2016).

Esse projeto foi importante para definição do projeto da AES Sul, na época, pois foi excluída a solução de rádio adotada e buscada uma solução de *backhaul* semelhante por utilizar TCP/IP, porém mais modestas do ponto de vista de estrutura de redes consequentemente uma solução bem mais vantajosa do ponto de vista econômico.

## 2.6.2 Estudo de Caso CPFL Paulista

A CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz), maior conglomerado de distribuição de energia elétrica do país, teve seu início em 2013, em uma parceria com a empresa norte americana Silver Spring Networks.

De 2013 a 2016 a empresa trabalhou com o seguinte escopo para redes elétricas inteligentes:

- Tele medição Grupo A: 23 mil clientes;
- Criação do Centro Inteligente de Medição;
- Tele medição Grupo B: 700 clientes com corte/religa;
- Automação: 45 Religadores (Copa do Mundo);
- Expansão Automação: + 595 Religadores;
- Expansão Telem. Grupo A: + 3 mil clientes.

Em 2017 a empresa resolveu expandir o projeto de REI para DA (Automação da Distribuição). A tecnologia de rádio da Silver Spring é a *RF Mesh*. Nas figuras 15 e 16 temos,

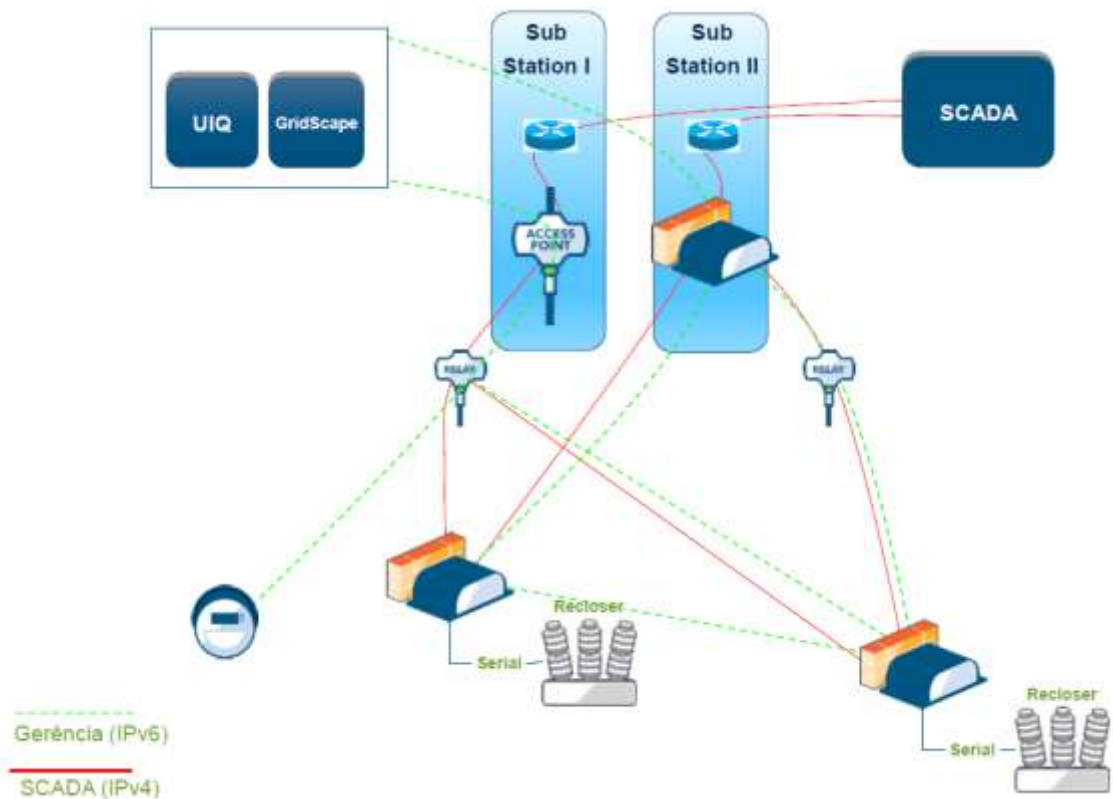
respectivamente, exemplos de equipamentos e ferramentas, além da topologia proposta para rede RF *Mesh*.

Figura 15 – Visão Geral dos equipamentos e Software do projeto REI CPFL



Fonte: (UTCAL, 2017).

Figura 16 – Topologia RF *Mesh* para REI – DA - CPFL



Fonte: (UTCAL, 2017).

Projeto interessante e comercialmente consolidado, é a solução corporativa da companhia. Pode ser facilmente implantado em áreas de alta ou baixa densidade de dispositivos. Após a aquisição da AES Sul pelo Grupo CPFL, o projeto LoRaWAN teve que

ser defendido, comparando com o projeto RF *Mesh*. Isso ajudou a amadurecer muito a ideia de acesso escolhida para a REI RGE Sul.

### 2.6.3 Estudo de Caso Ergon Energy

Distribuidora de energia no estado de Queensland na Austrália. Um estado com aproximadamente 1,8 milhões de km<sup>2</sup> e pouco menos de 4 milhões de habitantes. A área de concessão da Ergon pode ser observada na figura 17.

Figura 17 – Área de concessão da Ergon Energy



Fonte: (AER, 2019).

A Ergon Energy tem uma das mais baixas densidades de clientes de utilities no mundo, resultando em linhas de distribuição muito longas, fazendo com que a variação de carga e o gerenciamento sejam uma questão-chave para a empresa. Em resposta a problemas de carga na rede de energia, a solução tradicional é atualizar a rede e aumentar a capacidade, com custos de infraestrutura significativos.

Em 2015, a concessionária executou um Desafio de Inovação interno. A Ergon estava procurando uma solução escalável que tivesse a capacidade de ir além do teste. A empresa escolheu a NNNCo como parceira para fornecer o serviço de comunicação.

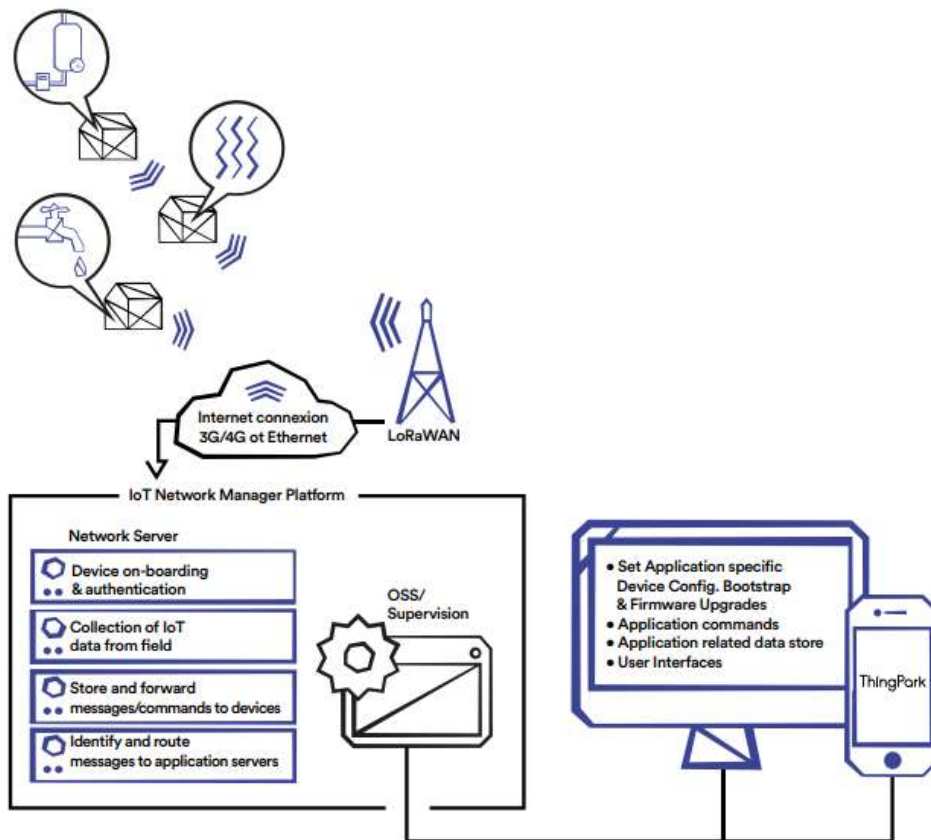
A empresa escolheu a cidade sede Townsville (200.000 habitantes) para testar a solução, desenvolvida com NNNCo e Actility, para conectar e controlar, além das subestações o consumo individual de energia das residências, como o aquecimento de água. Em outubro de 2016, a empresa iniciou um teste de seis meses com um pequeno número de residências, onde sensores e módulos de controle foram instalados em circuitos de água quente.

A escolha pela Ergon Energy da tecnologia LoRaWAN de padrão aberto foi influenciada por sua capacidade de oferecer endereçamento individual de cada terminal, funcionalidade multitarefa para comunicação em grupo e comunicação bidirecional. Abaixo na figura 18 a topologia da solução.

- A tecnologia de longo alcance é essencial para apoiar a rede da concessionária em uma área de distribuição muito grande, totalizando 1,7 milhão de km<sup>2</sup>;
- O padrão aberto permite um ecossistema aberto e crescente, uma escolha de fornecedores e nenhuma dependência de fornecedor;
- Capacidade de endereçamento individual significa que a Ergon Energy pode configurar remotamente cada terminal com características únicas;
- A funcionalidade múltipla mantém o tráfego na rede LoRa gerenciável e garante que a solução seja escalável, desde a comunicação com alguns terminais até milhares;
- A comunicação bidirecional garante que a Ergon receba a resposta dos terminais e possa fornecer instruções de controle para criar uma rede gerenciada.



Figura 18 – Solução LoRaWAN Ergon Energy – Fonte Actility



Fonte: (ACTILITY, 2018).

Esse projeto foi um case LoRaWAN para distribuidora de Energia realizado durante a escolha da tecnologia de comunicações para REI da RGE Sul.

#### 2.6.4 Outros Cases

Na chamada pública ANEEL 2010 para REI (Chamada 11/2010), diversas concessionárias brasileiras iniciaram projetos. Alguns relevantes apresentados nas Utilities Telecom Council America Latina (UTCAL) 2015, 2016 e 2017 foram:

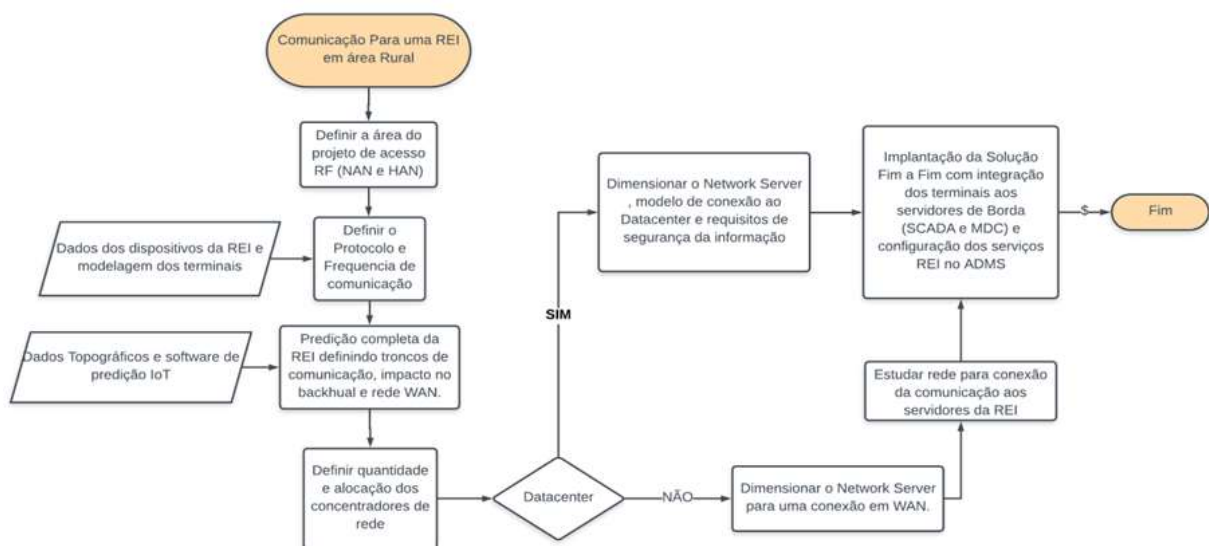
- Light – RJ: Comunicação utilizando redes de Fibras Óticas;
- Ampla-RJ: Rede de comunicação utilizando *fiber mesh* da Furukawa em parceria com um provedor de internet local em Búzios – RJ.
- Empresas do Grupo Neoenergia/Iberdrola: Estão a frente da padronização dos protocolos RF *Mesh* das empresas Cisco, Landys Gyr e Silver Spring – o WI-SUN.

### 3 METODOLOGIA PARA DEFINIÇÃO DE TECNOLOGIA DE COMUNICAÇÃO EM REI RURAL

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada nessa dissertação para definição da tecnologia de comunicação (sem fio) para uma REI Rural. Durante o desenvolvimento do trabalho foi criado um método simples que pode ser aplicado em qualquer NAN de REI em áreas, com cobertura sem fio, previstas até a integração com os sistemas que processarão as informações pertinentes a REI.

Conforme ilustrado na figura 19, segue o fluxograma com o método para definição do Sistema de Comunicação sem fio para REI Rural.

Figura 19 – Fluxograma com a metodologia de Definição do Sistema de Comunicação para REI em meio Rural



Fonte: Autor.

Devem ser definidos os principais requisitos de uma rede de comunicação sem fio para uma rede elétrica inteligente em meio suburbano ou rural.

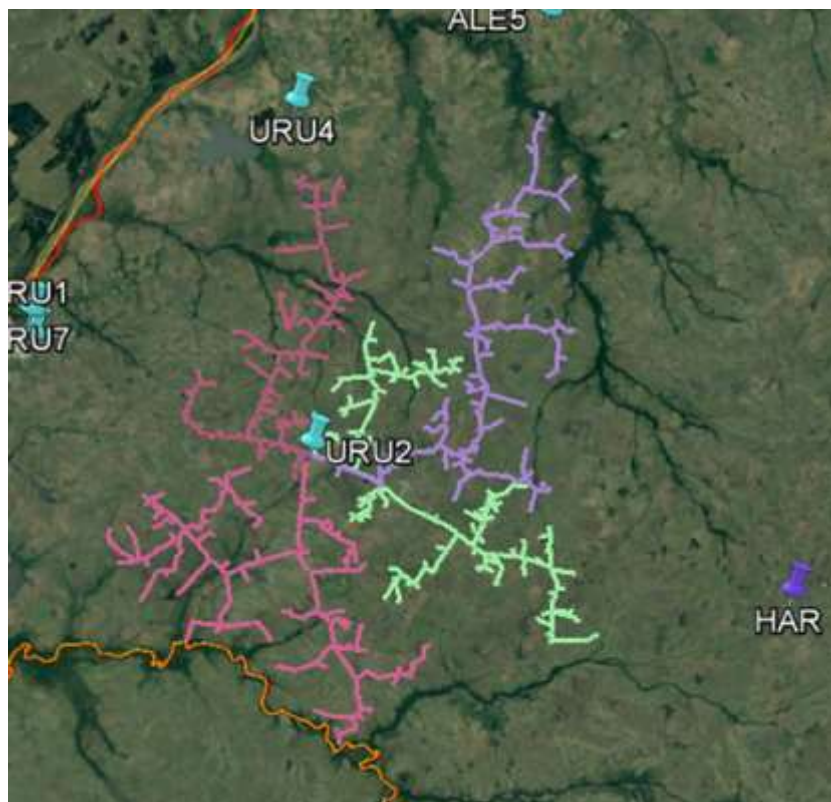
#### 3.1 DEFINIR A ÁREA DO PROJETO DE ACESSO RF (NAN E HAN)

Um cenário de rede de distribuição de energia elétrica em meio rural foi escolhido, compreendendo uma área aproximada de 4.200 km<sup>2</sup>, no Sul do Brasil conforme observado na figura 20. Fornece energia para mais de 500 consumidores de baixa tensão, 250 consumidores de média ou alta tensão e mais de 20 elementos de automação da rede de distribuição ligados

a uma subestação na área rural do município de Uruguaiiana, no estado do Rio Grande do Sul, a subestação da Distribuidora RGE Sul é a URU2. Foi utilizada a tecnologia de conectividade desses elementos a um datacenter localizado remotamente à área de estudo inicial.

A esse sistema foram adicionados elementos de segurança da informação para tecnologia da operação da rede de Distribuição (TO) além de prover a segregação do ambiente de TO do ambiente de TI.

Figura 20 – Rede de Distribuição de URU2 – Uruguaiiana – RGE Sul



Fonte: Autor.

Como em todos os modelos de definição de tronco de comunicação para qualquer tipo de serviço, o primeiro desafio seria modelar os terminais da rede elétrica inteligente em projeto para mensurarmos o impacto da demanda desses terminais na rede de comunicação como um todo do ponto de vista de latência, banda necessária e quantidade de saltos. Os terminais são os clientes que vão definir largura de banda dos troncos de comunicação, quantidade de nós concentradores, capacidade de servidores de rede e arquitetura de CORE para comunicação SCADA.

De acordo com os resultados de outros projetos de comunicação para Smart Grid no Brasil, e em regiões do mundo com características semelhantes, a contratação total do serviço de comunicação era uma opção para a implementação da rede, mas não para o desenvolvimento da dissertação. Hoje, para questões de medição e automação inteligentes na rede de distribuição RGE Sul, são utilizados os serviços de celular móvel de três das quatro principais empresas de telefonia móvel do Brasil: Vivo, Claro e Tim. Recentemente, a planta de automação de distribuição (DA) foi aprimorada com a inserção de contingência com modems dual SIM 3G, até 2015 a empresa usava apenas um modem com tecnologia GPRS para DA. A melhoria na disponibilidade do serviço DA foi de 9%, saltando de 90% para 99% de sucesso na conexão entre elementos gerenciados e o servidor SCADA.

No entanto, na área do estudo, atendida pela subestação URU2, a cobertura 3G não atinge 30% com cobertura indoor, de acordo com a consulta realizada à operadora Vivo (maior participação de mercado no Brasil e parceiro principal da RGE Sul para soluções de Telecomunicações Fixas e Móveis) na figura 21. Reforçando que os elementos de DA (Religadores, Reguladores de Tensão e Banco de Capacitores) estão próximos da subestação e com cobertura celular adequada.

Figura 21 – Área de Estudo – Cobertura Telefonia Móvel da Operadora Vivo

Servidores de Medição Inteligente e Aplicações de GRID				Aplicações para Clientes				Camada de Aplicação	Datacenter
Autenticação de endpoints, controle de acesso, Privacidade e outros standards de Cyber Security								Camada de Segurança da Informação	
Rede Celular (2G, 3G e 4G), Fibra ótica, Rádios MW (PtP e PmP) e Redes MPLS			Rádios MW PmP, RF Mesh, Fiber Mesh, PLC, Cabo Coaxial e ETH			Home Plug, ZigBee, WiFi, Z-Wave e PLC		Camada de Comunicação	Serviço de Telecom
WAN			NAN			HAN			
PMU's	Bancos de Cap.	Religadores	Chaves	Sensores	Transformadores	Medidores	Outros serviços	Camada de Controle e Serviços de GRID	Área de Implantação de Smart GRID
Redes de Subtransmissão e Distribuição					Clientes			Camada de SEP	

Fonte: Autor.

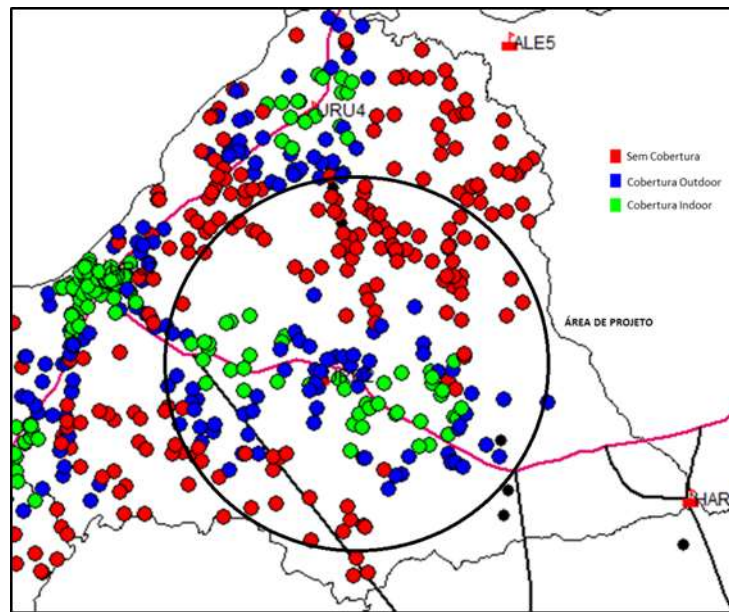
Com base nessas informações e nos altos valores de contratação de serviços de comunicação via satélite (VSAT ou BGAN), foi definida a opção pela construção de uma rede IoT de baixo custo, pois a densidade dos elementos na área de 4.500 quilômetros quadrados do sistema é de pouco mais do que 250 terminais, isto é, 0,05 terminal por quilômetro quadrado.

Para a definição de arquitetura e topologia de comunicação para as redes elétricas inteligentes no meio rural, foram aproveitadas as soluções e infraestruturas corporativas

existentes na concessionária de energia elétrica, juntamente com as soluções de mercado (Celular ou Fixo / MPLS). Essas estruturas formariam a rede *backhaul*.

O modelo de arquitetura adotado foi um sistema multicamadas ilustrado na figura 22.

Figura 22 – Arquitetura do sistema multicamada



Fonte: Adaptado de (KUZLU,2014).

O modelo para arquitetura para REI proposta é uma plataforma interativa, consistindo de uma camada de sistema de energia (ou sistema elétrico de potência – SEP), uma camada de controle, uma camada de comunicação, uma camada de segurança e uma camada de aplicação.

A camada do sistema de energia se refere à geração de energia, transmissão, distribuição e sistemas do cliente. A camada de controle de energia permite funções de monitoramento, controle e gerenciamento de redes inteligentes. A camada de comunicação permite comunicações bidirecionais em um ambiente de REI. A camada de segurança fornece confidencialidade, integridade, autenticação e disponibilidade de dados. A camada de aplicação fornece vários aplicativos de REI para clientes e concessionária com base em uma infraestrutura de informações existentes.

### 3.2 DEFINIÇÃO DO PROTOCOLO E FREQUÊNCIA DE OPERAÇÃO

No mercado para o serviço de varejo, percebemos que a tecnologia de malha ou LPWA (área de baixa potência) seria a mais adequada para o alto volume de pontos de extremidade, uma vez que os custos dos serviços eram dez vezes menores do que os custos para a rede celular, nosso alvo inicial mais baixo.

Pode-se também alavancar a infraestrutura do cliente através da implantação de redes inteligentes seguras (WAN Inteligente ou IWAN), que através da instalação de um firewall conectado ao datacenter pode fornecer conectividade de elementos de Automação Residencial, Comercial e de Medição.

Na comparação entre a tecnologia RF para o acesso proposto e a tecnologia atualmente adotada pela maioria das empresas para comunicar Redes Elétricas Inteligentes (basicamente em área urbana), a rede *Mesh*, optamos por fazer o investimento em acesso via LPWAN, especificamente o protocolo LoRaWAN. Podemos verificar a comparação entre LoRaWAN, *Mesh* e outras possibilidades de RF na tabela 4.

Tabela 4 – Comparativo entre Tecnologias RF para REI

Alternativa	Prós	Contras
Rede RF Mesh	Padrão Corporativo, Fácil projeto e implantação, Diversos projetos de sucesso, alto índice de replicabilidade	Sem ineditismo ou viés de pesquisa, alto custo por endpoint
Rede de Rádio Proprietária	Várias opções no mercado e no setor acadêmico	Projeto complexo, custo elevado, baixo índice de replicabilidade
Rede 3PP Proprietária ou Small Cell	Projeto e implantação padronizados e solução consolidada com vendedores consagrados, possibilidade de rede ser operada por empresa de telecom	Alto custo, dificuldade de trabalhar junto às operadoras de telecom
Rede LPWA (Ex. LoRaWAN)	Baixo custo de implantação, projeto fácil, ineditismo, alto índice de replicabilidade	Não existem projetos no Brasil, Tecnologia em evolução, necessita testes para aplicação em todos clientes do projeto

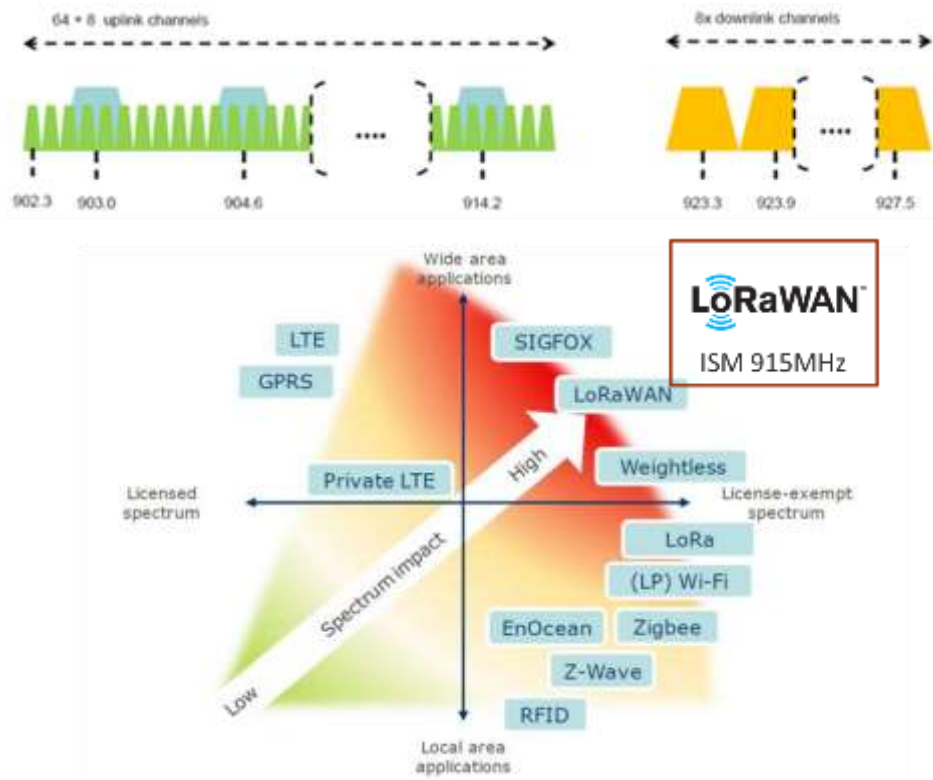
Fonte: Autor.

Nosso cenário para comunicação RF seria uma cobertura de 4.200 km<sup>2</sup> para menos de 300 dispositivos, sendo que a faixa central da área dispõe de cobertura comercial celular.



Bandas ISM, sem necessidade de licenciamento no Brasil: 902-907,5; 915-928; 2400-2483,5; 5725-5850 MHz.

Figura 23 – Definição de Espectro por Tecnologia



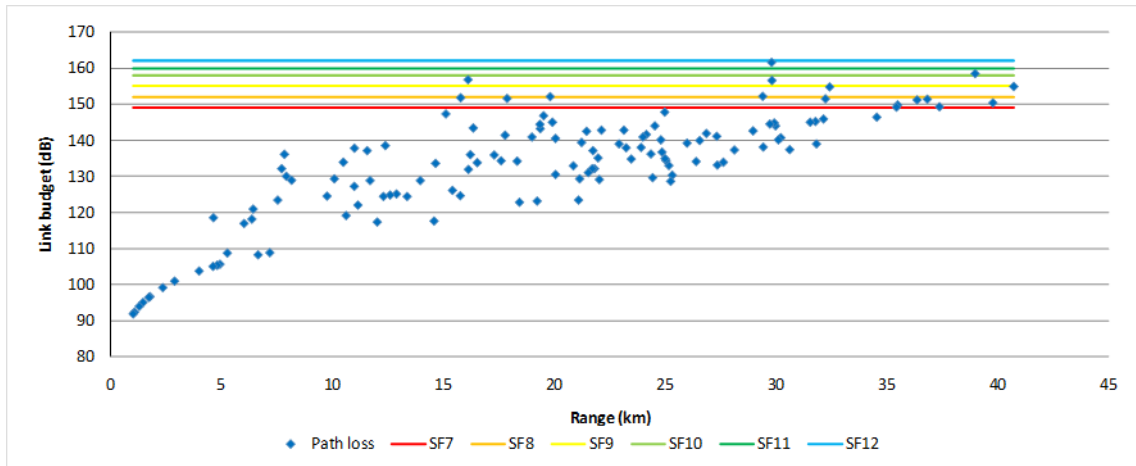
Fonte: (ITU-T, 2017).

Com o quadro comparativo e por utilizar protocolos padronizados, software de código-aberto e hardware de baixo custo, escolheu-se LoRaWAN ISM915.

### 3.3 PREDIÇÃO E DEFINIÇÃO DE CONCENTRADORES

No estudo de cobertura na região de URU2, seriam necessários dez concentradores LoRaWAN 915MHz para atender toda a área de 4.200 km<sup>2</sup>, para área de 4 km<sup>2</sup> da UFSM, um concentrador atenderia tranquilamente. A quantidade de concentradores para atender um projeto não segue uma relação linear, depende da topografia da área de implantação e um software de predição se faz necessário, para IoT existem softwares como das empresas francesas ATDI e SIRADEL, por exemplo.

Figura 24 – Link budget (dB) vs alcance (km) com transmissor LoRa a 915MHz para SF variável (7 a 12), com 10 dB de margem (p/ fading). Alturas das antenas  $h_t = 50\text{m}$  e  $h_r = 10\text{m}$ , com ganhos  $G_t = 6\text{dBi}$  e  $G_r = 9\text{dBi}$ . Feito no Servidor TheThings

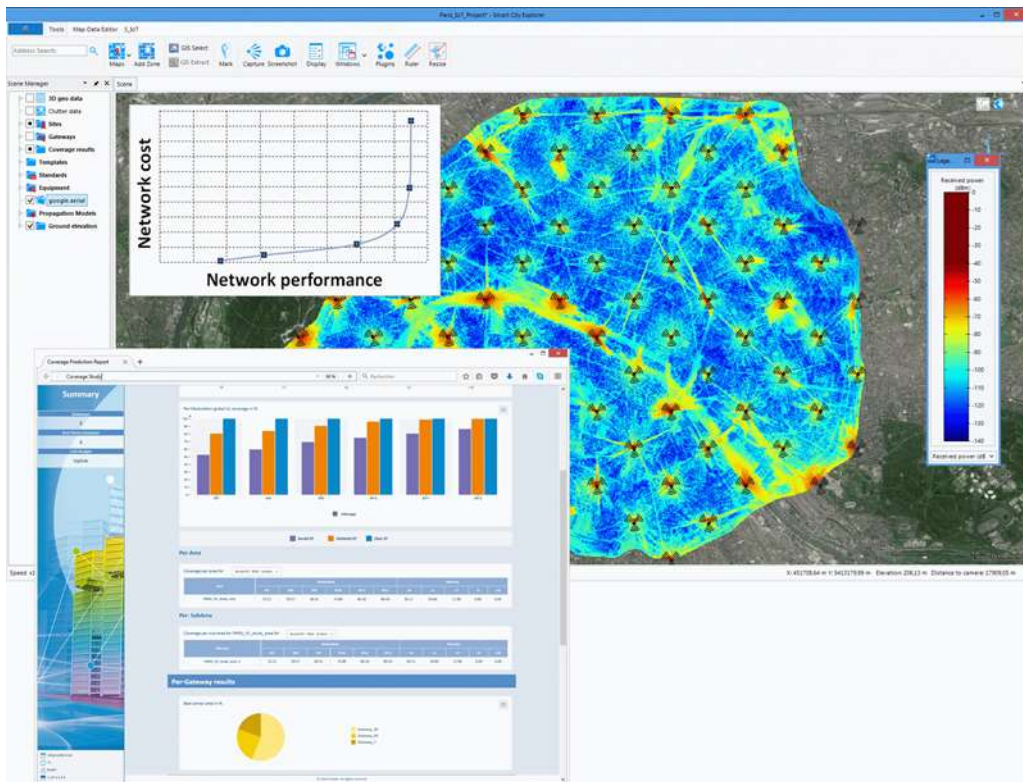


Fonte: (BARRIQUELLO, et al, 2017).

Um software de predição, como o apresentado na figura 25, é um item de extrema importância para modelagem com precisão da relação Concentrador x Terminal, carga nos troncos de *backhaul* Concentrador x Network Server e manutenção da rede de comunicação para reconfigurações, estudos de interferência e ampliação do parque.



Figura 25 – Tela de software de predição IoT – LoRaWAN - SIRADEL

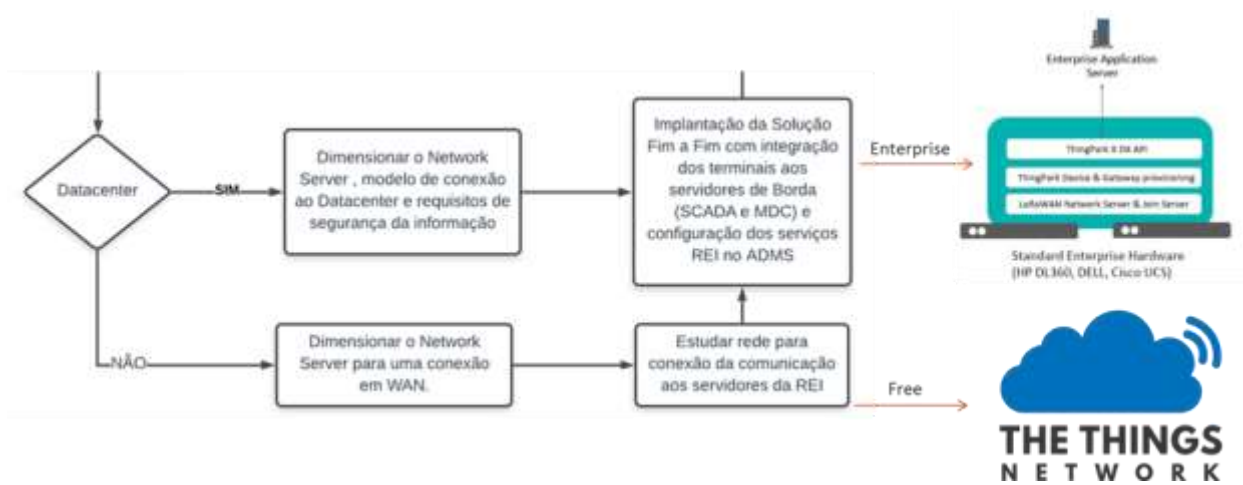


Fonte: (SIRADEL, 2019).

### 3.4 DEFINIÇÃO DO CORE DA REDE

Na configuração de Network Server (NS) ou Servidor da rede de comunicação para REI, a hospedagem do servidor é a primeira pergunta que deve ser respondida. Caso o servidor fique hospedado em uma datacenter, um custo maior com hospedagem e um superdimensionamento das interfaces e processamento são necessários, porém a robustez da solução garante o funcionamento em missão crítica com qualidade. Caso o servidor seja hospedado na nuvem, ele pode até ser gratuito no caso de LoRaWAN, como exemplo o servidor de rede TTN (THETHINGSNETWORK, 2017).

Figura 26 – Opções para Servidores de Rede LPWAN



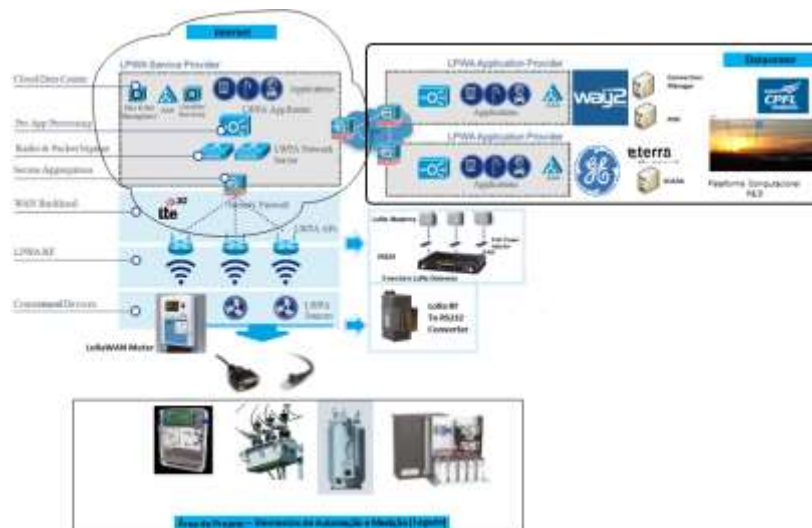
Fonte: (BARRIQUELLO, et al, 2017).

### 3.5 CONCLUSÃO DA ARQUITETURA

A arquitetura definida na região de URU2 compreende o protocolo LoRa para NAN conectando medidores e elementos de DA com *backhaul* disponível na distribuidora (3G, BGAN, VSAT, MPLS, etc.), conforme figura 27.

As conexões do servidor de rede aos servidores de aquisição e processamento de dados como SCADA e MDC (*Meter Data Collection*) podem ser realizadas no datacenter através de conexões óticas ou com fio ou através de APN (redes celulares) ou VPN no caso do servidor de rede ser hospedado na nuvem.

Figura 27 – Topologia completa da solução LoRaWAN.



Fonte: Autor.

## 4 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A primeira etapa para o desenvolvimento desse trabalho foi a elaboração da especificação técnica (Anexo) para que a implantação do sistema recebesse propostas comerciais para fornecimento de materiais e serviços para o funcionamento corporativo da rede LoRaWAN integrada nos sistemas de TI e TO da RGE Sul.

### 4.1 PROPOSTAS COMERCIAIS RECEBIDAS E DEFINIÇÃO DE CONTINUIDADE

Inicialmente existia a ideia de custo por *endpoint* LoRa de aproximadamente R\$ 300,00 e custo de aproximadamente R\$ 10.000,00 por concentrador. Não existia um balizador para estimativa do valor de serviços nem da topologia ou custos com *backhaul*, pois a rede LoRaWAN permitia o uso de *backhaul* via telefonia celular (3/4G), conforme apresentado na tabela 5.

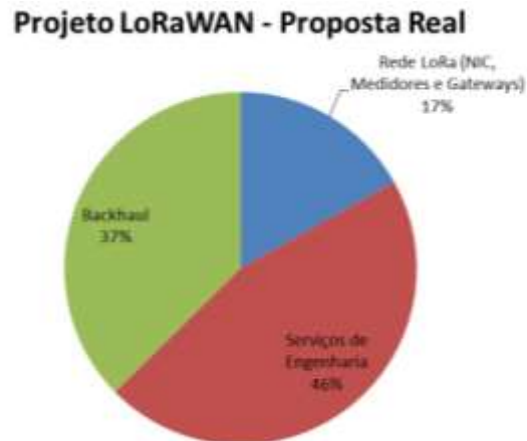
Tabela 5 – Orçamento Prévio LoRaWAN

	Rede TI	Estruturas Verticais	RF	Endpoint	Mensal	Total LoRa	Total Geral com EV
Device	Roteadores e SW	Postes	Definir	Definir	Definir - 2 anos		
HW	Definir	Fibra 30	Estrutura LoRa	Modem LoRa	LoRa		
Custo unit. (R\$)	25.000,00	25.000,00	90.000,00	300,00	10,00		
Quant.	10	10	1	260	260		
Total (R\$)	250.000,00	250.000,00	90.000,00	78.000,00	62.400,00	480.400,00	730.400,00

Fonte: Autor.

Após o recebimento das propostas os custos com a rede LoRaWAN se confirmaram, porém os custos com *backhaul* e serviços de engenharia inviabilizavam a implantação na área de estudo, muito por ser alocado em URU2, local a 40 km da cidade de Uruguaiana, sem disponibilidade de rede MPLS e com baixa disponibilidade de rede celular. Estimou-se o custo total de implantação da ordem de R\$ 800.000,00 mesmo sem as Estruturas Verticais e implantação, que seriam feitas pela equipe de automação da própria RGE Sul. Porém as propostas enviadas pelas proponentes beiraram os R\$ 2.000.000,00 com a composição de preços conforme ilustrado na figura 28.

Figura 28 – Composição de Preços Recebidas da RFP



Fonte: Autor.

O custo elevado da proposta faria com que a implantação do sistema de comunicação em URU2 consumisse mais de 50% de todos os recursos do projeto, porém os recursos computacionais do ADMS já desenvolvidos no projeto poderiam receber informações de uma rede LoRaWAN através do SCADA de qualquer cenário. Assim, a equipe de projeto optou por realizar a implantação da rede no próprio campus da universidade.

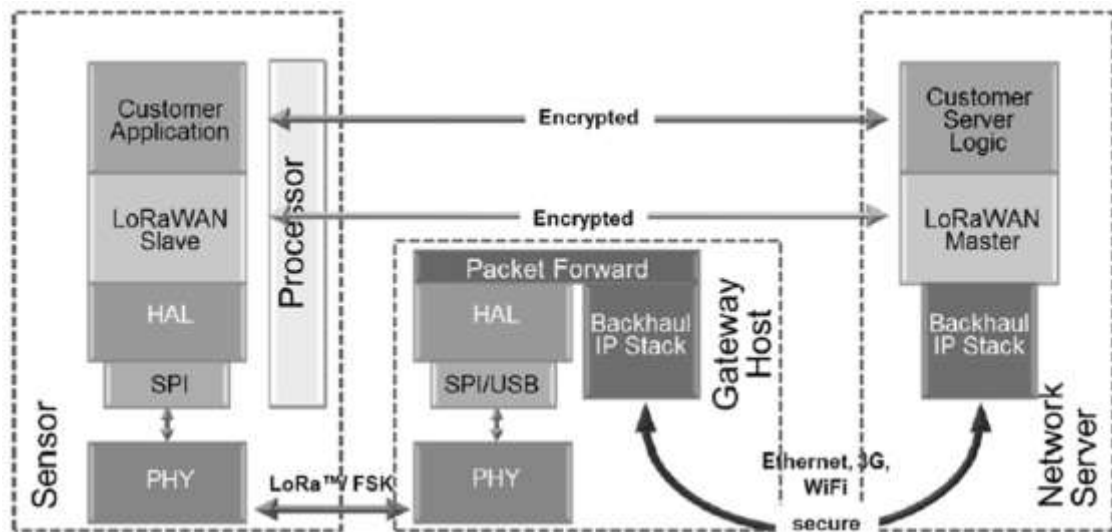
Portanto, a continuidade da implantação do sistema de comunicação em URU2 foi cancelada ou adiada e foi retirada do escopo desta dissertação. Partiu-se para a implantação do sistema de medição inteligente no campus da UFSM, em Santa Maria – Camobi, com um concentrador e cerca de 50 medidores utilizando LoRa Classe A.

#### 4.2 IMPLANTAÇÃO DE PILOTO REDE LORAWAN NO CAMPUS UFSM – CAMOBI

Após definição de realização de um piloto no Campus UFSM, o professor Dr. Carlos Henrique Barriquello e equipe começaram a implantação da rede LoRaWAN.

O concentrador LoRaWAN é o elemento responsável por prover a conectividade sem fio de longo alcance para os terminais em múltiplos canais e permitir que os pacotes cheguem até a internet. Portanto, ele possui a interface de rádio LoRa para transmissão e recepção de pacotes em múltiplos canais e interfaces de conectividade IP (protocolo de internet), as quais podem ser Ethernet, 3G/4G, Wifi, etc. Desta forma, o concentrador pode tanto encaminhar pacotes recebidos dos terminais até o servidor de rede (Network Server) quanto transmitir pacotes vindos deste até os terminais. Este fluxo de pacotes é ilustrado na figura 29.

Figura 29 – Fluxo de pacotes em uma rede LoRaWAN



Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

Foi utilizado um concentrador LoRaWAN fabricado pela empresa Risinghf, modelo RHF2S008, mostrado na figura 30. Este é composto, basicamente, de uma interface de rádio LoRa com 8 canais de receptores LoRa multi-SF de 125 kHz, 1 canal LoRa configurável (125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz) e um canal GFSK, modelo SX1301, fabricado pela Semtech, e um controlador ARM11 embarcado de 700 MHz, contendo interfaces de comunicação Ethernet e 3G/4G.

Figura 30 – Concentrador LoRaWAN, modelo RHF2S008 da Risinghf (à esquerda) e módulo de rádio LoRa (à direita)



Fonte: (RISINGHF, 2017).

O encaminhamento de pacotes pelo concentrador é realizado através do software denominado *packet forwarder*. Este software deve ser instalado no concentrador e configurado com o endereço do servidor de rede ao qual o concentrador ficará conectado. Na plataforma desenvolvida, o concentrador foi instalado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no campus Camobi, no prédio da Reitoria, e configurado para uso do *packet forwarder* disponibilizado pela empresa Semtech no repositório [github.com/Loranet/packet\\_forwarder](https://github.com/Loranet/packet_forwarder). Uma fotografia do concentrador instalado pode ser vista na figura 31.

Figura 31 – Concentrador LoRaWAN instalado na UFSM (Campus Camobi) (à esquerda), no lado no prédio da reitoria (à direita).



Fonte: Autor.

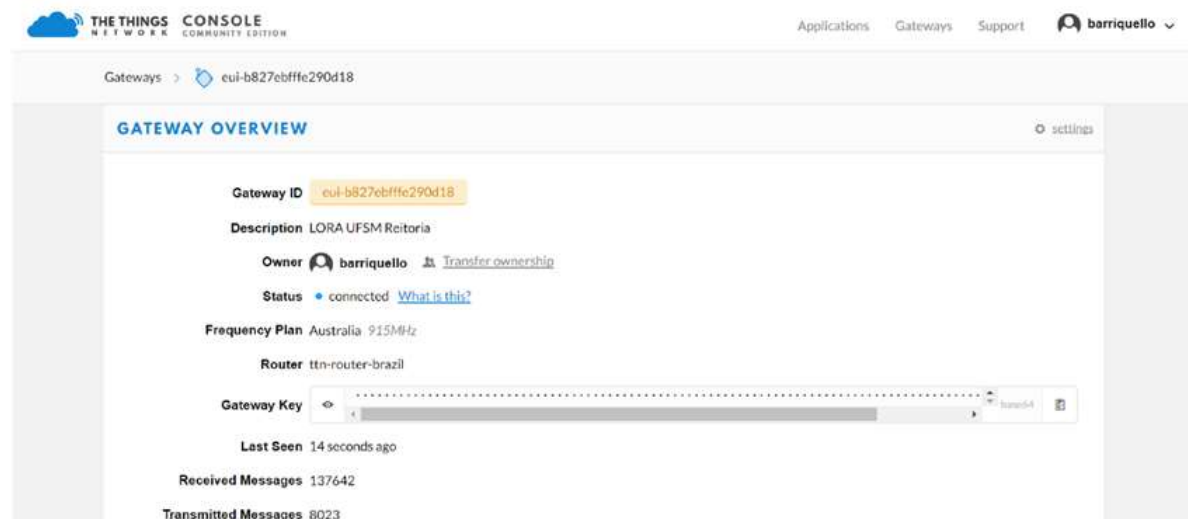
#### 4.2.1 Configuração e operação dos servidores de rede e aplicação (Network Server/App Server)

O servidor de rede LoRaWAN é responsável, basicamente, pela autenticação e configuração remota dos terminais, pela filtragem de duplicatas de mensagens recebidas por mais de um concentrador (*uplink*) e pela determinação do concentrador de acesso ao terminal destinatário de uma mensagem (*downlink*). Portanto, as mensagens *downlink* vindas das aplicações são encaminhadas ao servidor de aplicação, o qual as repassa ao servidor de rede, o qual, por sua vez, as encaminha ao concentrador mais próximo ao terminal. Da mesma forma, as mensagens *uplink* recebidas a partir de um terminal são repassadas pelos concentradores ao servidor de rede, que realiza a filtragem de duplicatas e as encaminha ao servidor de aplicação, o qual, por sua vez, as entrega às aplicações pertinentes.



Para a plataforma piloto optou-se pelo servidor de rede TTN (THETHINGSNETWORK, 2017). Este servidor é disponibilizado em código aberto (*open-source*) para uso privado e também como serviço para uso público. Assim, na plataforma desenvolvida, configurou-se o concentrador com o endereço do servidor de rede utilizado, a identificação (ID) do concentrador, fornecida pelo servidor de rede e o plano de frequência utilizado. Como ainda não há uma especificação regional do LoRaWAN para o Brasil, utilizou-se a configuração australiana que é compatível com a resolução 680/17 da ANATEL. A figura 32 mostra o painel de controle do servidor de rede com dados de identificação e de tráfego de pacotes do concentrador.

Figura 32 – Painel de controle do concentrador no servidor de rede TTN



Fonte: Autor.

#### 4.2.2 Configuração de modem do terminal LoRaWAN

Após a configuração do concentrador e do servidor de rede, realizou-se a configuração do terminal LoRaWAN. Como terminal optou-se pelo modem USB AT LoRaWAN da Risinghf modelo RHF3M076. Este modem é compatível com a especificação LoRaWAN para classes A e C e pode ser operado via comandos AT através da porta USB e pode ser visto na figura 33.

Figura 33 – Modem USB AT LoRaWAN da Risinghf modelo RHF3M076



Fonte: (RISINGHF, 2017).

Para configurar o modem através da porta USB, utiliza-se a porta serial virtual (COM) a uma taxa de 115200 bauds. A seguir, o modem pode ser configurado através dos seguintes passos:

1) Define-se a frequência de operação do modem, através do comando AT+DR. Ex.: AT+DR=US915, para operar em 915 MHz. E, em seguida, os respectivos canais de operação através do comando AT+CH. Ex.: AT+CH=0, 902.3, DR0, DR3, para operar na frequência de 902,3 MHz.

2) Define-se a classe do dispositivo (ex.: AT+CLASS=C, para classe C) e o modo de registro na rede através do comando AT+MODE = LWABP, para ativação por personalização, ou AT+MODE = LWOTAA para ativação *over-the-air*. Neste caso, o acesso à rede deve ser solicitado pelo terminal e liberado pelo servidor de rede. Já na ativação por personalização, o terminal possui acesso direto à rede, sem necessidade de solicitar o acesso. Por isso, para aplicações que requerem alto nível de segurança, sugere-se a utilização sempre do modo de ativação *over-the-air*.

3) Após a definição do modo de ativação, realiza-se a gravação do endereço de dispositivo, ID da aplicação e as chaves de segurança de rede (nwksKey) e de aplicação (appSKey) através dos comandos

AT+ID e AT+KEY (ex.: AT+ID =DevAddr,"26-03-10-ED", AT+ID =AppEUI,"70-B3-D5-7E-F0-00-51-0F", AT+KEY=NWKSKEY, "9A06311C748925512C479A951A161565", AT+KEY=APPKEY, "EB9ABF44F365DEC4BB97746F135F119A". Caso o modo de ativação seja por personalização, o terminal já pode iniciar a comunicação. Entretanto, se o modo for *over-the-air*, é necessário realizar a entrada na rede através do comando AT+JOIN.

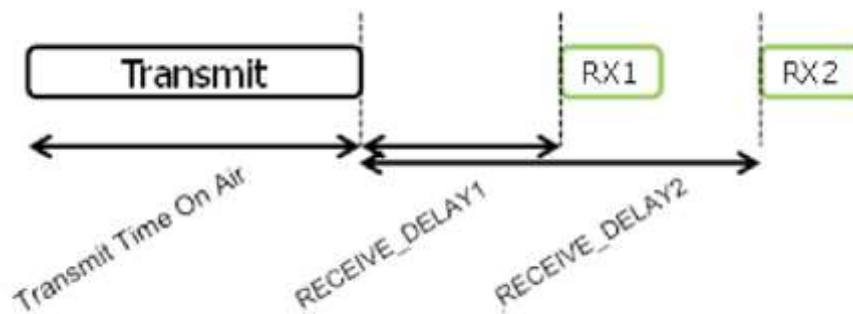
4) Após a entrada na rede, o terminal está apto a fazer a transmissão de mensagens, bem como receber mensagens do servidor de aplicação.



### 4.2.3 Experimentos de comunicação *downlink* e *uplink* com terminal LoRaWAN

Após a configuração do terminal, foram realizados experimentos de comunicação com o concentrador. Na rede LoRaWAN as mensagens podem ser transmitidas tanto do concentrador ao terminal (*downlink*), quanto do terminal ao concentrador (*uplink*). Para terminais classe A, a recepção das mensagens *downlink* ocorre após uma transmissão *uplink*, dentro de dois possíveis intervalos, denominados janelas de recepção. Há duas janelas de recepção, RX1 e RX2, conforme ilustrado na figura 34. Já os terminais classe B possuem janelas de recepção periódicas. E terminais classe C, por sua vez, podem receber mensagens a qualquer tempo, pois sempre mantém o receptor ligado.

Figura 34 – Janelas de recepção para terminais classe A



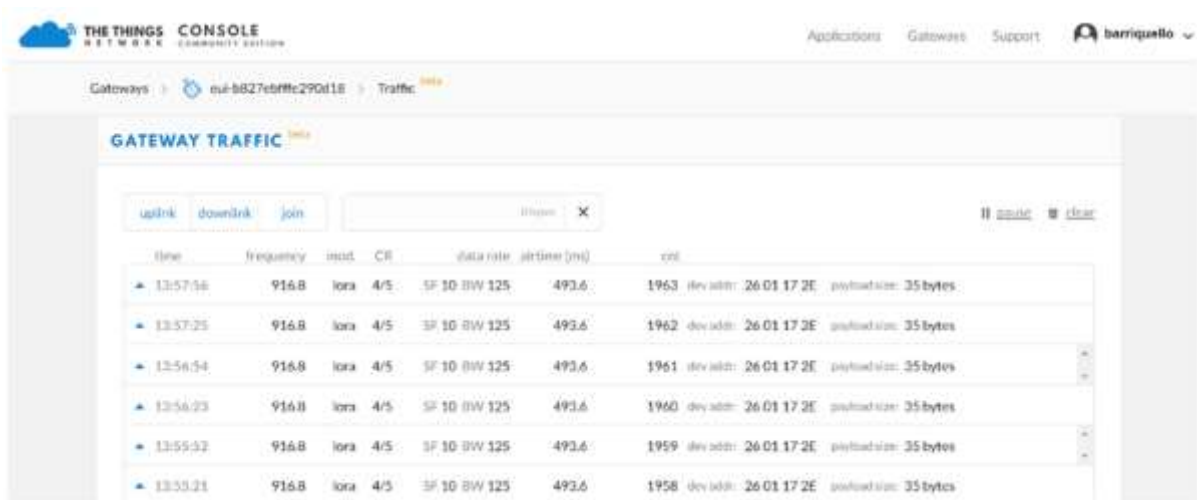
Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

Além da comunicação bidirecional (*uplink/downlink*), em uma rede LoRaWAN, as mensagens podem ser transmitidas com ou sem confirmação de recepção. As mensagens sem confirmação são enviadas sem que o transmissor seja notificado de que houve a recepção com sucesso. Já, no caso das mensagens com confirmação, o receptor deve enviar uma mensagem de confirmação ao transmissor, notificando-o do sucesso da comunicação. Assim, o transmissor pode retransmitir uma mensagem caso ela não tenha sido confirmada pelo receptor.

Nos experimentos foram transmitidas mensagens com e sem confirmação, tendo sido a comunicação realizada com sucesso em ambos os casos. Para mensagens sem confirmação utilizam-se os comandos `AT+MSGHEX` ou `AT+MSG` (ex.: `AT+MSGHEX="11 22 33"`, `AT+MSG="Ola "`) e, para as mensagens com confirmação, utilizam-se os comandos `AT+CMSGHEX` e `AT+CMSG` (ex.: `AT+CMSGHEX="11 22 33"`, `AT+CMSG="Ola"`). Na figura 35, mostra-se o painel de controle do servidor de rede, onde são listadas as mensagens

recebidas com sucesso, incluindo metadados como instante de recepção (*timestamp*), frequência utilizada, taxa de codificação, taxa de dados e tempo de transmissão. Na figura 36, mostra-se que a mensagem está criptografada e há outros metadados incluídos como intensidade de sinal recebido (RSSI) e relação sinal-ruído (SNR).

Figura 35 – Mensagens recebidas com sucesso no servidor de rede



time	frequency	mod	CR	data rate	airtime (ms)	rssi	payload size
13:57:56	916.8	loro	4/5	SF 10 BW 125	493.6	1963	35 bytes
13:57:25	916.8	loro	4/5	SF 10 BW 125	493.6	1962	35 bytes
13:56:54	916.8	loro	4/5	SF 10 BW 125	493.6	1961	35 bytes
13:56:23	916.8	loro	4/5	SF 10 BW 125	493.6	1960	35 bytes
13:55:52	916.8	loro	4/5	SF 10 BW 125	493.6	1959	35 bytes
13:55:21	916.8	loro	4/5	SF 10 BW 125	493.6	1958	35 bytes

Fonte: Autor.

Figura 36 – Mensagem recebida com sucesso no servidor de rede, mostrando payload criptografado e metadados da mensagem



```

Network: The Things Network
Net ID: 8x13
Region: World

Physical Payload
40 2F 17 01 26 80 A5 07 01 25 28 68 C7 C6 4E 4B F9 A3 CA 1C 1A 43 6D 02 1E 8C A7 80 48 87 C0 12 D7 9A A5

Event Data
3  "payload": "0C445a4c9c81yhmv8705/njyhw020CHrnc0U8thE1Xedjz",
4  "f_cnt": 1955,
5  "loro": {
6    "spreading_factor": 10,
7    "bandwidth": 125,
8    "air_time": 49356000
9  },
10 "coding_rate": "4/5",
11 "timestamp": "2017-11-23T19:53:48.498Z",
12 "rssi": -113,
13 "snr": 1.5,
14 "dev_addr": "2601172E",
15 "frequency": 916800000

```

Fonte: Autor.

#### 4.2.4 Experimentos de alcance e cobertura da rede LoRaWAN

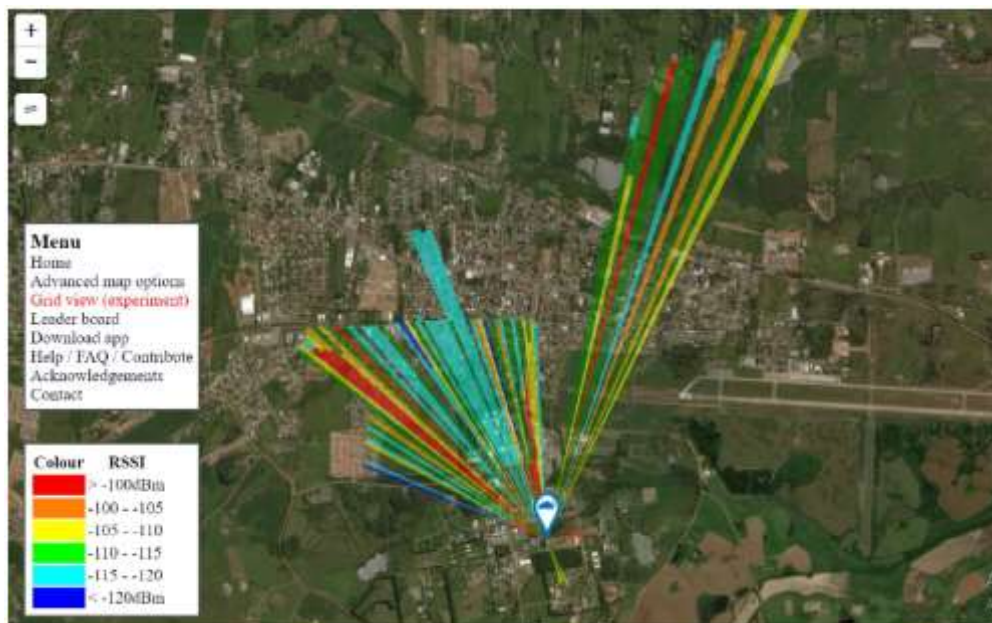
Além dos testes de comunicação, também foram realizados testes de alcance e cobertura da plataforma piloto. Nestes testes, utilizou-se o aplicativo para smartphone *ttnmapper*, o qual utiliza a posição do GPS fornecida pelo smartphone para mapear a cobertura da rede e a intensidade de sinal recebido. Na figura 37 mostra-se a tela do aplicativo e o terminal de teste e, na figura 38, mostra-se o mapa de cobertura obtido após a realização dos testes.

Figura 37 – Smartphone com aplicativo ttnmapper utilizado nos testes de alcance e cobertura da plataforma piloto



Fonte: Autor.

Figura 38 – Mapa de cobertura da plataforma piloto obtido com o aplicativo ttnmapper



Fonte: Autor.

#### 4.3 TESTES EXPERIMENTAIS PILOTO REDE LORAWAN NO CAMPUS UFSM – CAMOBI

A rede LoraWAN piloto instalada na UFSM conta com um concentrador modelo RHF2S008, da Risinghf, montado no alto do prédio da reitoria (10 andares), cobrindo o campus e o bairro Camobi de Santa Maria-RS, conforme mostrado na figura 39. A área de cobertura possui um raio aproximado de 4 km, embora tenham sido realizados testes com sucesso em direção ao centro da cidade a 7 km e em direção à cidade de Silveira Martins (direção Nordeste), cerca de 15 km de distância.

Figura 39 – Mapa de cobertura da rede LoRaWAN instalada na UFSM



Fonte: Autor.

Com a rede instalada e em funcionamento, nesta etapa do projeto de pesquisa, foram realizados experimentos, a fim de se verificar o desempenho de uma rede LoRaWAN e se a mesma consegue atender os requisitos de comunicação do projeto. A seguir, se apresenta a metodologia utilizada para os experimentos, os resultados e as conclusões obtidas a partir dos mesmos.

##### 4.3.1 Metodologia experimental

Em todos os experimentos realizados, utilizou-se como endpoint o modem USB modelo RHF3M076, da Risinghf, mostrado na figura 33. As configurações do modem foram variadas conforme a metodologia de cada experimento. Já no caso do concentrador, a

configuração foi mantida fixa para todos os experimentos realizados. Assim, como ainda não há uma especificação regional do LoRaWAN para o Brasil, utilizou-se a configuração australiana para o plano de frequências, a qual define as taxas de dados (data rates - DR) possíveis e é compatível com a resolução 680/17 da ANATEL. A tabela 6 lista as taxas de dados disponíveis, conforme os fatores de espalhamento (SF) e a largura de banda (BW).

Tabela 6 – Data Rates LoraWAN - parâmetros regionais australianos (AU915)

Date rate (DR)	Configuração (SF/BW)	Taxa de dados (bps)
0	LoRa: SF12/125 kHz	250
1	LoRa: SF11/125 kHz	440
2	LoRa: SF10/125 kHz	980
3	LoRa: SF9/125 kHz	1760
4	LoRa: SF8/125 kHz	3125
5	LoRa: SF7/125 kHz	5470
6	LoRa: SF8/500 kHz	12500
8	LoRa: SF12/500 kHz	980
9	LoRa: SF11/500 kHz	1760
10	LoRa: SF10/500 kHz	3900
11	LoRa: SF9/500 kHz	7000
12	LoRa: SF8/500 kHz	12500
13	LoRa: SF7/500 kHz	21900

Fonte: (LORA ALLIANCE, 2018).

Assim, com base no plano de frequências, o concentrador foi configurado para operar com 8 canais de recepção de 125 kHz multi-SF (DR0 a DR5), nas frequências de 916,8, 917,0, 917,2, 917,4, 917,6, 917,8, 918,0 e 918,2 MHz; e um canal de recepção ou transmissão de 500 kHz na frequência de 917,5 MHz (DR6).

Foram coletados tanto os dados disponibilizados pelo modem quanto os dados disponibilizados pelo servidor de rede LoRaWAN. Neste segundo caso, os dados foram recuperados em formato JSON através do protocolo MQTT suportado pelo servidor contendo os seguintes campos.

- Contador: Conta os pacotes transmitidos pelo dispositivo final desde que foi registrado na rede. Trata-se de um número de sequência utilizado para verificar réplicas do pacote e falhas de transmissão (pacotes não recebidos);
- Potência: Informação enviada pelo dispositivo final no *payload* da mensagem. Indica a potência utilizada pelo dispositivo para enviar o dado para o concentrador;

- Frequência: Indica a frequência do canal no qual o concentrador recebeu a mensagem;
- Data Rate: Indica o fator de espalhamento (SF) e a largura de banda (BW) da comunicação;
- ID do concentrador: Informa quais concentradores que receberam o pacote, através do seu ID único;
- Estampa de tempo: Horário da recepção do pacote (UTC);
- RSSI: Intensidade do sinal recebido (potência);
- SNR: Razão sinal-ruído para a mensagem recebida;
- *Payload*: Dados enviados pelo dispositivo terminal (*endpoint*).

#### 4.3.2 Experimento 1: intensidade de sinal e razão sinal-ruído

O primeiro experimento consistiu na análise de intensidade de sinal e da razão sinal-ruído da comunicação. Para este experimento, variou-se a taxa de dados do modem de DR0 a DR5, a frequência do canal de comunicação (de 916,8 a 918,2 MHz, com incremento de 0,2 MHz) e a potência de transmissão (2, 5, 8, 11 e 14 dBm). Ainda, variou-se a distância do modem até o concentrador, mantendo-o em 12 posições distintas, conforme mostrado na figura 40.

Cada configuração de canal, frequência e potência foram testadas durante 30 minutos, sendo o intervalo entre mensagens consecutivas de 30 segundos. Os resultados de SNR e RSSI (média e desvio padrão) foram coletados para a posição em que o terminal estava 352 m do concentrador e estão mostrados nas tabelas 7 e 8.

Figura 40 – Mapa com as posições do modem com variação da distância ao concentrador



Fonte: Autor.

Tabela 7 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI a 352 metros do concentrador com variação da frequência de canal

<b>Frequência (MHz)</b>	<b>SNR média (dB)</b>	<b>SNR desvio-padrão (dB)</b>	<b>RSSI média (dBm)</b>	<b>RSSI desvio-padrão (dBm)</b>
<b>916,8</b>	1,55	3,13	-113,55	4,03
<b>917,0</b>	5,05	0,88	-112,36	5,37
<b>917,2</b>	4,45	1,76	-111,91	4,25
<b>917,4</b>	4,20	1,64	-113,09	4,50
<b>917,6</b>	4,95	1,79	-112,50	4,35
<b>917,8</b>	4,09	3,51	-108,44	4,50
<b>918,0</b>	4,05	0,85	-112,73	3,74
<b>918,2</b>	3,75	2,23	-112,82	4,31

Fonte: Autor.

Tabela 8 – Média e desvio padrão da SNR e RSSI a 352 metros do concentrador variando-se a taxa de dados (data rate)

<b>Taxa de dados (Data Rate)</b>	<b>SNR média (dB)</b>	<b>SNR desvio-padrão (dB)</b>	<b>RSSI média (dBm)</b>	<b>RSSI desvio-padrão (dBm)</b>
<b>DR5 (SF7BW125)</b>	4,19	2,38	-112,45	2,70
<b>DR4 (SF8BW125)</b>	5,78	2,21	-112,50	2,67
<b>DR3 (SF9BW125)</b>	5,58	4,34	-113,38	3,11
<b>DR2 (SF10BW125)</b>	4,56	3,01	-112,00	3,39
<b>DR1 (SF11BW125)</b>	4,58	3,11	-114,38	4,41
<b>DR0 (SF12BW125)</b>	3,75	2,23	-112,82	4,31

Fonte: Autor.

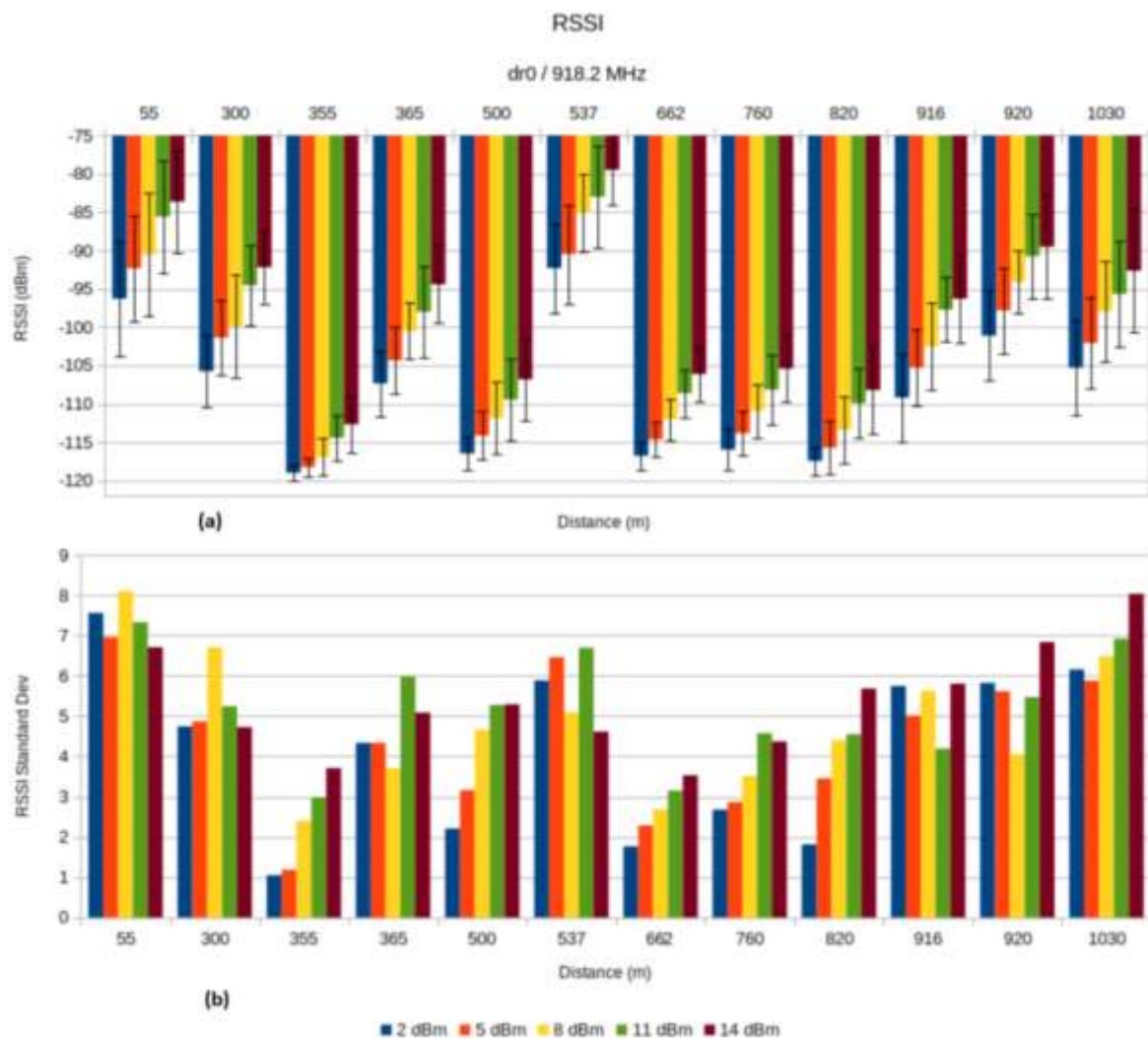
Conforme se observa nas tabelas 7 e 8, a variação de frequência ou data rate não influencia na intensidade de sinal recebido (RSSI) nem na razão sinal-ruído (SNR). De fato, este resultado é esperado uma vez que a RSSI depende mais fortemente da potência transmitida, dos ganhos das antenas e da perda de caminho, a qual para antenas próximas ao solo (caso do endpoint) independe da frequência de transmissão (cf. modelo two-ray ground). Além disso, dado que a intensidade de sinal permaneceu praticamente constante, há pouca variação também na SNR. Isto é esperado, uma vez que a potência de ruído é mais influenciada pela largura de banda, a qual também foi mantida constante entre as taxas de dados (DR) testadas.

Durante este experimento, também se variou a potência de transmissão, mas mantendo-se a taxa de dados (DR) e a frequência de canal fixas, dado que elas não influenciam a SNR e a RSSI de forma significativa. Neste caso, foi utilizada a DR0 na frequência 918,2 MHz. Ainda, se variou a posição (e distância) do modem ao concentrador. Os resultados obtidos de média e desvio padrão de RSSI e SNR são mostrados nas figuras 41 e 42, respectivamente.



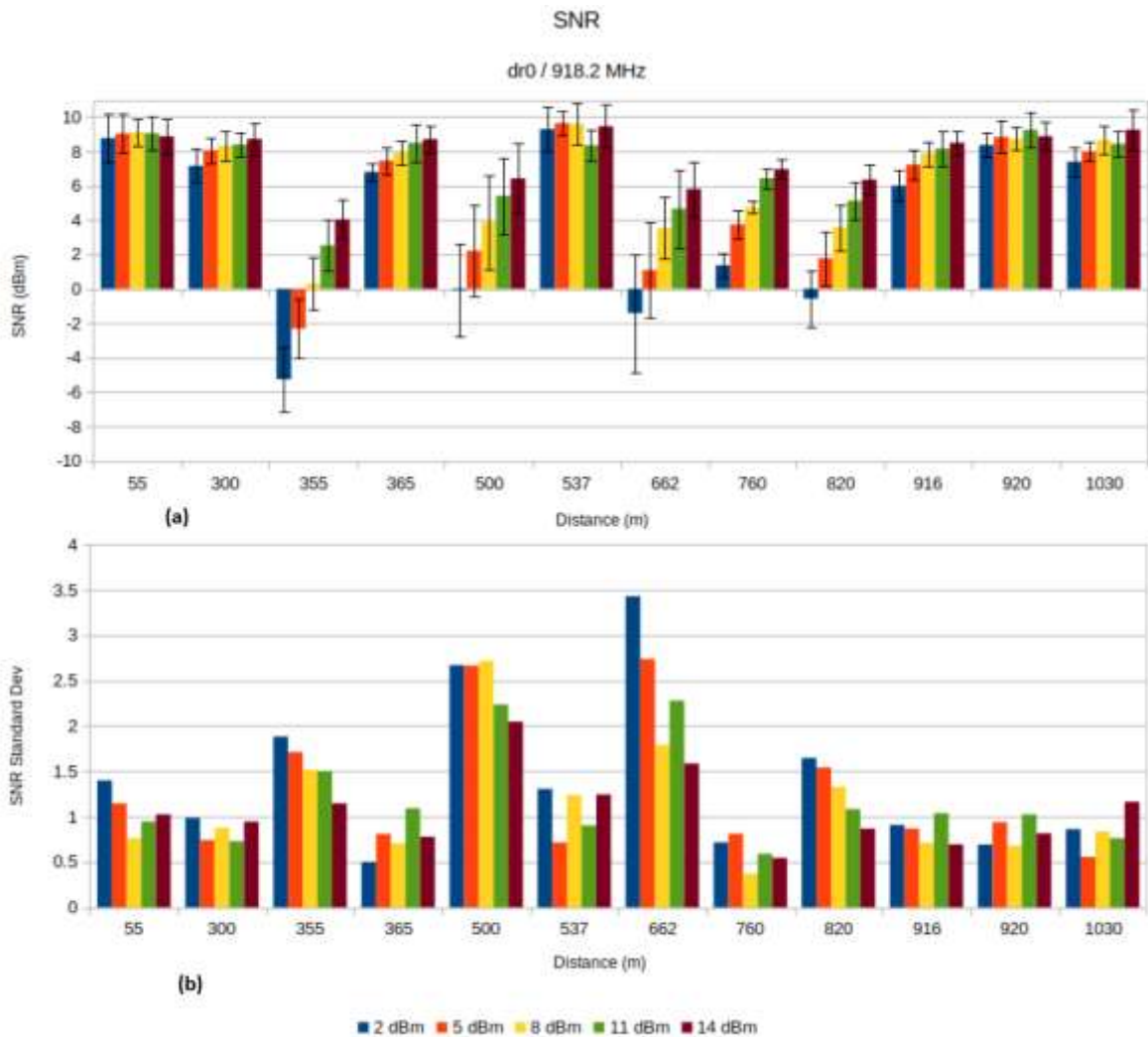
Percebe-se que, conforme esperado, o aumento da potência de transmissão influencia diretamente nas médias e desvios de RSSI e SNR. Ainda, se percebe saturação na SNR nos casos em que a RSSI está muito elevada, indicando possivelmente atuação dos controladores automáticos de ganho do receptor SX1301 de concentrador ou na forma de cálculo da SNR. Já com relação à influência da distância nos valores de RSSI e SNR observados, embora esta influência seja perceptível, não há uma tendência observável. De forma geral, o relevo e os obstáculos entre *endpoint* e concentrador influenciam significativamente na perda de caminho. Este resultado aponta, portanto, para a necessidade de se ajustar adequadamente os parâmetros da comunicação para cada configuração de *endpoint*, em termos de potência de transmissão, elevação e ganho da antena.

Figura 41 – RSSI média (a) e desvio-padrão (b), variando-se distância do endpoint ao concentrador e potência de transmissão com DR0 a 918,2 MHz



Fonte: Autor.

Figura 42 – SNR média (a) e desvio-padrão (b), variando-se distância do endpoint ao concentrador e potência de transmissão com DR0 a 918,2 MHz



Fonte: Autor.

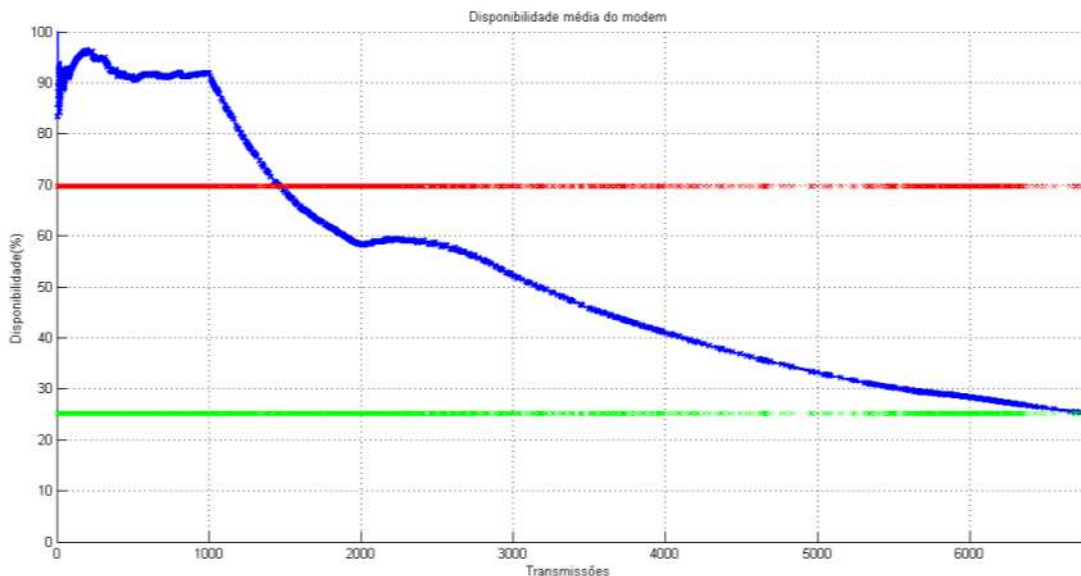
### 4.3.3 Experimento 2: desempenho da comunicação – disponibilidade e confiabilidade

Este experimento teve o intuito de verificar a disponibilidade da comunicação tanto em termos da disponibilidade do modem quanto em termos da disponibilidade medida no modem através da recepção do pacote de confirmação (ACK). Neste contexto, a disponibilidade foi definida como a média entre o número de transmissões confirmadas pelo concentrador pelo total de tentativas de transmissões realizadas. O experimento é descrito a seguir.

### Disponibilidade do modem:

Para realizar este experimento o modem foi configurado para transmitir pacotes com 8 bytes de *payload* a uma taxa de 1 pacote por minuto, variando a taxa de dados de DR0 a DR5 a cada 1.000 pacotes transmitidos. O modem estava localizado a uma distância de 900 m do concentrador em ambiente fechado (dentro do laboratório) e foi configurado para transmitir com a máxima potência (14 dBm) utilizando uma antena omnidirecional com ganho de 2dBi. O resultado obtido é mostrado na figura 43.

Figura 43 – Disponibilidade média do modem transmitindo com potência de 4dBm, com ganho de antena de 2 dBi a 900 m de distância do concentrador em ambiente fechado



Fonte: Autor.

Conforme se percebe pelo gráfico da figura 43, inicialmente a disponibilidade (em azul) está acima de 90% quando operando com taxa DR0, mas cai abruptamente ao passar para taxa DR1, cruzando a linha média de 70% (em vermelho), e mantém o decaimento a cada incremento de DR. De fato, este resultado é esperado, uma vez que o aumento de DR implica em necessidade de maior SNR no receptor para uma decodificação bem sucedida. Por isso, a partir deste experimento, investigou-se se as transmissões estavam chegando ao concentrador (isto é, se a SNR mínima ainda estava sendo satisfeita). Notavelmente, percebeu-se que as transmissões chegavam ao concentrador com DR1 e DR2 (ver figura 44), mas que o modem realizava retransmissões mesmo nestes casos, indicando que, possivelmente, não havia o retorno de ACK por consequência da assimetria de link.

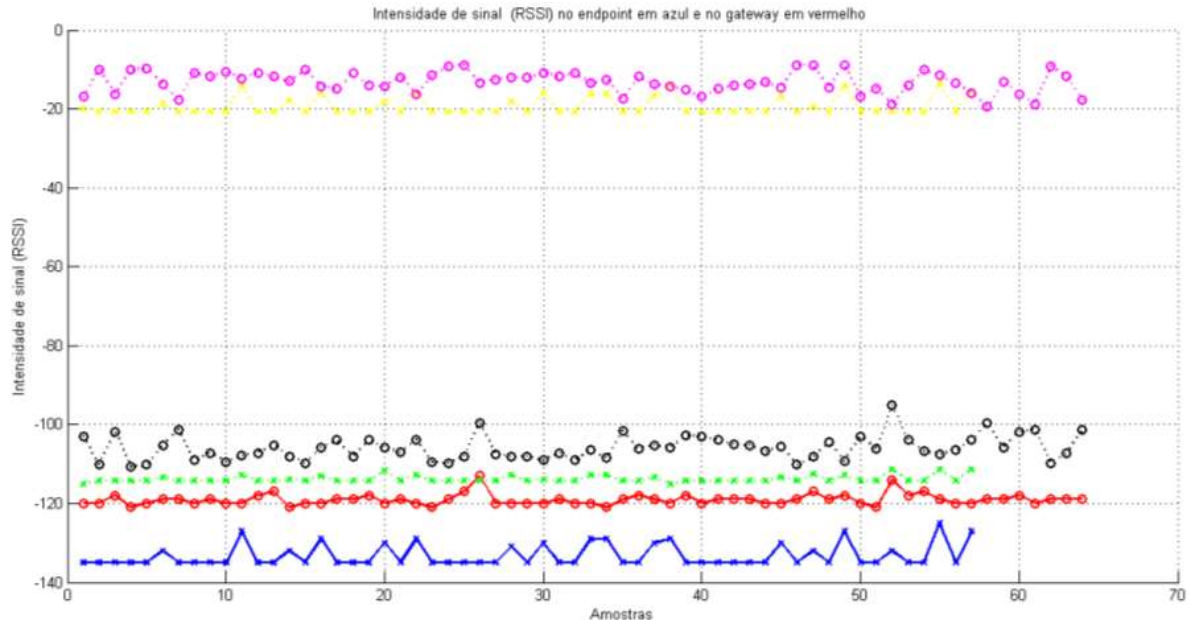
Figura 44 – Painel do servidor mostrando transmissões bem sucedidas até o concentrador com DR1 e DR2, mas atingindo o limite de 3 retransmissões por mensagem. Ganho de antena de 2 dBi a 900 m de distância do concentrador em ambiente fechado

time	frequency	mod.	CR	data rate	airtime (ms)	cnt	dev addr	payload size
▲ 09:30:08	917.4	lor	4/5	SF 10 BW 125	370.7	21687	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:30:03	917.8	lor	4/5	SF 10 BW 125	370.7	21687	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:29:13	916.8	lor	4/5	SF 11 BW 125	741.4	21686	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:29:07	917.2	lor	4/5	SF 10 BW 125	370.7	21686	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:29:02	917.4	lor	4/5	SF 10 BW 125	370.7	21686	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:28:13	917.8	lor	4/5	SF 11 BW 125	741.4	21685	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:28:07	918.2	lor	4/5	SF 10 BW 125	370.7	21685	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:28:02	917	lor	4/5	SF 10 BW 125	370.7	21685	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:27:13	917.4	lor	4/5	SF 11 BW 125	741.4	21684	26 03 18 C9	21 bytes
▲ 09:27:07	918	lor	4/5	SF 10 BW 125	370.7	21684	26 03 18 C9	21 bytes

Fonte: Autor.

Para investigar a hipótese de assimetria de link (isto é, transmissão bem sucedida sem retorno de ACK) decidiu-se analisar a intensidade de sinal recebido no concentrador e a intensidade de sinal recebido no modem, bem como as respectivas SNRs. O resultado pode ser observado na figura 45, e deixa claro que há assimetria de link, com diferença bastante significativa de RSSI e SNR em ambos os sentidos da comunicação (*uplink* e *downlink*). Assim, prejudicando significativamente o recebimento dos ACKs.

Figura 45 – RSSI, nível de ruído e SNR de baixo para cima para uplink (marcados com ‘o’) e downlink (marcados em ‘x’). Legenda: No concentrador, RSSI em vermelho, ruído em preto e SNR em rosa. No modem, RSSI em azul, ruído em verde e SNR em amarelo



Fonte: Autor.

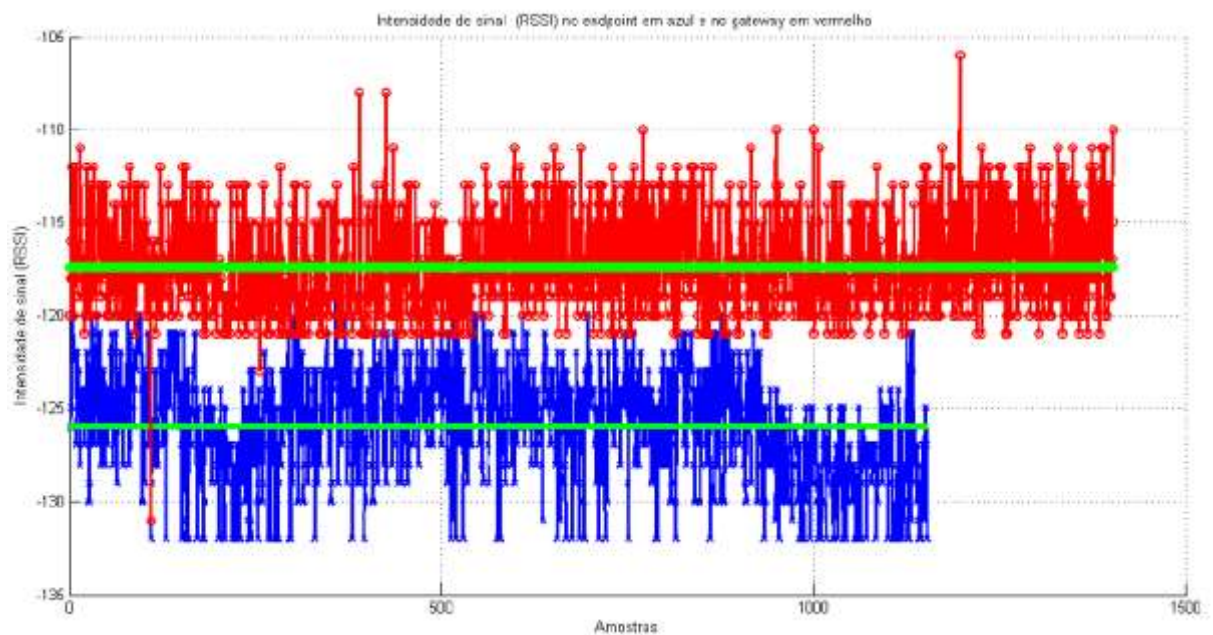
De fato, a assimetria de link é um grande desafio para o projeto do link de comunicação sem fio, principalmente na rede LoRaWAN. Isto se deve não apenas pela impossibilidade de confirmações por parte do concentrador, mas também porque, em consequência, provoca retransmissões, exacerbando o tráfego na rede e impactando negativamente o desempenho da mesma pelo aumento de colisões. Este fato foi recentemente estudado por Pop et al. (2017), os quais consideraram como causa das falhas de ACK a limitação de tempo de serviço (*duty cycle*) do concentrador e, por simulação, mostraram que o desempenho da rede é severamente prejudicado. Entretanto, conforme observado nos resultados, o desempenho pode ser ainda mais prejudicado se for levada em conta a assimetria de link, aqui demonstrada experimentalmente.

### **Disponibilidade da comunicação até o concentrador (taxa de ACK):**

Dado o impacto da assimetria de link observado na disponibilidade medida a partir do modem com base nos ACKs, partiu-se para uma análise da disponibilidade da comunicação até o concentrador. Assim, para este experimento utilizou-se a medição dos pacotes recebidos pelo concentrador e repassados ao servidor de rede. Foi realizada a conexão ao broker através do protocolo MQTT, de onde foram obtidas as informações sobre as transmissões recebidas

no concentrador, incluindo número de sequência, frequência do canal, RSSI e SNR. Ainda, para se analisar mais profundamente, o impacto da assimetria de link, foram empregadas duas configurações de antena no modem: uma antena omnidirecional de ganho 2 dBi e uma antena omnidirecional de ganho 9 dBi. Neste caso, os resultados obtidos para RSSI podem ser verificados nas figuras 46 (para antena de 2 dBi) e 47 (para antena de 9 dBi) e, para SNR, nas figuras 48 e 49, respectivamente.

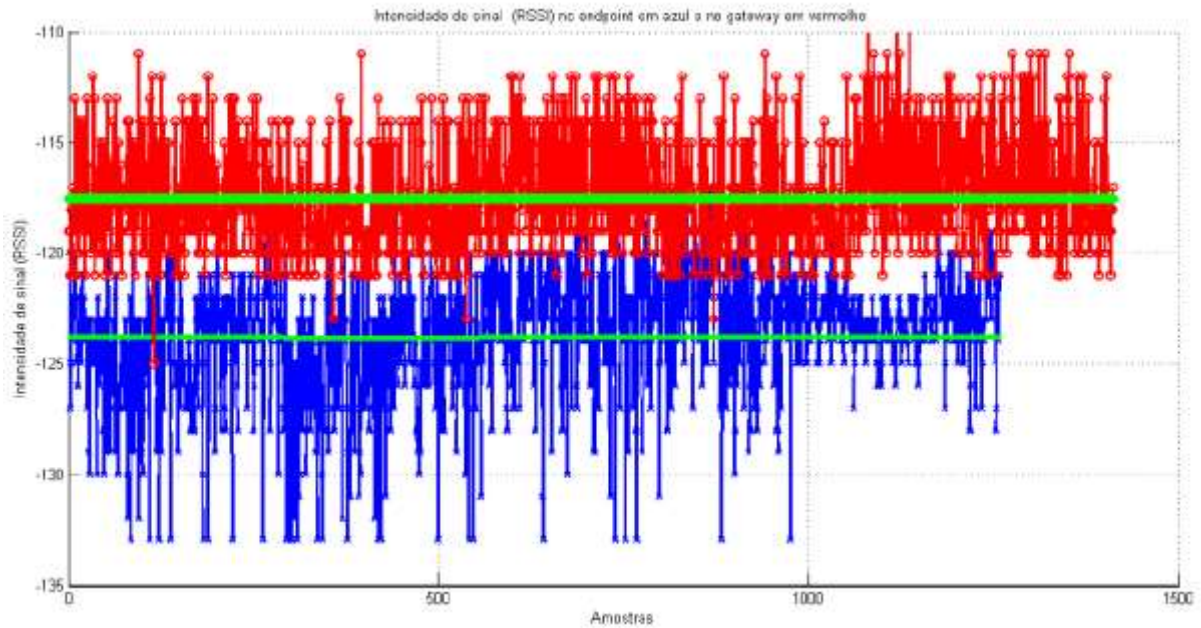
Figura 46 – RSSI do *uplink* (vermelho) e *downlink* (azul). Ganho da antena do modem: 2 dBi



Fonte: Autor.

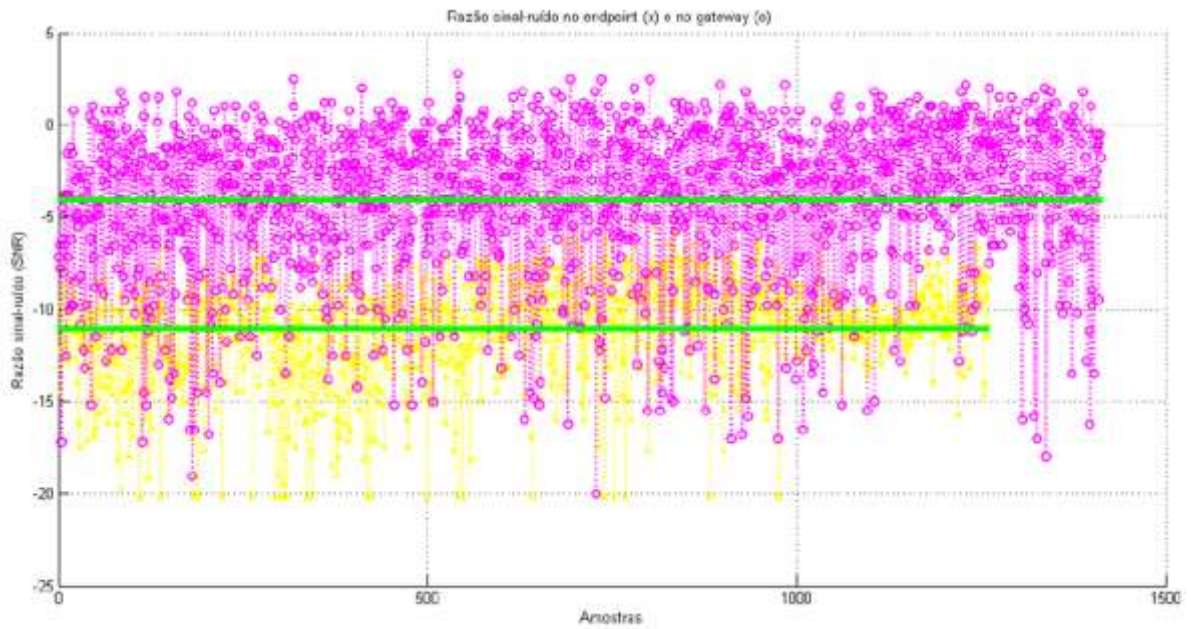


Figura 47 – RSSI do *uplink* (vermelho) e *downlink* (azul). Ganho da antena do modem: 9 dBi



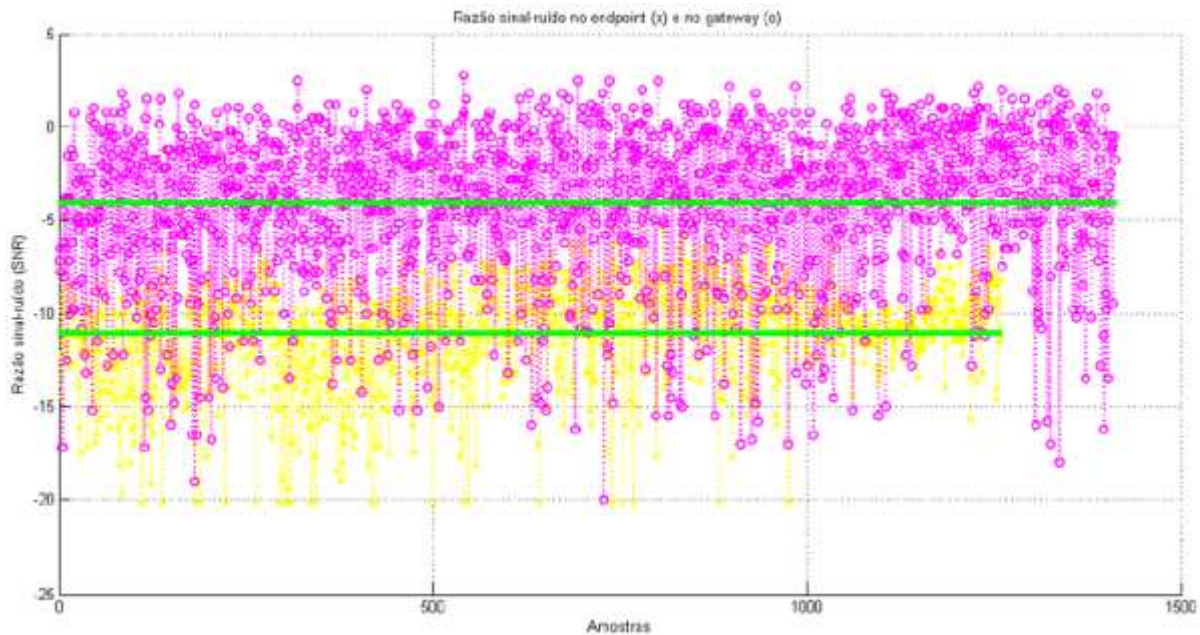
Fonte: Autor.

Figura 48 – SNR do *uplink* (rosa) e *downlink* (amarelo). Ganho da antena do modem: 2 dBi



Fonte: Autor.

Figura 49 – SNR do *uplink* (rosa) e *downlink* (amarelo). Ganho da antena do modem: 9 dBi



Fonte: Autor.

Percebe-se pelas figuras 46, 47, 48 e 49 que foi possível reduzir a assimetria de link elevando-se o ganho da antena no modem. Com a antena de 2 dBi, as diferenças médias de RSSI e SNR de *uplink* e *downlink* foram 8,6 dBm e 11,79 dB, respectivamente; enquanto que, com a antena de 9 dBi, estas diferenças passaram para 6,3 dBm e 7 dB, respectivamente.

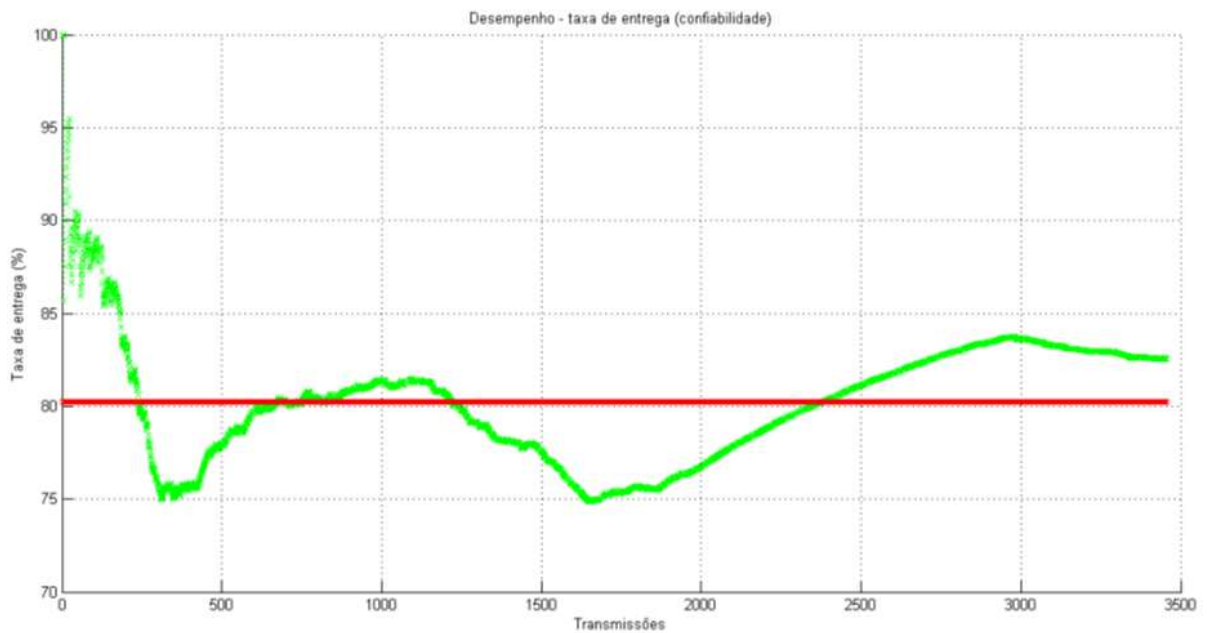
Na sequência, foi medida a disponibilidade da comunicação até o concentrador. Para este experimento, definiu-se a disponibilidade como a razão entre o número de pacotes únicos (não duplicados) recebidos pelo concentrador e o número de transmissões realizadas pelo modem para ambas as configurações de antena e utilizando a taxa DR0 com a máxima potência (14 dBm). A contagem de transmissões foi realizada pelo número de sequência ou contador de quadro, o qual é incrementado a cada transmissão, desprezando as retransmissões. Neste caso, a disponibilidade foi de 86,28% com a antena de 2 dBi e de 91,48% com a antena de 9 dBi.

### **Confiabilidade (taxa de entrega):**

Por fim, também foi medida a confiabilidade da comunicação e a taxa de entrega de pacotes. Para o cálculo da taxa de entrega, foram contabilizados os pacotes recebidos não duplicados no concentrador, através do número de sequência, e o total de pacotes recebidos pelo concentrador incluindo as retransmissões. Os resultados são mostrados nas figuras 50 e 51 para as configurações com antena de 2 e 9 dBi, respectivamente.

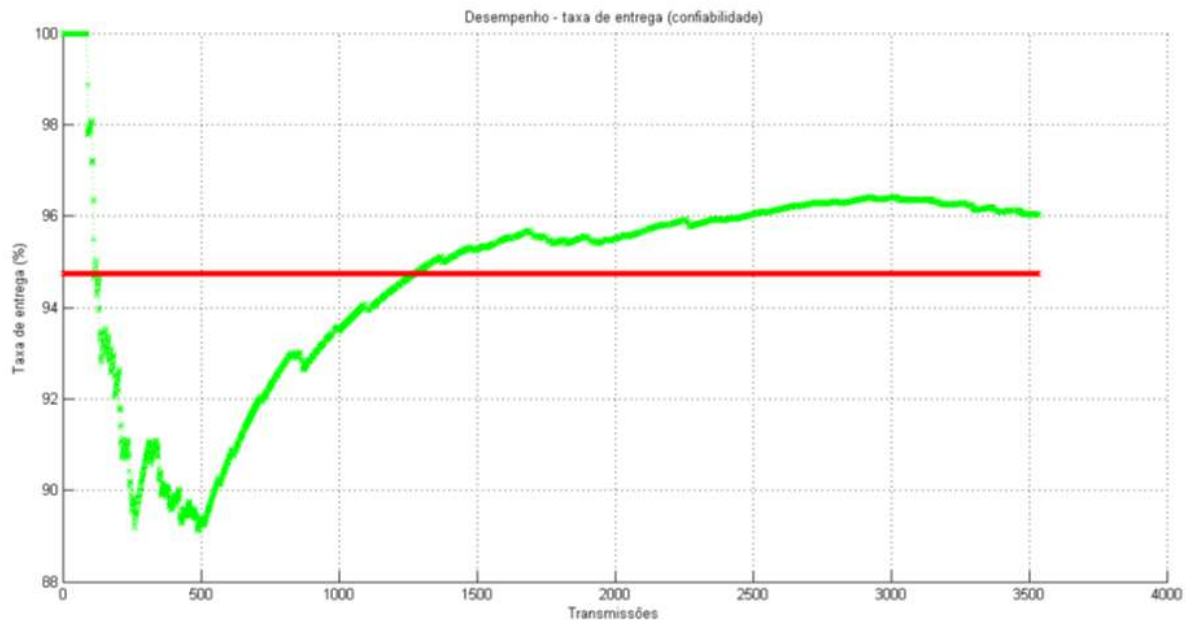


Figura 50 – Taxa de entrega de pacotes (verde) e média (vermelho). Ganho da antena do modem: 2 dBi



Fonte: Autor

Figura 51 – Taxa de entrega de pacotes (verde) e média (vermelho). Ganho da antena do modem: 9 dBi



Fonte: Autor

Conforme se observa pelas figuras 50 e 51, a taxa de entrega de pacotes variou entre 75% a 100% com a antena de 2 dBi, sendo a média de 80,26%. E, com a antena de 9 dBi, a

taxa de entrega variou entre 88% a 100%, sendo a média de 94,73%. Portanto, com a utilização da antena de 9 dBi, foram necessárias menos retransmissões.

#### **4.3.4 Avaliação dos resultados**

Durante esta etapa da pesquisa foram realizados experimentos com o intuito de se analisar o desempenho da rede LoRaWAN piloto localizada na UFSM. Foram realizados experimentos para verificar a intensidade de sinal recebido e o desempenho da rede em termos de disponibilidade e confiabilidade. A partir dos experimentos, foi possível perceber o impacto da simetria dos links de comunicação sem fio no desempenho da comunicação, principalmente em termos de confiabilidade.

Com base nos resultados, pode-se concluir que a utilização de mensagens confirmáveis para o aumento da confiabilidade deve vir acompanhada do ajuste dos links (por ex.: potência de transmissão, ganho da antena) para permitir a recepção dos pacotes de ACK. Caso contrário, a falha de recepção de ACK pode provocar um aumento significativo do tráfego em função das retransmissões de pacotes que chegaram até o concentrador. Isto pode aumentar o número de colisões e piorar o desempenho. Em contrapartida, caso a assimetria dos links não possa ser combatida com o ajuste da antena e potência de transmissão, uma alternativa a ser pesquisada é não utilização de ACKs, mas o controle pelo servidor da rede do número de retransmissões do terminal utilizando taxas de dados menores para operar em condição de baixa SNR. Desta forma, pode-se evitar o uso de ACKs para terminais que requerem um nível menor de confiabilidade e reservar uma porção da capacidade da rede para o envio de ACKs aos terminais com requisitos de confiabilidade mais rígidos.

## 5 CONCLUSÃO

Nesse trabalho de mestrado procurou-se desmistificar um tema complexo na concepção de Redes Elétricas Inteligentes: a Comunicação.

Comunicação não é atividade fim das empresas que trabalham com serviços de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica. Algumas empresas têm um maior conhecimento e disposição para gastos com esse tema, outras nem tanto. Para sistemas de distribuição, equipamentos de comunicação tem um entendimento complexo para inserção como ativo da rede da concessionária, ou seja, no repasse a tarifa. Isso impede que a empresa massifique o investimento e desenvolvimento de conhecimento no tema, na automatização de sistemas ou ao tornar processos inteligentes. Esse problema também é encontrado em indústrias e outras concessionárias que utilizam Sistemas de Aquisição de Dados (SCADA), ou que estão universalizando a inclusão de terminais, elementos gerenciados e sensores conectados (IoT).

Na busca de um protocolo de comunicação que atenda a todos os requisitos de REI e que tenha baixo custo de implantação e manutenção, foi desenvolvido um método utilizando protocolos LPWA com longo alcance que se adequam mais aos requisitos de uma REI em áreas rurais. Hoje as concessionárias, em geral, utilizam serviços contratados de operadoras celulares (empresas que dominam a tecnologia). Porém, em áreas rurais dificilmente o serviços de telefonia celular é suficiente para atender aos requisitos da REI, pois apresenta baixa disponibilidade ou cobertura e tecnologia defasada em relação ao oferecido em meios urbanos. O método foi explicado e exemplificado no capítulo 3.

Ainda existe o desafio de reduzir o custo da implantação da rede *backhaul* e dos serviços relacionados à implementação da rede LoRaWAN. Na aferição de custos realizada nesse trabalho, os custos relativos à rede *backhaul* e serviços podem representar até 77% do custo total de projeto e implantação do sistema, devido à novidade da solução ao nível de exigência de disponibilidade e desempenho dos sistemas de automação. Os serviços de mensuração e estimativa que agregam dados úteis ao ADMS são satisfatórios.

A solução foi implantada e testada com sucesso em área alternativa, conforme apresentado no capítulo 4 dessa dissertação. Hoje o sistema de medição inteligente da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) conta com mais de 50 medidores conectados em tempo real, utilizando LoRaWAN.

No futuro, quando as redes LPWAN de taxa de bits mais altas estiverem em regime permanente pelas operadoras celular, poderão ser ampliados os serviços agregados aos clientes da área URU2 e nas outras subestações para replicar este trabalho.

O design de uma rede LoRaWAN e 5G, do ponto de vista da arquitetura de rede, são idênticos e o modelo pode ser replicado com esta tecnologia RF de acesso, abrangendo a rede *backhaul* (3G, Radio Ponto-Multiponto ou Malha) indicada neste trabalho. Inclusive compartilhando o mesmo concentrador, caso esse possua características adequadas.

O método proposto e a solução implantando na pesquisa também podem ser aprimorados e aplicados em sistemas inteligentes análogos à Redes Elétricas, como redes de abastecimento de água, gás ou em plantas industriais.

## 5.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Podem-se destacar como principais contribuições deste trabalho:

- A definição e caracterização de um sistema de comunicação para REI;
- A definição de critérios para avaliar as alternativas para solução de RF para IoT;
- O uso de uma nova tecnologia, inédita no país para essa aplicação;
- A definição da especificação técnica completa para licitação da solução;
- A definição de padrões corporativos em uma grande empresa para o tema;
- A seleção de diferentes topologias da rede para melhorar o desempenho da solução;
- A avaliação de novos equipamentos ou softwares para comunicações IoT.

## 5.2 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Como desenvolvimento futuro deste trabalho propõe-se as seguintes abordagens:

- Implantação da solução num cenário produtivo utilizando equipamentos e fornecedores consolidados no uso de LoRaWAN;
- Incorporar junto ao estudo para o uso da tecnologia 5G para IoT;
- Aplicar a solução de comunicação LoRaWAN em redes de distribuição de água.

### 5.3 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO

No decorrer do Mestrado, até o momento, foram publicados os seguintes trabalhos:

#### **Trabalhos publicados em congressos:**

1. SOARES E SILVA, F. E., PORTO, D. , BARRIQUELLO, C.H. , BERNARDON, D. P. , FAGUNDES, D. R. . Arquitetura de tráfego de dados para redes elétricas inteligentes em áreas rurais. In: X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 2016, Gramado - RS. X CBPE, 2016.

2. SOARES E SILVA, F. E. , PORTO, D. , RAMOS, M. BARRIQUELLO, C.H. , BERNARDON, D. P. , CANHA, L. N. “Comunicação Sem Fio Com Ampla Cobertura Para Redes Elétricas Inteligentes em Meio Rural”. In: XXIV SNPTEE Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica, 2017, Curitiba- PR. XXIV SNPTEE, 2017.

3. SOARES E SILVA, F. E. , PORTO, D. , HOKAMA, W. S. BARRIQUELLO, C.H., BERNARDON, D. P. , CANHA, L. N. “Implantação de Rede LoRaWAN para Rede Elétrica Inteligente em área Suburbana e Rural”. In: XXIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – de 20 a 23 de novembro, Fortaleza - CE – Brasil. SENDI, 2018.

4. BARRIQUELLO, C. H. SOARES E SILVA, F. E. BERNARDON, D. P. CANHA, L. N. RAMOS, M. J. S. PORTO D. S. "Performance assessment of a low power wide area network in rural smart grids,". Em: 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Heraklion, 2017, pp. 1-4. DOI: 10.1109/UPEC.2017.8231904 . Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8231904&isnumber=8231858>>

5. SOARES E SILVA, F. E., PORTO, D., HOKAMA, W. S. BARRIQUELLO, C.H., BERNARDON, D. P., CANHA, L. N. "Deployment of LoRA WAN Network for Rural Smart Grid in Brazil,". Em: IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA), Lima, 2018, pp. 1-5. DOI: 10.1109/TDC-LA.2018.8511646 Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8511646&isnumber=8511635>>.

**Capítulos de Livros:**

1. BARRIQUELLO, C. H. SOARES E SILVA, F. E. BERNARDON, D. P. CANHA, L. N. RAMOS, M. J. S. PORTO D. S. “Fundamentals of Wireless Communication Link Design for Networked Robotics”. Livro - Service Robots. Editor - Antonio J. R. Neves. Capítulo 7. SN - 978-953-51-3723-8 - Editora IntechOpen – Rijeka – Croácia , dez de 2017 , DOI: 10.5772/intechopen.69873 . Disponível em: < <https://www.intechopen.com/books/service-robots/fundamentals-of-wireless-communication-link-design-for-networked-robotics>>

## REFERÊNCIAS

- ACTILITY. **Customer Stories** NNNCo. Disponível em: <[https://www.actility.com/wpcontent/uploads/2017/03/Customerstories\\_NNNCo\\_WEB.pdf](https://www.actility.com/wpcontent/uploads/2017/03/Customerstories_NNNCo_WEB.pdf)>. Acesso em: dez. 2018
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2ª ed. Brasília, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL) –. Resolução nº 680, 27 de junho 2017. Disponível em: <[www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680](http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2017/936-resolucao-680)>. Acesso em: dez. 2016
- AUGUSTIN, A. et al. **A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things**. Sensors 16.9 (2016): 1466.
- AUSTRALIAN ENERGY REGULATOR (AER). **Overview Regulatory Proposal 2020-25 - January 2019**". Disponível em <<https://www.aer.gov.au/system/files/Ergon%20Energy%20-%201.005%20-%20Overview%20Regulatory%20Proposal%202020-25%20-%20January%202019.pdf>>. Acesso em: jan. 2019.
- BARRIQUELLO, C. H.; et al. **Fundamentals of Wireless Communication Link Design for Networked Robotics**. In: Service Robots. Editor (Orgs): Antonio J. R. Neves. Capítulo 7. SN - 978-953-51-3723-8. Ed. IntechOpen. Rijeka. Croácia. dez 2017 , DOI: 10.5772/intechopen.69873 . Disponível em: < <https://www.intechopen.com/books/service-robots/fundamentals-of-wireless-communication-link-design-for-networked-robotics>> Acesso em: mai. 2018.
- BRANQUINHO, M.; COSTA, J. A.; FILHO, J. R. F. **Painel Evolução: Segurança Cibernética para Empresas de Serviços Públicos de Missão Crítica**. UTCAL SUMMIT, 2016.
- CAPGEMINI. **Advanced Distribution Management Systems**. 2012. Disponível em <<https://www.ca.capgemini.com/advanced-distribution-management-systems>>. Acesso em: mai. 2017.
- COCHENOUR, G.; OCHOA, R. **Distribution Network Model Readiness for Advanced Distribution Management Systems**. Institute of Electrical and Eletronic Engineers (IEEE) 2014.
- DO, M. T. et al. **Interference Modelling and Analysis of Random FDMA schemes in Ultra Narrowband Networks**. In: The Tenth Advanced International Conference on Telecommunications, AICT 2014, pp. 132–137.doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254530. doi: 10.1109/ISC2.2016.7580783.
- FALCÃO, D. M. **Smart Grids e Microredes: O Futuro Já é Presente**. In: Simpósio se Automação de Sistemas Elétricos, 9.,2009, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: - VIII SIMPASE, 2009.

FILHO, H. G. S.; FILHO, J. P.; MORELI, V. L. **The adequacy of LoRaWAN on smart grids: A comparison with RF mesh technology.** In: International Smart Cities Conference (ISC2) - Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Trento, 2016, p. 1-6.

GÜNGÖR et al. **Smart Grid Technologies: Communication Technologies And Standards.** In: Institute of Electrical and Electronic Engineers Transactions On Industrial Informatics, Vol. 7, No. 4, Pp. 529-539. Nov. 2011.

HAXHIBEQIRI, Jetmir et al. (2017). **LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements.** Sensors. 2017. 1193. 10.3390/s17061193.

HUAWEI-ELTE. **Huawei e Polícia Militar modernizam a comunicação com rádios digitais e tecnologia eLTE** Disponível em <[https://www.youtube.com/watch?v=Cof\\_XZQ2yQc](https://www.youtube.com/watch?v=Cof_XZQ2yQc)>. Acesso em: Jan. 2019.

INFRARED DATA ASSOCIATION (IrDA). **Advantages of IrDA (also some of its disadvantages).** Disponível em <[irda.org](http://irda.org)>. Acesso em: mai. 2016.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS (IEEE). **802.15.7-2011 Standard for Local and Metropolitan Area Networks--Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light.** In IEEE Std 802.15.7-2011, vol., no., pp.1-309, Sept. 6 2011 doi: 10.1109/IEEESTD.2011.6016195. Disponível em <[standards.ieee.org/getieee802](http://standards.ieee.org/getieee802)>. Acesso em: mai. 2017.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS (IEEE). **Standard for Low-Rate Wireless Networks.** In IEEE Std 802.15.4-2015 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2011), pp.1-709, April. 2016. doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7460875.

ITU-T. **Developing the ICT ecosystem to harness. Internet-of-Things (IoT).** Sami Tabbane. 28-30 June 2017 – Disponível em [https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Africa/Documents/IoT\\_Technical%20Overview%20of%20the%20Ecosystem\\_v2\\_27062017.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/Africa/Documents/IoT_Technical%20Overview%20of%20the%20Ecosystem_v2_27062017.pdf), acesso em dezembro de 2017.

KAHN, J. M.; BARRY, J. R., **Wireless infrared communications.** In Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 2, pp. 265-298, Feb 1997. doi: 10.1109/5.554222.

KUZLU, M.; PIPATTANASOMPORN, M.; RAHMAN, S. **Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN,** Computer Networks 67 (2014) 74–88, 2014.

LORA ALLIANCE. **LoRa Specification V1.0.2.** [www.lora-alliance.org](http://www.lora-alliance.org) LoRa Alliance, Tech. Rep., July 2016.

LORAWAN. **What is LoRaWAN.** Disponível em <<https://lora-alliance.org/resource-hub/what-lorawantm>>. Acesso em: mar. 2018.

LUIJF, Eric & H. BURGER & KLAVER, Marieke. (2002). **Critical Infrastructure Protection in The Netherlands: A Quick-scan.** In U.E. Gattiker (Ed.), EICAR 2002 Conference Best Paper Proceedings (ISBN: 87-987271-2-5) 19 pages. Copenhagen: EICAR (2003).



MARGELIS, G. et al. **Low Throughput Networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations**. In: 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT). Institute of Electrical and Eletronic Engineers (IEEE). Milan, 2015, p. 181-186. doi: 10.1109/WF-IoT.2015.7389049.

MME – Ministério de Minas e Energia do Brasil. **Relatório Smart Grid**. Disponível em: [http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/Relatxrio\\_GT\\_Smart\\_Grid\\_Portaria\\_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e1157](http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e1157). 2010. Acesso em: mai. 2017.

MONTENEGRO, G. et al. **Transmission of IPv6 Packets Over IEEE 802.15.4 Networks**. Disponível em: <<http://www.ietf.org/rfc/rfc4944.txt>>. Sep. 2007.

MOSSAAD, M. S. HRANILOVIC, A. S. e LAMPE, L. **Visible Light Communications Using OFDM and Multiple LEDs**. In: Institute of Electrical and Eletronic Engineers (IEEE) - Transactions on Communications, vol. 63, no. 11, p. 4304-4313, Nov. 2015. doi: 10.1109/TCOMM.2015.2469285.

NOLAN, K.E. GUIBENE, W. e KELLY, M.Y. **An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things**. In: International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Paphos, 2016, p. 439-444. doi: 10.1109/IWCMC.2016.7577098.

PETAJAJARVI, J. *et al.* **On the coverage of LPWANNs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology**. In: 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). Copenhagen, 2015, pp. 55-59. doi: 10.1109/ITST.2015.7377400.

POP, A; et al. **Does Bidirectional Traffic Do More Harm Than Good in LoRaWAN Based LPWA Networks?** In: arXiv preprint arXiv:1704.04174 (2017). Disponível em <https://arxiv.org/pdf/1704.04174.pdf>. Acesso em: jan. 2019.

RAJAGOPAL, S.; ROBERTS, R. D.; LIM, S. K. **IEEE 802.15.7 visible light communication: modulation schemes and dimming support**. In: Institute of Electrical and Eletronic Engineers (IEEE) Communications Magazine, vol. 50, no. 3, p. 72-82, March 2012. doi: 10.1109/MCOM.2012.6163585.

REYNDERS, B; MEERT, W; POLLIN, S. **Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication**. In: 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), Thessaloniki, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICT.2016.7500415.

RISINGHF. **Manuais dos Rádios: HRF2S008, RHF3M076**. Disponível em <<https://www.risinghf.com>>. Acesso em: jun. 2017.

RIZZETTI, T. A. **Novos métodos para prover segurança à comunicação no âmbito de redes elétricas inteligentes**. 2018. 194 f. Tese (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, RS, 2018.

RODRIGUEZ, R. **Smart Grids – opportunities and challenges for the industry**. Disponível em < <https://cpsweek2017.ece.cmu.edu/past/2016/slides/slidesRodriguez.pdf>>. Acesso em: mai. 2017.

ROTH, Y.; et al. **Turbo-FSK, a physical layer for low-power wide-area networks: Analysis and optimization.** In: Comptes Rendus Physique, 13 December 2016, ISSN 1631-0705, Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.crhy.2016.11.005>>. Acesso em: mai. 2017.

ROTH, Y.; et al. **Turbo-FSK: A new uplink scheme for low power wide area networks.** In: 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC) - Institute of Electrical and Eletronic Engineers (IEEE) , Stockholm, 2015, p. 81-85. doi: 10.1109/SPAWC.2015.7227004.

SAGENCOM. **Location-Enabled LoRa™ IoT Network: “Geo-LoRa-ting” your assets,** M2M Innovation World - 2018.

SANCHEZ-GOMEZ, J; SANCHEZ-IBORRA, R; SKARMETA, A. **Transmission Technologies Comparison for IoT Communications in Smart-Cities.** In: GLOBECOM 2017 - Global Communications Conference. Institute of Electrical and Eletronic Engineers (IEEE). Singapore, 2017, p. 1-6.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Advanced Distribution Management System.** Disponível em: <<http://www.schneider-electric.com/b2b/en/solutions/for-business/s4/electric-utilities-advanced-distribution-management-system-adms/>>. Acesso em: mai. 2017.

SIGFOX. **About SIGFOX.** Disponível em: <<http://www.sigfox.com/en/#!/about.>>. Acesso em: mai. 2016.

SILVA, F. E. S.; et al. **Arquitetura de tráfego de dados para redes elétricas inteligentes em áreas rurais.** In: X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético (CBPE), Gramado, RS, 2016.

SOARES E SILVA; et al. **Comunicação Sem Fio Com Ampla Cobertura Para Redes Elétricas Inteligentes em Meio Rural.** In: XXIV Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica – SNPTEE. Curitiba, PR, 2017.

SOARES E SILVA; et al. **Implantação de Rede LoRaWAN para Rede Elétrica Inteligente em área Suburbana e Rural.** In: XXIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI. Fortaleza, CE, Novembro, 2018.

SIRADEL. **S\_IoT – Internet of Things network engineering.** Disponível em <[https://www.siradel.com/software/connectivity/s\\_iot/](https://www.siradel.com/software/connectivity/s_iot/)>. Acesso em: jan. 2019.

THE THINGS NETWORK. **Servidor da Rede LoRa.** Disponível em: <[www.thethingsnetwork.org](http://www.thethingsnetwork.org)>. Acesso em: mai. 2017.

UNITED STATES NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **Guidelines for Smart Grid Cybersecurity NISTIR 7628 Revision 1.** [S.l.], 2014. v. 1, n. September, 290 p.

ZIGBEE. **Specification Version 3.0.** Disponível em: < <http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/zigbee/>>. Acesso em: dez. 2016.

## **ANEXO - ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DO SISTEMA DE TELECOMUNICAÇÃO UTILIZANDO TECNOLOGIA LORAWAN**

Este descritivo técnico teve o objetivo de detalhar as necessidades para a implantação, em regime de *turn-key*, de um sistema de telecomunicações utilizando a tecnologia LoRaWAN do projeto de P&D da ANEEL PA-0038.

Esta especificação não abrange a instalação e/ou configuração de soluções além das descritas abaixo.

### **1) Localização e quantitativo de equipamentos da rede elétrica**

Para rede elétrica inteligente de baixa densidade, onde o seu ponto de acesso à rede operativa da RGE Sul será à subestação (URU2) - Rodovia BR 290, S/N, Lat. -29.901623, Log. -56.725000.

A área de cobertura totaliza aproximadamente 4.200 km<sup>2</sup>.

Quantitativo de equipamento da rede elétrica a serem monitorados pela rede LoRa:

- Tele medição para 228 clientes, mais 10% de equipamentos sobressalentes;
- Automação para 22 pontos da rede elétrica, mais 10% de equipamentos sobressalentes;
- 10 PMU's a serem definidas durante a implantação da rede sem interferir no projeto de cobertura;
- 10 Sensores de Banco de Capacitores e Transformadores de Distribuição.

### **2) Conceito a ser aplicado no Sistema**

A Tecnologia escolhida para o sistema é a LPWA (Low Power Wide Área) e num protocolo de banda aberta, LoRA.

LoRaWAN: O protocolo LoRaWAN é um padrão global que oferece um alcance longo (até 15 km) bidirecional, comunica com consumo muito baixo de energia, permitindo operar até dez anos sem troca de bateria. LoRaWAN usa bandas de rádio ISM (Industrial, Científico, Medicinal) não licenciadas para Implantações de rede econômicas a banda disponível para a implantação é a 902-915MHz por não ser necessária a licença.

Solução LoRaWAN – Classe C com thp esperado de até 50 kbps por *endpoint* e mínimo de 1 kbps por *endpoint*.

Utilização de um Concentrador central na SE URU2 com rede MPLS de 10Mbps. O acesso MPLS será fornecido pela CPFL.

### 3) Descrição dos Materiais e Serviços

#### MATERIAIS:

Faz parte do fornecimento todos os equipamentos necessários para a implantação do sistema de telecomunicações, como segue:

#### - NETWORK SERVER:

- Full, two-way 900-928 MHz LoRa™ communications;
- 100mW transmitter on meter /500mW transmitter on data collectors;
- ultra-long range spread spectrum;
- Long Range = high sensi,-137 dBm (GSM typ -108), 3 to 15 km range;
- Robust security and encryption;
- Dynamic network discovery and self-healing operations;
- Scheduled and on-demand meter reads;
- Alarm detection and clearing;
- Time synchronization and management;
- Support for a wide range of meters and forms;
- Continuous neighbor monitoring and route calculation;
- Over-the-air meter programming;
- Comunicação em ETH com IP estático de cada *endpoint* (especificado mapeamento de endereço em conjunto numa planilha) para os sistemas SCADA e MDC.

#### - CONCENTRADOR – LORAWAN:

- Roteador ou switch L3 com portas ETH disponíveis para integração de backhaul (2 no mínimo);
- Possibilidade de atuação com 3 setores de RF (915 ou 433 MHz);
- 2 slots para SIM Cards 3G ou 3G/4G ;
- Possibilidade de configuração de VPN Ipsec;
- Comunicação com o Network Server em 3G ou Ethernet ;
- Equipamento do tipo rugged para locação em poste de telecom na altura de 9 m;
- Proteção IP67 para rádio e IP65 para roteador (neste caso deverá ser previsto gabinete para afiação em 9 m no poste de telecom;
- Aquisição de roteadores concentradores LoRA com *backhaul* a ser definido até a central em URU2.

- TERMINAIS – LORAWAN:

- NIC LoRa integrado no medidor (ET de Medidores Eletrônicos);
- Conversor de interface LoRAWAN-ETH e LoRAWAN-RS232;
- Os casos de necessidade de conversores serão discutidos com a CPFL durante o andamento do projeto podendo chegar a 300 conversores necessários;
- 32 é o número mínimo a ser previsto nessa proposta.

- SISTEMA DE COMUNICAÇÃO COMPLEMENTAR

- Sistema de comunicação complementar para interconectar a SE Uruguaiana, ponto de acesso para a rede operativa da RG Sul, com os concentradores LoRa.

- ESTRUTURAS VERTICAIS PARA CONCENTRADOR LORAWAN:

- Aquisição de 10 postes de 23 metros, conforme padrões já estabelecidos pela distribuidora, para instalação dos concentradores na área de estudo, com predição já realizada.

**SERVIÇOS:**

Os serviços agregados a essa proposta são:

- LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES E PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES -  
WORKSTATEMENT:

Este trabalho consiste em analisar a estrutura atual e planejar as configurações de acordo com o ambiente proposto.

Esta etapa deverá ser feita por um engenheiro que irá analisar toda informação recebida e discutida com as equipes internas e da CPFL desenvolvendo os pontos de controle e testes para cada etapa da implantação, caso necessário.

Definição de medidores com radio LORA integrado ou com *endpoint* conversor LORA -> ETH ou LORA->RS232

Definição dos demais equipamentos e suas interfaces de integração com os equipamentos de campo e sistemas de medição (FATURAMENTO) e operação (SCADA);

- PREDIÇÃO DE RF – LORAWAN:

Todos pontos smart meter e smart grid (arquivos xls) devem ter cobertura indoor preferencialmente ou outdoor obrigatoriamente;

Considerar todos terminais a 1,8 m de altura para medidores e 9 m para pontos de automação;

Enviar o arquivo com o projeto apresentando a alocação dos concentradores e o nível de recepção de todos terminais.

A predição da cobertura deverá ser realizada por profissionais/engenheiros com conhecimentos na tecnologia, remotamente ou in loco no site de Campinas, utilizando softwares de predição adequados para tecnologia IoT/LPWA. Uma licença do software de predição deve ficar à disposição da CPFL/UFSM pelo período do projeto (até 04/2019).

O Fornecedor deve procurar limitar o número de concentradores no sistema em 10 unidades e utilizar como premissa de predição a estrutura de poste de até 27m com o equipamento alocado em gabinete IP65 fixado a 9 m no poste de telecom (concentrador de RF LoRAWAN).

- INSTALAÇÕES EM CAMPO:

- Configuração, instalação e comissionamento do Network Server nas instalações da CPFL;
- Configuração, instalação e comissionamento dos concentradores LoRa nas 10 estruturas verticais de até 27 m na área de estudo conforme definição de alocação dos concentradores na etapa de predição;
- Configuração e testes em bancada dos terminais em conjunto com as equipes de campo da RGE Sul.

- INTEGRAÇÃO COM OS SISTEMAS EXISTENTES:

- Integração completa com os sistemas existentes SCADA e Faturamento, conforme Integração completa com os sistemas existentes SCADA e Faturamento.