

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

Leonardo Adam

**DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DE SOLUÇÃO PARA
COMUNICAÇÃO BIDIRECIONAL DE LONGO ALCANCE COM
MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Santa Maria, RS
2022

Leonardo Adam

**DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DE SOLUÇÃO PARA COMUNICAÇÃO
BIDIRECIONAL DE LONGO ALCANCE COM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADOR: Prof. Tiago Bandeira Marchesan

Santa Maria, RS
2022

Adam, Leonardo
Desenvolvimento e implantação de solução para
comunicação bidirecional de longo alcance com medidores
de energia elétrica / Leonardo Adam.- 2022.
74 p.; 30 cm

Orientador: Tiago Bandeira Marchesan
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2022

1. Infraestrutura de medição avançada 2. Internet das
coisas 3. LoRaWAN 4. Qualidade de energia elétrica I.
Bandeira Marchesan, Tiago II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

©2022

Todos os direitos autorais reservados a Leonardo Adam. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Milena Bisognin Librelotto, n. 185, Santa Maria - RS

Fone (0xx) 51 99992-6274; End. Eletr.: leonardo.adam96@icloud.com

Leonardo Adam

**DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DE SOLUÇÃO PARA COMUNICAÇÃO
BIDIRECIONAL DE LONGO ALCANCE COM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 21 de setembro de 2022:

Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Carlos Henrique Barrichello, Dr. (UFSM)

Maurício de Campos, Dr. (Unijuí)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente à Universidade Federal de Santa Maria, que desde a graduação, no campus Cachoeira do Sul, me proporcionou uma educação de alto nível, onde tive a oportunidade de ter aulas com grandes professores. Agradeço também ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade de aprimorar ainda mais os meus conhecimentos. Ao Prof. Dr. Tiago Bandeira Marchesan pela orientação, apoio e paciência ao longo dessa jornada, e também ao Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon e ao Prof. Dr. Carlos Henrique Barriquello, pela troca de ideias e participação no projeto.

À toda a equipe Fox IoT por toda a colaboração em todo o desenvolvimento desse trabalho e também pela forte amizade criada nesse período. Em especial ao Me. Lucas Maziero, pela colaboração no desenvolvimento de firmware, ao Me. Filipe Gabriel Carlotto pelos ensinamentos para desenvolvimento de hardware, ao Eng. Flávio Garlet Reck pelo auxílio nas simulações de rede e ao Bac. Fernando Vedoin Garcia pelo apoio com o software de gerenciamento.

Agradeço ao meu irmão, por sempre me incentivar a estudar e buscar as melhores oportunidades, à minha mãe, por sempre acreditar no meu potencial e me apoiar independente da situação, e em especial ao meu pai (in memoriam), que acabou nos deixando nos últimos dias dessa jornada. Ele, que em muitos momentos foi minha maior motivação, que apesar de nunca ter me cobrado em relação aos estudos, sempre trabalhou muito para que nunca me faltasse nada durante esses anos de estudo, isso era o necessário para que nos momentos difíceis eu tivesse determinação para seguir, pois desapontá-lo não era uma opção.

À empresa Mux Energia pelo apoio, confiança e toda a troca de informações que muito contribuíram para os resultados alcançados com esse trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (131522/2020-5).

RESUMO

DESENVOLVIMENTO E IMPLANTAÇÃO DE SOLUÇÃO PARA COMUNICAÇÃO BIDIRECIONAL DE LONGO ALCANCE COM MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

AUTOR: Leonardo Adam

ORIENTADOR: Tiago Bandeira Marchesan

Nos últimos anos, os setores de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica tem passado por mudanças. Novos tipos de carga são inseridas na rede, tecnologias estão sendo implementadas e novos padrões estão sendo estabelecidos. Com isso surge a necessidade de uma melhoria no acompanhamento realizado em todo o sistema elétrico, em especial no setor de distribuição de energia elétrica, o setor que apresenta o maior deficit tecnológico no sistema. A partir disso, esse trabalho apresenta o desenvolvimento e implantação de uma solução para a comunicação bidirecional de longo alcance com medidores de energia elétrica em unidades consumidoras do grupo B utilizando rede LoRa. São definidos os requisitos para o desenvolvimento de um dispositivo que deve realizar a integração entre os medidores eletrônicos de energia e o sistema para a gestão dos dados. Então, é apresentada a metodologia para desenvolvimento de *hardware* e *firmware* embarcado, assim como a estrutura para o *software* de gerenciamento dos dados. Ainda, são apresentados os resultados de simulações, testes laboratoriais e a campo relacionados a comunicação dispositivo-medidor e a comunicação de longo alcance. Ao final são discutidos os resultados obtidos e são feitas sugestões para o aprimoramento do sistema desenvolvido.

Palavras-chave: AMI. IoT. LoRa. LoRaWAN. LPWAN. Qualidade da Energia Elétrica. DRP. DRC.

ABSTRACT

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A SOLUTION FOR LONG RANGE BIDIRECTIONAL COMMUNICATION OF ELECTRICITY ENERGY METERS

AUTHOR: Leonardo Adam

ADVISOR: Tiago Bandeira Marchesan

In recent years, the electricity generation, transmission and distribution has gone through changes. New kinds of loads are inserted on the grid, technologies are being introduced and new standards are being established. With that, there is a requirement of a better monitoring across the whole system, especially on the distribution sector, the sector that has the greatest technological lack in the system. Thus, this master thesis presents the development and the implementation of a solution for a long range bidirectional communication with energy meters of group B consumers with LoRa network. The requirements to the development of a device that should integrate the energy meters with the data management system are defined. Then, the methodology for developing the hardware and firmware of the device are presented, as the structure for the data management software. Also, the results of simulations, laboratory and field tests related to the device-meter and long range communication are presented. Finally, the achieved results are discussed and suggestions to improve the system are done.

Keywords: AMI. IoT. LoRa. LoRaWAN. LPWAN. Electric Power Quality. DRP. DRC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Composição da geração de energia elétrica por tipo em 2018 e 2020.	11
Figura 2.1 – Medidor eletromecânico de energia elétrica.	16
Figura 2.2 – Medidor eletrônico de energia elétrica.	17
Figura 2.3 – Evolução da AMR até o conceito de <i>Smart Grid</i>	18
Figura 2.4 – Comparativo de redes de comunicação para IoT.	19
Figura 2.5 – Espectograma de um pacote transmitido pela rede LoRa.	20
Figura 2.6 – Comparativo de tempo entre os fatores de espalhamento da rede LoRa.	21
Figura 2.7 – Nível de sinal durante a comunicação.	23
Figura 2.8 – Camadas de um sistema LoRaWAN.	24
Figura 2.9 – Arquitetura de um sistema LoRaWAN.	25
Figura 2.10 – Janelas de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> de um dispositivo classe A.	26
Figura 2.11 – Janelas de <i>downlink</i> , <i>uplink</i> e <i>beacons</i> de um dispositivo classe B.	27
Figura 2.12 – Janelas de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> de um dispositivo classe C.	27
Figura 2.13 – Classes de dispositivos LoRa.	28
Figura 2.14 – Utilização das chaves na rede LoRaWAN.	29
Figura 2.15 – Troca e geração de chaves em ativação OTAA. (NOURA et al., 2020) ..	30
Figura 2.16 – Ativação OTAA. (NOURA et al., 2020)	31
Figura 2.17 – Canais utilizados no plano AU915.	33
Figura 2.18 – Diagrama elétrico para a comunicação PIMA.	34
Figura 2.19 – Esquema de troca de mensagens no protocolo NBR 14522.	39
Figura 3.1 – Esquema de instalação do dispositivo.	45
Figura 3.2 – Diagrama base para desenvolvimento de hardware.	45
Figura 3.3 – Módulo para PCI ESP32-WROOM-32D.	46
Figura 3.4 – NodeMCU baseado em ESP32.	47
Figura 3.5 – Diagrama de blocos do funcionamento da leitura de grandezas instantâneas.	49
Figura 3.6 – Mapa da região urbana de Tapejara.	51
Figura 3.7 – Mapa de cobertura da rede LoRa já existente em Tapejara.	52
Figura 3.8 – Arquitetura de funcionamento do <i>software</i>	53
Figura 4.1 – Protótipo desenvolvido.	54
Figura 4.2 – Janela completa de comunicação entre o dispositivo e o medidor.	55
Figura 4.3 – Início do comando enviado pelo dispositivo.	56
Figura 4.4 – Final do comando do dispositivo e início da resposta do medidor.	56
Figura 4.5 – Medidor utilizado para o teste laboratorial.	57
Figura 4.6 – Final da troca de mensagens entre os dispositivos.	57
Figura 4.7 – Local de teste da comunicação LoRa.	58
Figura 4.8 – Relevô entre o dispositivo de teste e o gateway.	59
Figura 4.9 – Instalação do dispositivo na UC1.	60
Figura 4.10 – Relevô entre o gateway e a UC2.	61
Figura 4.11 – UC1 com a antena externa.	61
Figura 4.12 – UC2 com a antena externa no topo do poste de entrada de energia.	62
Figura 4.13 – Resultado simulado da ampliação da rede LoRa em Tapejara.	63
Figura 4.14 – Tela de gráficos da plataforma de gerenciamento.	65
Figura 4.15 – Tela de consulta de indicadores de qualidade.	66
Figura 4.16 – Comparativo antes e depois da troca de antenas na UC4 e UC5.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparativo de envio com diferentes fatores de espalhamento.....	22
Tabela 2.2 – SNR mínimo para cada fator de espalhamento.....	24
Tabela 2.3 – Planos de frequência normalizados no protocolo LoRaWAN.....	32
Tabela 2.4 – Configurações de <i>Data Rate</i>	33
Tabela 2.5 – Formato de dados no pacote PIMA.....	35
Tabela 2.6 – Níveis de tensão em ponto de ligação em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (380/220).....	41
Tabela 2.7 – Dimensão da amostra trimestral exigida a partir de 2021.....	42
Tabela 2.8 – Número de unidades consumidoras a ser adicionada trimestralmente à base de medições.....	43
Tabela 4.1 – Resultado de simulação com a plataforma Radio Mobile.....	58
Tabela 4.2 – Nível de RSSI obtido em 5 envios.....	59
Tabela 4.3 – Resultados obtidos a partir de uma sequência de 10 envios.....	59
Tabela 4.4 – Comparativo entre simulações e valores recebidos.....	62
Tabela 4.5 – Comparativo antes e depois da troca de antenas.....	64
Tabela 4.6 – Comparativo dos sistemas de Kuta e Tapejara.....	69

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	MOTIVAÇÃO	12
1.2	OBJETIVOS	12
1.3	OBJETIVOS DO PROJETO	12
1.4	OBJETIVOS DESTE TRABALHO	13
1.5	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.1.1	Medidor eletromecânico	16
2.1.2	Medidor eletrônico	16
2.2	INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO AVANÇADA	17
2.3	REDE DE COMUNICAÇÃO LORA	19
2.3.1	Taxa de transmissão da rede LoRa	22
2.3.2	RSSI	22
2.3.3	SNR	23
2.4	PROTOCOLO LORAWAN	24
2.4.1	Componentes do sistema	25
2.4.2	Classes de dispositivos	26
2.5	SEGURANÇA DO PROTOCOLO LORAWAN	28
2.5.1	Métodos de ativação dos nós	29
2.5.1.1	<i>Ativação Over-the-Air (OTAA)</i>	29
2.5.1.2	<i>Ativação por Personalização (ABP)</i>	31
2.6	PARÂMETROS REGIONAIS DA REDE LORAWAN	31
2.7	COMUNICAÇÃO COM MEDIDORES	34
2.7.1	PIMA	34
2.7.2	NBR 14522	35
2.7.2.1	<i>Saídas de usuário</i>	36
2.7.2.1.1	Normal	36
2.7.2.1.2	Estendida	36
2.7.2.1.3	Grandezas	37
2.7.2.1.4	Mista	38
2.7.2.2	<i>Comunicação convencional leitor-medidor</i>	38
2.8	FATORES DE QUALIDADE DE ENERGIA	40
2.8.1	Tensão em regime permanente	40
2.8.2	Resolução Normativa nº 871	41
3	DESENVOLVIMENTO	44
3.1	DISPOSITIVO	44
3.1.1	Desenvolvimento de Hardware	45
3.1.2	Desenvolvimento de Firmware	48
3.2	LOCAL DE APLICAÇÃO	50
3.3	SOFTWARE EM NUVEM PARA GERENCIAMENTO E VISUALIZAÇÃO	52
4	RESULTADOS	54
4.1	DISPOSITIVO	54
4.1.1	Testes de comunicação com medidor de energia elétrica	55
4.1.2	Testes de comunicação com a rede LoRa	57

4.1.3	Teste na cidade de Tapejara	60
4.1.4	Simulações de cobertura da instalação dos novos <i>gateways</i>	63
4.2	SISTEMA INSTALADO.....	63
4.3	SOFTWARE DE GERENCIAMENTO	64
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	66
5	CONCLUSÃO	70
5.1	PRÓXIMOS PASSOS DO PROJETO	71
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	71
5.3	PUBLICAÇÕES REALIZADAS RELACIONADAS AO TRABALHO	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1 INTRODUÇÃO

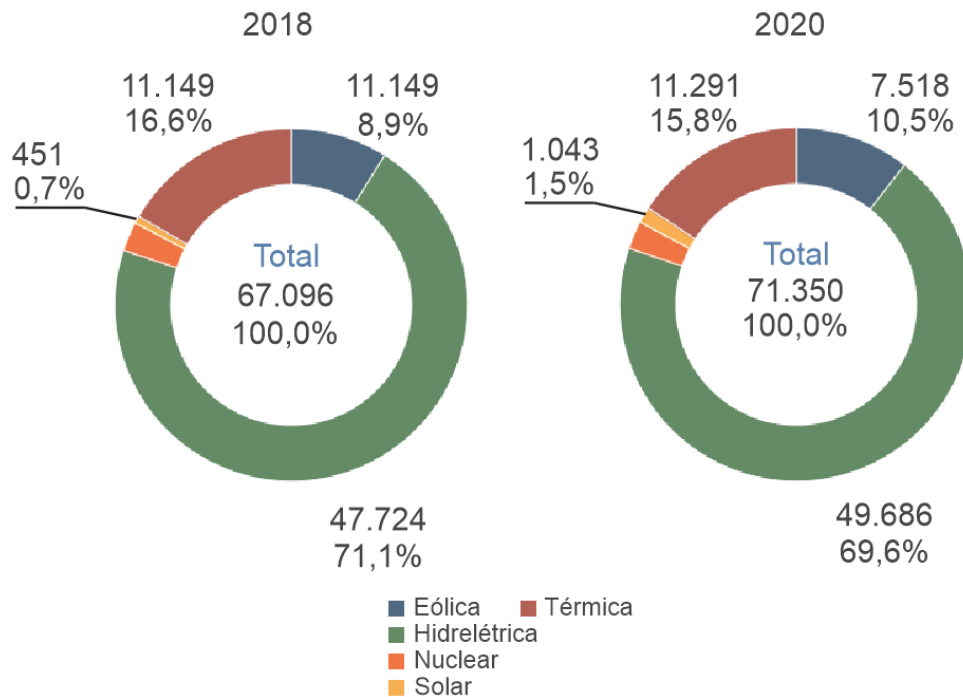
Nos últimos anos tem-se notado uma crescente utilização de dispositivos baseados em internet das coisas (IoT) em diversos setores. Apresentado pela primeira vez em 1999 no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) por Kevin Ashton, o conceito era algo futurista para a época (SURESH et al., 2014). Ashton afirmou que se todos os objetos do dia a dia possuíssem algum tipo de conexão de dados, eles poderiam se comunicar e ser gerenciados por computadores.

Com o passar do tempo e o avanço da tecnologia, principalmente em relação a evolução das redes sem fio (*Wireless*), o termo tornou-se cada vez mais presente em diferentes áreas. A chegada desse conceito a indústria foi um dos fatores que colaborou com a criação da Indústria 4.0, onde tornou possível um melhor acompanhamento e operação da planta industrial a partir de sensores e atuadores distribuídos (REZA et al., 2021). Atualmente é comum ver dispositivos IoT nas residências, em forma de dispositivos de automação, assistentes virtuais e até eletrodomésticos.

Outro setor que vem sofrendo alterações nos últimos anos é o setor elétrico, tanto do ponto de vista tecnológico quanto do ponto de vista operacional. Além do aumento da demanda, houve uma alteração nos padrões de consumo, os horários de pico de consumo alteraram-se, as fontes geradoras não hidrelétricas aumentaram sua participação na composição do Sistema Integrado Nacional (SIN).

O sistema elétrico de potência que, em sua concepção, contemplava um fluxo unidirecional de energia elétrica, no sentido geração-consumidores agora apresenta-se como um sistema bidirecional, onde os clientes também atuam como geradores de energia, na chamada geração distribuída. No Brasil houve um salto no número de instalações de sistemas fotovoltaicos de energia elétrica, sendo este o tipo de geração distribuída com maior quantidade de pontos de instalação. A Figura 1.1 apresenta a composição da geração de energia no Brasil conforme o tipo de usina nos anos de 2018 e de 2021, com os valores gerados expressos em MWh, onde em 3 anos o percentual de energia gerada a partir de fontes fotovoltaicas passou de 0,7% para 1,5%.

Figura 1.1 – Composição da geração de energia elétrica por tipo em 2018 e 2020.



Fonte: Adaptado de ONS (2022)

Novos tipos de cargas, mais sensíveis a oscilações na rede elétrica, trouxeram a necessidade de padrões de qualidade mais rigorosos no fornecimento de energia. Fatores como esses tornaram necessária a modernização do sistema elétrico.

Após a evolução da internet em relação a conectividade sem fio, que removeu a barreira da necessidade de cabeamento para comunicação até os dispositivos, um fator que geralmente aparece como maior dificuldade para a implementação de um sistema baseado em IoT é a disponibilidade de energia para o dispositivo. Dispositivos alimentados através de bateria sempre apresentam alguma restrição para tornarem-se viáveis, ou o dispositivo deve operar de maneira econômica, restringindo a performance, ou deverá ser dotado de uma grande bateria, o que pode tornar economicamente inviável ou impraticável conforme o tipo de instalação.

No caso do setor elétrico, os dispositivos podem estar próximos a um ponto onde há energia elétrica. Com isso, o problema para a alimentação do dispositivo pode ser sanado, desde que haja a compatibilidade entre a tensão de operação do dispositivo e a encontrada no local.

1.1 MOTIVAÇÃO

Embora atualmente um assunto em alta são as redes inteligentes, ou *smart grids*, o sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil encontra-se carente de evolução tecnológica. As concessionárias, na maioria das vezes, possuem um acompanhamento da rede somente nas saídas das subestações, e por vezes nos transformadores de distribuição. A nível de baixa tensão, parte do sistema onde há grande incidência de perdas técnicas, há pouco monitoramento.

Os medidores de energia elétrica, utilizados para faturamento de clientes de baixa tensão, muitas vezes já são encontrados com portas de comunicação local. Para comunicação à distância necessitam da instalação de módulos adicionais, que mudam conforme fabricante, podem ter diferentes *softwares* para gerenciamento, e ainda apresentarem um alto custo, assim como medidores que já possuem a tecnologia integrada.

Tendo em vista essas informações torna-se viável o desenvolvimento de um dispositivo de comunicação multiprotocolo que possa atender a comunicação com diferentes medidores de energia elétrica. Com isso, além de possibilitar o uso de medidores de diferentes fabricantes no mesmo sistema de gerenciamento, ainda torna possível a modernização dos medidores já operantes nos clientes da concessionária.

O presente trabalho faz parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) ANEEL PD-00401-0005/2020 intitulado "Solução Inovadora de Comunicação de Longo Alcance Bidirecional de Baixo Custo para Leitura e Gerenciamento Remoto de Unidades Consumidoras Classe B em Áreas Urbanas, Suburbanas ou Rurais". O projeto está sendo desenvolvido em conjunto entre a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), a concessionária Mux Energia e a empresa Fox IoT.

1.2 OBJETIVOS

O projeto visa desenvolver uma solução inovadora de comunicação de longo alcance bidirecional de baixo custo compatível com medidores eletrônicos de energia, para fins de corte, religamento e faturamento, adequada para instalação em áreas urbanas, suburbanas e rurais, locais remotos, de difícil acesso e com restrições de cobertura de sinais das operadoras de telecomunicações.

1.3 OBJETIVOS DO PROJETO

- Análise de alcance da tecnologia LoRaWAN e sua aplicação nas áreas de concessão das empresas cooperadas, em pontos críticos, definidos pelas cooperadas.

- Estudo e análise do parque de medidores da concessionária para definir qual é a forma de comunicação mais comum (PIMA, NBR 14522, etc.) para a escolha do protocolo do leitor.
- Desenvolvimento do protótipo da solução, incluindo hardware e software embarcados, para conexão interoperável com medidores eletrônicos de energia, com capacidade de comunicação de longo alcance, robustez, banda adequada para aplicação e segurança nas transações via criptografia.
- Especificar, projetar, montar e instalar os protótipos em medidores de energia, bem como os gateways de acesso para comunicação com os mesmos.
- Desenvolvimento de software independente de alto nível para programação, leitura, supervisão e demais ações de controle dos equipamentos a serem instalados em campo, com acesso via Web e sendo capaz de prover informações suficientes para avaliar o grau de sucesso da solução desenvolvida.
- Instalar e avaliar a solução desenvolvida em laboratório e em campo na área da concessionária financiadora.
- Realizar estudos de aplicações técnicas (como balanço de energia).

1.4 OBJETIVOS DESTE TRABALHO

O projeto de P&D foi iniciado em 1º de maio de 2020 e possui a duração total de 4 anos. Com a aprovação da Resolução Normativa (RN) n° 871/2020 foi priorizado o desenvolvimento de um dispositivo capaz de extrair os dados referentes aos indicadores de DRP e DRC necessários para o atendimento da normativa, a criação do sistema para armazenamento dos dados e criação do arquivo .XML contendo os indicadores para envio a ANEEL. Este trabalho apresenta o desenvolvimento e os resultados obtidos nos primeiros 2 anos do projeto, compreendendo os seguintes tópicos:

- Desenvolvimento do dispositivo para comunicação com medidores eletrônicos via protocolo ABNT NBR 14522.
- Simulações de cobertura da rede LoRa na cidade de Tapejara.
- Desenvolvimento de software em nuvem para gerenciamento e visualização de dados referentes aos indicadores de qualidade, medidas instantâneas da rede e consumo.

- Ampliação da infraestrutura de rede previamente instalada na cidade de Tapejara.
- Instalação dos dispositivos de comunicação nas unidades consumidoras.

1.5 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

A dissertação está organizada conforme os seguintes capítulos:

No **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica** é apresentada uma revisão sobre os principais conceitos relacionados a esse trabalho, como um histórico da evolução da medição de energia elétrica para faturamento, a rede de comunicação LoRa e o protocolo LoRaWAN, os protocolos para comunicação com medidores de energia, e os indicadores de qualidade de energia.

No **Capítulo 3 - Desenvolvimento** estão descritos os processos para desenvolvimento do dispositivo, é apresentado o local de aplicação da tecnologia e a arquitetura proposta para software de gerenciamento e supervisão dos dados.

No **Capítulo 4 - Resultados** são demonstrados os resultados laboratoriais e a campo, tanto da comunicação com o medidor quanto a comunicação de longo alcance. São apresentadas as métricas do sistema instalado e as funcionalidades do *software* de gerenciamento. Por último, são discutidos todos os resultados obtidos com a instalação do sistema.

No **Capítulo 5 - Conclusão** são apresentadas as conclusões alcançadas com o trabalho desenvolvido e as contribuições do mesmo. Ainda são apresentados os próximos passos referentes ao projeto e são realizadas sugestões de trabalhos futuros para o aprimoramento do sistema instalado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os elementos relacionados ao trabalho e são descritas suas características. Primeiramente é abordado o medidor de energia, é contextualizada a história e evolução do mesmo, desde o modelo utilizado no início da distribuição de energia elétrica até os modelos de medidores eletrônicos encontrados atualmente, seguindo com o conceito de leitura automática de medidores e infraestrutura de medição avançada.

Então, são apresentadas as tecnologias de rede LoRa e protocolo LoRaWAN, que tratam da comunicação utilizada no desenvolvimento do sistema apresentado. São abordados também os protocolos PIMA e NBR 14522 para comunicação com medidores de energia elétrica e os indicadores de qualidade de energia contidos no módulo 8 dos procedimentos de distribuição de energia elétrica, bem como a resolução normativa nº 871, resolução que visa ser atendida com o sistema desenvolvido.

2.1 MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA

Nos anos 1880 a energia elétrica deixou de ser produzida e consumida somente no mesmo local, iniciou-se o processo de distribuição da energia elétrica. Ainda produzida em forma de corrente contínua, a energia elétrica começou a ser utilizada em sistemas de iluminação.

Com isso, surgiu a necessidade da quantificação dessa energia consumida. Como a energia era utilizada em sistemas de iluminação, os primeiros medidores de energia foram propostos com a unidade de medição de lâmpada/hora, sem considerar níveis de tensão e corrente, apenas o tempo ligado (EDISON, 1881).

Nos anos seguintes, houve a expansão das instalações elétricas, levando a energia até as residências, com isso, houve a necessidade de medidores com maior precisão de leitura. Hermann Aron patenteou o primeiro medidor de consumo em watt/hora preciso em 1883, ainda em corrente contínua, o medidor foi comercializado pela *General Electric* (GE) no Reino Unido (WHYTE, 1930).

Por volta dos anos de 1890, com o uso da energia em corrente alternada, começou a ser utilizado o princípio da indução nos medidores de energia. Em 1894 Oliver Shallenberger, da *Westinghouse Electric Corporation*, produziu o primeiro medidor de watt/hora eletromecânico moderno aplicando o princípio da indução. O medidor utilizava um disco que girava proporcionalmente à energia consumida (DYER, 2001).

2.1.1 Medidor eletromecânico

Atualmente ainda encontram-se muitos medidores eletromecânicos operando, principalmente em consumidores residenciais. Apesar de robustos, devido as suas características construtivas, sua precisão pode ser afetada por fatores como distorções na forma de onda, variações de temperatura, entre outros (GARCIA et al., 2017).

São dispositivos com recursos limitados devido a sua falta de tecnologia, como principais limitações pode-se destacar: medição de fluxo unidirecional de potência, a falta de armazenamento de dados e, principalmente, a necessidade de leitura manual, necessitando o deslocamento de um leitorista até o local da instalação para realizar uma leitura instantânea do equipamento (NICOLAU, 2013). A Figura 2.1 apresenta um medidor eletromecânico de energia.

Figura 2.1 – Medidor eletromecânico de energia elétrica.



Fonte: Hourney (2009)

2.1.2 Medidor eletrônico

Com a evolução da eletrônica e microeletrônica nas últimas décadas, tornou-se viável o desenvolvimento de medidores de energia eletrônicos. Nos medidores eletrônicos houve a inclusão de microprocessadores para que, a partir das medidas, além de calcular o consumo, são capazes de obter outras métricas sobre a energia elétrica. Os medidores eletrônicos apresentam medidas mais precisas, e ainda tornaram possível obter indi-

cadores de qualidade, armazenar registros de níveis de tensão, corrente e variações na frequência, entre diversas outras possíveis métricas. A Figura 2.2 apresenta um medidor eletrônico de energia elétrica.

Figura 2.2 – Medidor eletrônico de energia elétrica.



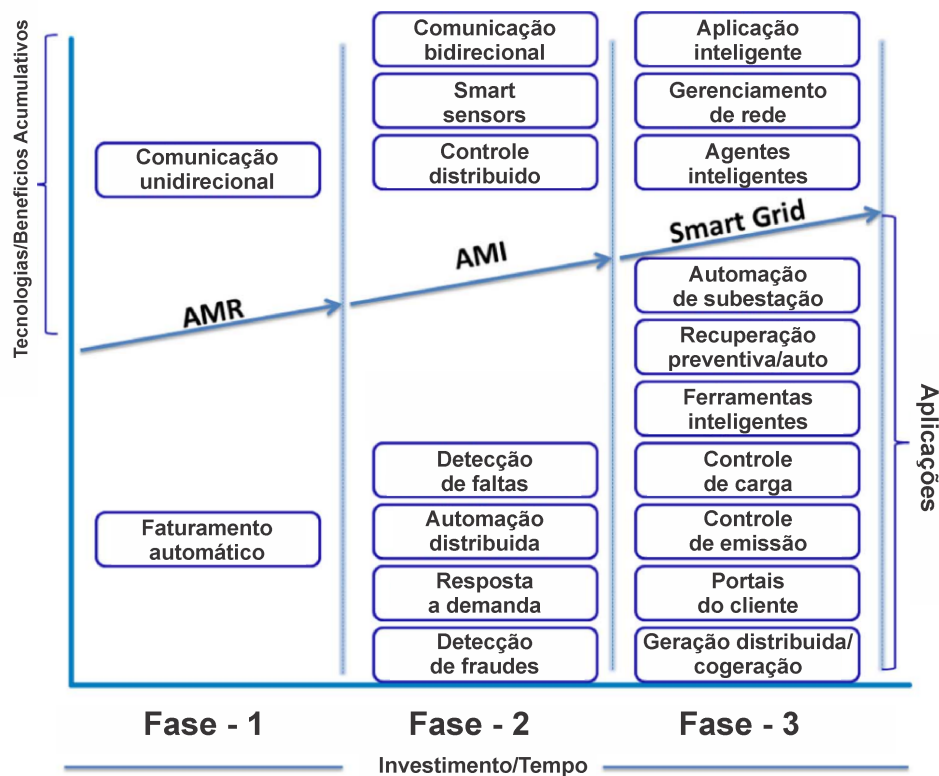
Fonte: Hourney (2009)

Uma vez que os dados são gerados e armazenados de forma eletrônica, os mesmos podem ser transmitidos. A partir da possibilidade de comunicação dos medidores eletrônicos foi criado o conceito de Leitura Automática do Medidor (AMR), que consiste em fazer a leitura remota do medidor (LI et al., 2008). Após essa evolução dos antigos medidores eletromecânicos, chegando aos medidores eletrônicos, passou a ser utilizado o *Smart Meter* para referir-se aos medidores que possuem a capacidade de comunicação. Logo o conceito de AMR evoluiu para a Infraestrutura de Medição Avançada (AMI), onde a comunicação unidirecional passa a ser bidirecional.

2.2 INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO AVANÇADA

A AMI cria uma rede de comunicação bidirecional entre os medidores eletrônicos e o sistema de gerenciamento das concessionárias de energia, integrando uma série de outros sistemas. Logo o conceito de AMI não contempla apenas a implantação física de *Smart Meters*, mas uma complexa rede de comunicação e infraestrutura de tecnologia da informação (TI). Uma AMI necessita de sistemas para gerenciamento de dados, que devem ser capazes de receber grandes quantidades de dados e ainda tornar esses dados significativos e úteis ao usuário, auxiliando a obter um melhor gerenciamento da energia. A Figura 2.3 apresenta um resumo da evolução desde o sistema de AMR, passando pela AMI e alcançando o conceito de *Smart Grid*.

Figura 2.3 – Evolução da AMR até o conceito de *Smart Grid*.

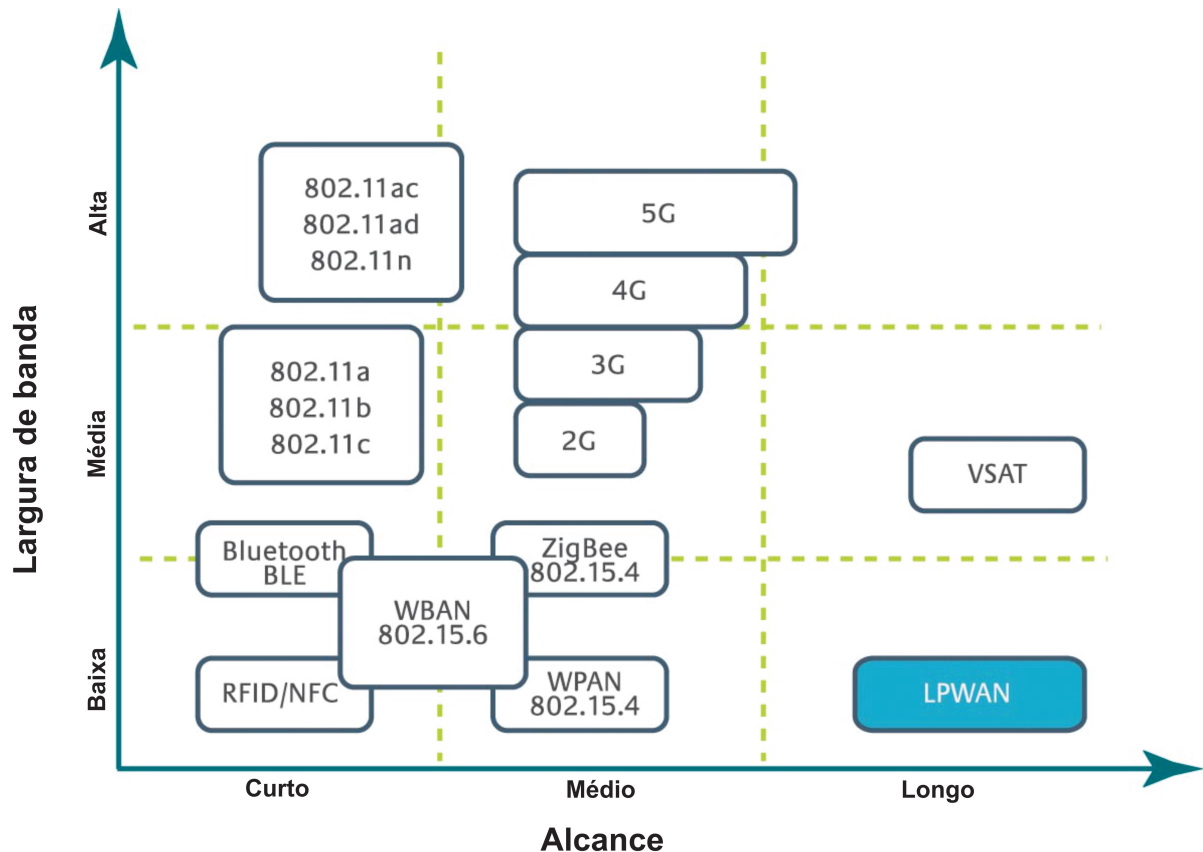


Fonte: Adaptado de (GUNGOR et al., 2013)

Como apresentado na Figura 2.3, a principal utilização da AMR é a cobrança automática da tarifa, onde, a partir dessa tecnologia foi possível dispensar o uso do leiturista, responsável por ir a cada unidade consumidora realizar a leitura do consumo. Com o avanço para a AMI, a utilização de comunicação bidirecional e *Smart Meters* surgem novas possibilidades, como a detecção de faltas, fraudes, sistemas de resposta a demanda e até uma automação distribuída, podendo realizar remotamente operações na rede.

Para realizar a comunicação bidirecional existem diferentes tipos de rede, onde cada uma apresenta um melhor resultado conforme os requisitos específicos de cada caso. Por exemplo, as redes celulares conseguem alcançar altas taxas de transmissão com baixa latência, porém possuem um custo alto de implementação e um alto consumo de energia por parte do dispositivo. Já as redes do tipo *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), apresentam um baixo consumo de energia do equipamento, ao custo de uma menor taxa de transmissão e latência elevada. A Figura 2.4 apresenta um comparativo do alcance e taxa de dados dos principais tipos de rede usada em IoT.

Figura 2.4 – Comparativo de redes de comunicação para IoT.



Fonte: Adaptado de (ADDVALUE, 2018)

2.3 REDE DE COMUNICAÇÃO LORA

A rede LoRa, originado de "*Long Range*", trata-se de um tipo de comunicação sem fio de longo alcance utilizado principalmente em dispositivos que visam o baixo consumo energético (LPWAN), geralmente alimentados por bateria.

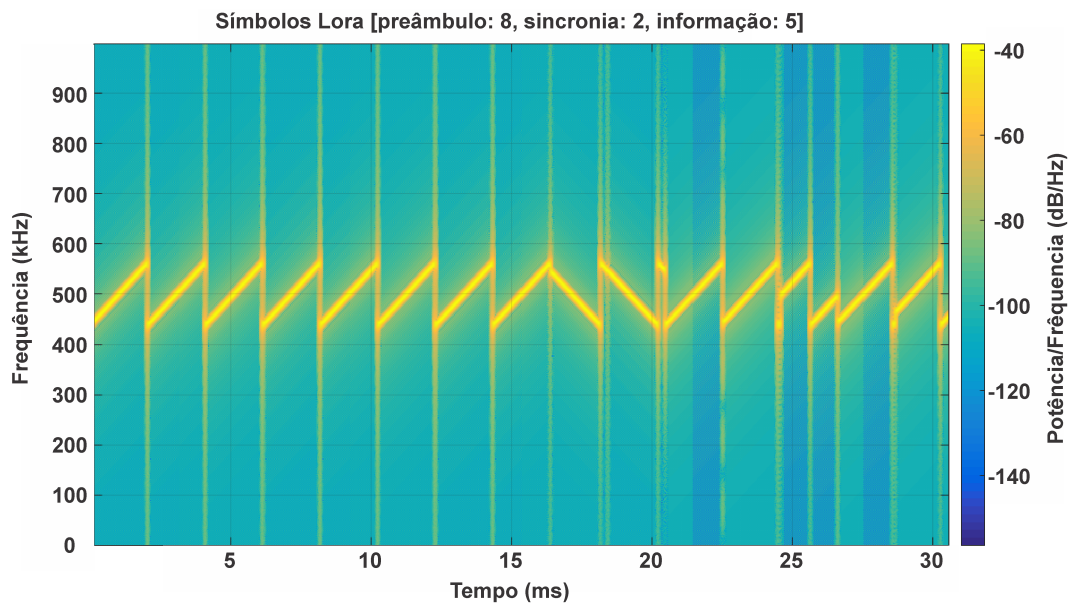
O LoRa refere-se a camada física da rede (PHY), uma tecnologia proprietária desenvolvida pela empresa Semtech, que opera em bandas *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) de sub-GHz não licenciadas, em frequências entre 433MHz e 923MHz (LoRa Alliance, 2019).

A modulação é baseada em *Chirp Spread Spectrum* (CSS), que usa rampas de frequência, também chamados de "*chirps*", com uma variação linear da frequência em relação ao tempo para codificar a informação. Devido a linearidade dos pulsos de *chirp*, *offsets* de frequência entre o receptor e o transmissor são equivalentes a *offsets* de tempo, facilmente eliminados na decodificação.

Quando o pulso de *chirp* ocorre com um aumento na frequência, é denominado

Up-chirp, quando a variação é decrescente, é denominado *Down-chirp*. Esses *chirps* são cíclicos, no caso de um *Up-chirp*, quando se atinge a frequência mais alta retorna-se a mais baixa, e em um *Down-chirp*, quando se atinge a frequência mais baixa retorna-se a mais alta. Com isso, a informação é codificada utilizando saltos de frequência, quando ocorrem esses saltos, esses são chamados de "símbolos". A Figura 2.5 apresenta um espectrograma de uma transmissão na rede LoRa.

Figura 2.5 – Espectrograma de um pacote transmitido pela rede LoRa.



Fonte: Adaptado de (GHOSLYA, 2020)

É possível notar como os 8 primeiros *chirps* são compostos por *Up-chirps*, formando o preâmbulo, em seguida dois *chirps* formados por *Down-chirps*, esses responsáveis pela sincronia. Então são transmitidos os *chirps* da informação desejada, os símbolos, onde ocorrem os saltos de frequência. Todos os *chirps* utilizam a faixa completa da largura de banda (BW) utilizada.

Esta característica torna a modulação imune ao efeito Doppler, equivalente ao *offset* de frequência. O *offset* de frequência pode chegar a 20% da largura de banda sem causar redução de performance na decodificação (SEMTECH, 2020a). Com isso é possível uma redução nos custos dos transmissores LoRa, uma vez que os cristais e osciladores utilizados não necessitam de uma alta precisão.

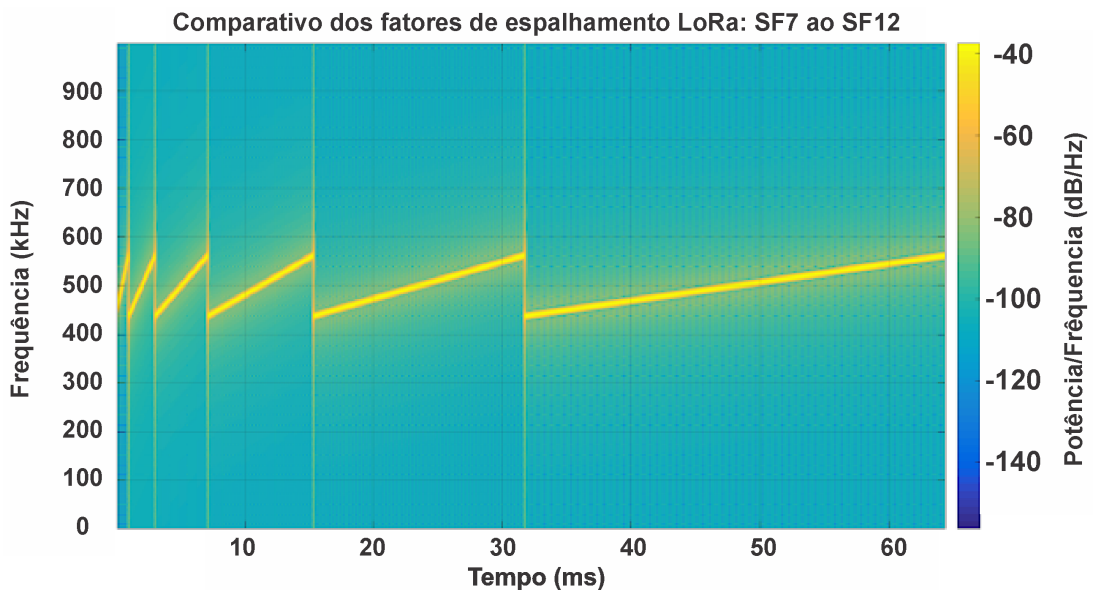
O fator de espalhamento (SF) define o período até ocorrer a varredura completa do espectro durante o envio. Conseqüentemente, com o aumento do fator de espalhamento ocorre o aumento do tempo de ar e um aumento no número de possibilidades de *chips* de cada símbolo. *Chip* é o nome dado aos valores codificados em cada símbolo na comunicação LoRa. A relação entre a quantidade de *chips* de cada símbolo e o SF é dada pela

Equação 2.1.

$$\text{Chips/simbolo} = 2^{SF} \quad (2.1)$$

A rede LoRa opera com fatores de espalhamento que variam de 7 até 12. A cada incremento no SF ocorre a dobra do tempo de ar, por exemplo, com SF 8 cada simbolo transmitido leva o dobro do tempo em relação ao SF 7, e metade em relação ao SF 9, como demonstrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Comparativo de tempo entre os fatores de espalhamento da rede LoRa.



Fonte: Adaptado de (GHOSLYA, 2020)

Com o aumento do fator de espalhamento maiores distancias podem ser alcançadas, porém com menores taxas de transmissão (*bit rate*).

Uma característica importante da modulação LoRa é a ortogonalidade entre os fatores de espalhamento, com isso é possível realizar transmissões simultâneas na mesma frequência, com fatores de espalhamento diferentes, sem que uma transmissão cause interferência na outra.

A largura de banda (BW) define a amplitude da variação de frequência de cada *chirp*, que ocorre em torno da frequência da portadora em cada canal da rede. As larguras de banda de banda variam de acordo com a regulamentação de cada país, podendo ser aceita nas faixas de: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. Com uma largura de banda maior, aumenta também a velocidade de transmissão, devido a equivalência entre a largura de banda e a taxa de *chips* transmitidos.

A rede LoRa utiliza o método de correção antecipada de erros (FEC), que codifica cada 4 bits de dados com bits adicionais para redundância, aumentando para 5, 6, 7 ou até 8 bits. O número de bits adicionados aos dados é chamado de taxa de codificação

(CR), que por sua vez, quanto mais alto maior a segurança, porém, maior o tempo de transmissão.

2.3.1 Taxa de transmissão da rede LoRa

Uma vez que a largura de banda é equivalente a taxa de *chips*/segundo, quando aplicado na Equação 2.1, é possível obter a taxa de símbolos/segundo (R_s), apresentado na Equação 2.2.

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2.2)$$

Como o número de bits de cada símbolo é definido pelo SF, relacionando o SF com o R_s e adicionando a taxa de codificação é possível calcular a taxa de transmissão (R_b) a partir da Equação 2.3.

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{4 + CR} \quad (2.3)$$

A Equação 2.3 permite uma fácil percepção de como o aumento da largura de banda aumenta a taxa de transmissão. No entanto, o aumento do fator de espalhamento ou da taxa de codificação diminuem a taxa de transmissão, porém, com o aumento destes, é possível aumentar a distância de transmissão. A Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre as taxas de transmissão e alcance com diferentes SF, utilizando uma largura de banda de 125kHz e CR1.

Tabela 2.1 – Comparativo de envio com diferentes fatores de espalhamento.

Fator de Espalhamento	Bit Rate	Alcance (dependente do terreno)	Tempo de Ar para um payload de 11 bytes
SF10	980 bps	8 km	371 ms
SF9	1760 bps	6 km	185 ms
SF8	3125 bps	4 km	103 ms
SF7	5470 bps	2 km	61 ms

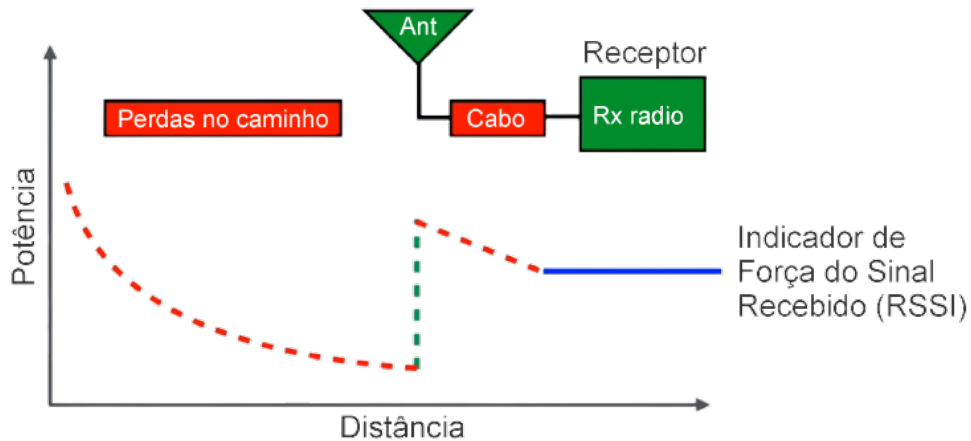
Fonte: Adaptado de SEMTECH (2020b)

2.3.2 RSSI

O indicador de força do sinal recebido (RSSI) representa a potência de sinal recebido em miliwatts (mW) e expressa em dBm. Esse indicador representa o quão forte o

o sinal chegou ao dispositivo de destino após os ganhos e atenuações pelo qual passou. A Figura 2.7 apresenta de maneira simplificada os ganhos e atenuações do sinal durante a comunicação, após o envio de um dado.

Figura 2.7 – Nível de sinal durante a comunicação.



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2020b)

O RSSI possui um valor negativo, quanto mais próximo de 0dBm melhor. A rede LoRa tipicamente aceita valores de até -120dBm, um valor de sinal já considerado baixo, porém há rádios de comunicação LoRa que atingem sensibilidades de até -148dBm (SEMTECH, 2020a).

2.3.3 SNR

A razão entre o sinal e o ruído (SNR) representa a razão entre a potência do sinal recebido e a potência do ruído recebido. Quando o nível do sinal encontra-se acima do nível do ruído, o SNR é positivo, quando o nível de ruído encontra-se acima do nível do sinal, o SNR é negativo.

Na rede LoRa, o receptor consegue demodular o sinal mesmo com valores de SNR negativos, ou seja, onde o nível de ruído é maior que o nível do sinal. A Tabela 2.2 apresenta os valores mínimos de SNR para que possa ser possível a demodulação na rede LoRa em cada SF.

Tabela 2.2 – SNR mínimo para cada fator de espalhamento.

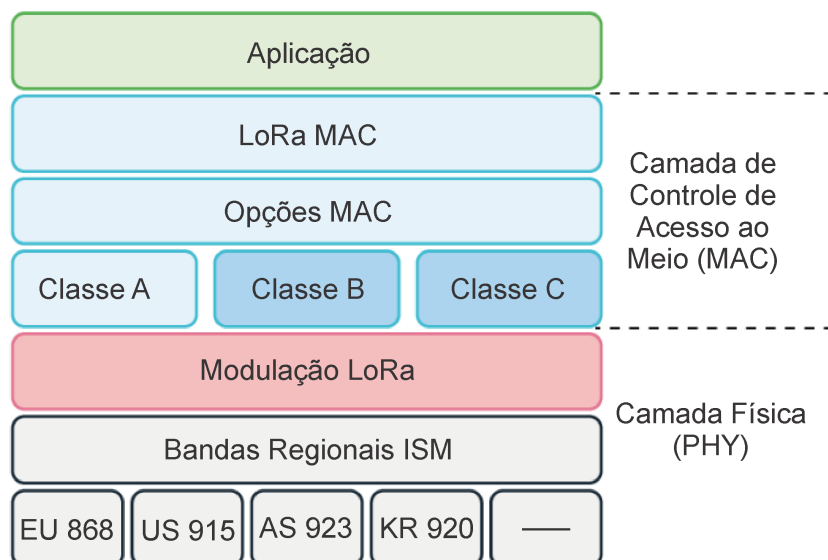
Fator de Espalhamento (SF)	Chips/simbolo	SNR (dB)
6	64	-5
7	128	-7,5
8	256	-10
9	512	-12,5
10	1024	-15
11	2048	-17,5
12	4096	-20

Fonte: Adaptado de SEMTECH (2020a)

2.4 PROTOCOLO LORAWAN

LoRaWAN define o protocolo e a arquitetura de rede aplicada na camada de controle de acesso ao meio (MAC), uma camada superior à rede LoRa, que trata-se da camada física (PHY). A Figura 2.8 apresenta o conjunto de camadas que compõem uma rede LoRaWAN.

Figura 2.8 – Camadas de um sistema LoRaWAN.

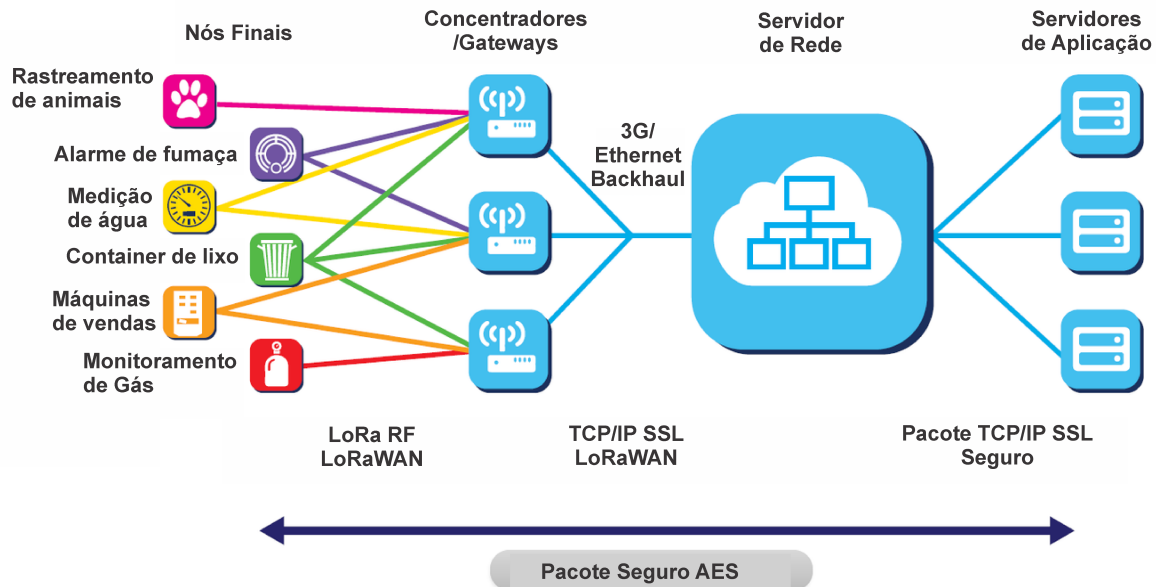


Fonte: Adaptado de (LoRa Alliance, 2019)

A arquitetura da rede LoRaWAN possui o formato de estrela de estrelas, onde os dispositivos *Gateways* (GW) recebem as mensagens dos dispositivos finais (*End Nodes*), via rede LoRa. Os *Gateways* retransmitem aos servidores de rede (*Network Server*), via

comunicação IP, que por sua vez transmitem as mensagens aos servidores de aplicação (*Application Server*), que fornecem o acesso do usuário aos dados. Por tratar-se de uma comunicação bidirecional, o caminho inverso da comunicação também é possível. A Figura 2.9 apresenta a topologia da arquitetura proposta no protocolo LoRaWAN.

Figura 2.9 – Arquitetura de um sistema LoRaWAN.



Fonte: Adaptado de (LoRa Alliance, 2019)

2.4.1 Componentes do sistema

Os componentes presentes no sistema são (NOURA et al., 2020):

- *End Nodes*: São os dispositivos de campo, também chamados de nós, encontram-se dispersos em grandes quantidades por áreas amplas. Comunicam-se com os *Gateways* ou Concentradores através da rede LoRa. Esses possuem diferentes classes conforme seu modo de operação, podendo ser das classes A, B ou C.
- *Gateways*: Dispositivos responsáveis por receber pacotes LoRa dos *End Nodes* e enviá-los via internet, geralmente conexão cabeada ou rede celular, para o *Network Server*, e vice-versa. São instalados em pontos estratégicos para garantir a cobertura de sinal para os *End Nodes*. Não há associação direta entre os *Gateways* e os *End Nodes*, cada *Gateway* recebe mensagens de todos os *End Nodes*, dentro de sua área de cobertura, e repassa as mensagens ao *Network Server*.
- *Network Server*: O servidor de rede é responsável por receber os dados dos *Gateways*, detectar duplicidades, descartando os pacotes pacotes recebidos com me-

nor intensidade de sinal, checar a integridade dos pacotes recebidos e enviar as mensagens ao *Application Server*. Quando um comando do *Application Server* é enviado a um *End Node*, o *Network Server* é responsável por designar o *Gateway* que realizará esse envio, baseado no *Gateway* que anteriormente recebeu a mensagem com a melhor taxa de sinal.

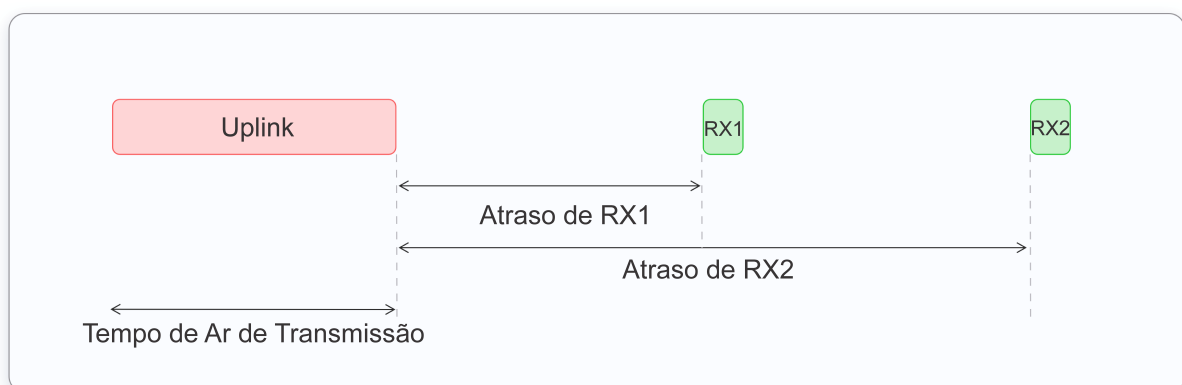
- *Application Server*: O servidor de aplicação é responsável por receber os dados do *Network Server*, descriptografá-los e mostrar os dados na aplicação desejada. Este também é responsável por receber os comandos que devem ser enviados aos *End Nodes*, criptografá-los e enviar ao *Network Server*.

2.4.2 Classes de dispositivos

Com o objetivo de atender as mais diversas aplicações para comunicação de longo alcance, os dispositivos compatíveis com o protocolo LoRaWAN são divididos em três classes distintas: A, B e C. O envio de mensagens (*Uplink*) não possui diferenças entre as classes, fica delimitado conforme a regra do dispositivo, já o recebimento de mensagens (*Downlink*) apresenta diferenças em cada classe. (LoRa Alliance, 2020b).

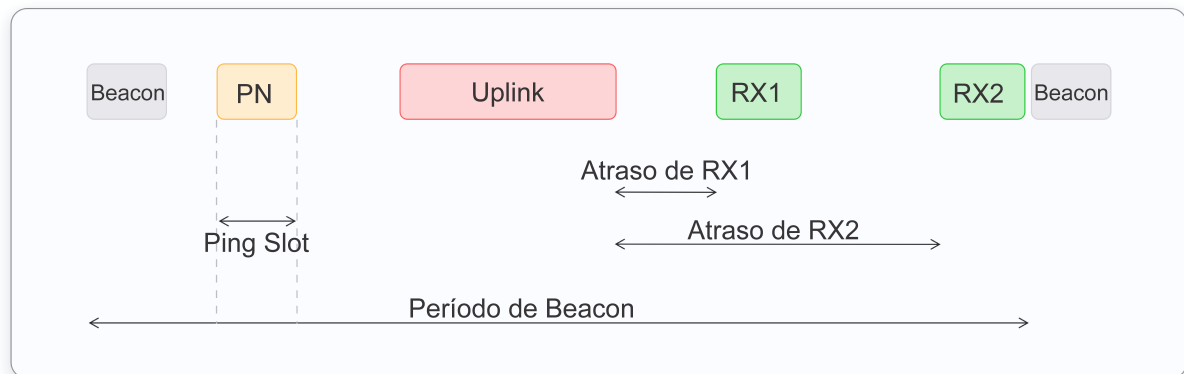
Classe A: Os dispositivos da classe A permitem a comunicação bidirecional através de duas janelas curtas de *downlink* após cada transmissão de *uplink*. Essa operação é a de menor consumo de energia, pois abre apenas pequenas janelas de *downlink*. As comunicações fora dessas janelas são agendadas pelo servidor de rede para as próximas transmissões. Quando há o recebimento de uma mensagem na primeira janela de recebimento, a segunda janela não é aberta. A Figura 2.10 apresenta um esquema das janelas de comunicação de um dispositivo classe A.

Figura 2.10 – Janelas de *downlink* e *uplink* de um dispositivo classe A.



Classe B: Além de contar com as janelas de transmissão da classe A, os dispositivos da classe B possuem janelas extras de *downlink* em períodos agendados. Para isso, o *Gateway* envia um *beacon* de sincronia para o dispositivo, que por sua vez, abre uma janela de *downlink* chamada de *ping slot*. Isso permite que o servidor garanta que o dispositivo estará pronto para receber as mensagens. A Figura 2.11 apresenta um esquema das janelas de comunicação de um dispositivo classe B.

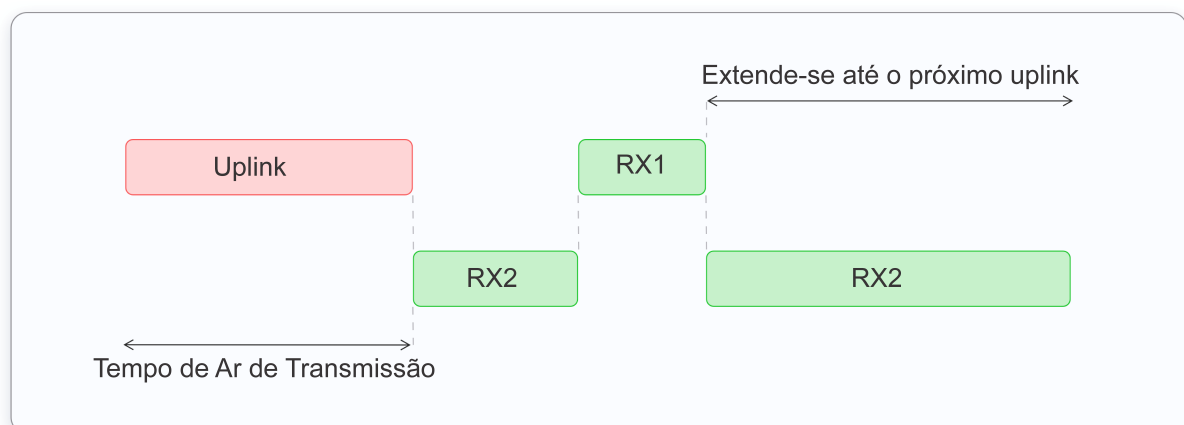
Figura 2.11 – Janelas de *downlink*, *uplink* e *beacons* de um dispositivo classe B.



Fonte: Adaptado de (The Things Network, 2020a)

Classe C: Essa classe conta com janelas de recebimento abertas quase que continuamente, que só não estão abertas quando o dispositivo está enviando uma mensagem. O consumo de energia é maior, quando comparado às classes anteriores, porém garante uma latência menor entre a comunicação do servidor com o dispositivo. A Figura 2.12 apresenta um esquema das janelas de comunicação de um dispositivo classe C.

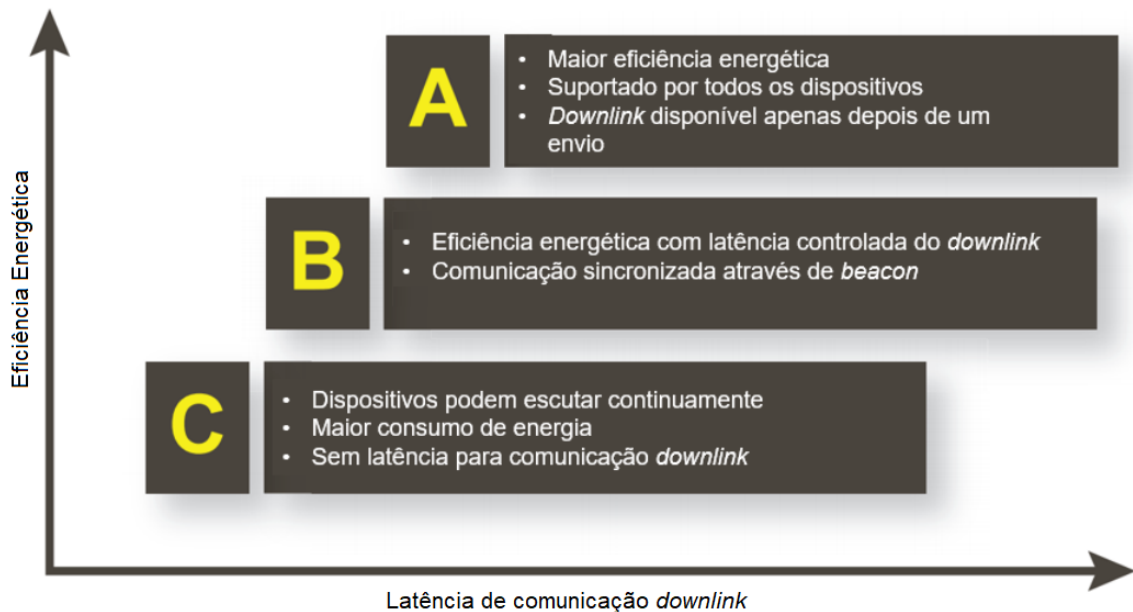
Figura 2.12 – Janelas de *downlink* e *uplink* de um dispositivo classe C.



Fonte: Adaptado de (The Things Network, 2020a)

A Figura 2.13 apresenta um gráfico que relaciona a latência das mensagens *downlink* e o consumo de energia para cada uma das classes do protocolo LoRaWAN.

Figura 2.13 – Classes de dispositivos LoRa.



Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2019)

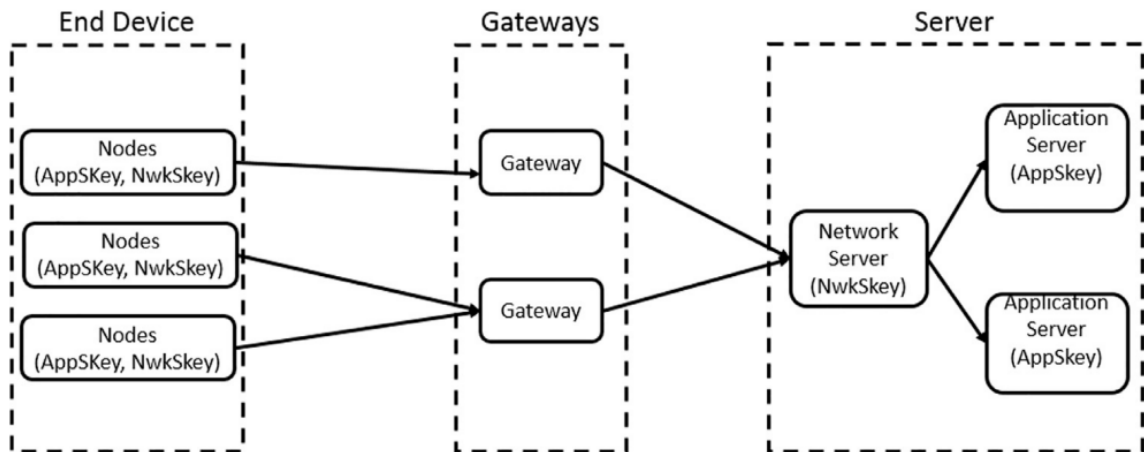
2.5 SEGURANÇA DO PROTOCOLO LORAWAN

O protocolo LoRaWAN possui criptografia de ponta a ponta, então, a mensagem (*payload*) é enviada criptografada pelo dispositivo, e somente é totalmente descriptografada no servidor de aplicação. Nesse processo são utilizadas duas chaves criptográficas (HAN; WANG, 2018):

- *Network Session Key* (NwkSKey): chave de 128 bits compartilhada entre o dispositivo e o servidor de rede.
- *Application Session Key* (AppSKey): chave de 128 bits compartilhada entre o dispositivo e o servidor de aplicação.

Algoritmos AES são utilizados para garantir a autenticação e integridade dos pacotes até o servidor de rede e de aplicação. Com os dois níveis de segurança, é possível a implementação de redes compartilhadas *multi-tenant* sem que o operador da rede visualize o pacote de dados dos usuários. A Figura 2.14 apresenta a utilização das chaves na comunicação LoRa (HAN; WANG, 2018).

Figura 2.14 – Utilização das chaves na rede LoRaWAN.



Fonte: Noura et al. (2020)

Para garantir a confidencialidade e confiabilidade dos dados são utilizados dois métodos para a segurança:

- Criptografia na mensagem: O conteúdo da mensagem, excluindo cabeçalhos iniciais e bytes de verificação de dados, são criptografados utilizando a AppSKey.
- Verificação de integridade do pacote: No final do pacote há 2 bytes utilizados para o "MIC", similar a um *checksum*. Esse valor é gerado utilizando a NwkSKey. Com isso a mensagem chega ao servidor de rede criptografada, e o mesmo pode descriptografar e verificar a mensagem, porém não tem acesso ao conteúdo, uma vez que não possui a AppSKey.

2.5.1 Métodos de ativação dos nós

Na rede LoRaWAN, o dispositivo pode conectar-se de duas formas, com ativação *over-the-air* (OTAA), ou ativação por personalização (ABP) (The Things Network, 2020b). Nos dois tipos de autenticação há diferentes meios de geração das chaves.

2.5.1.1 Ativação Over-the-Air (OTAA)

A autenticação OTAA consiste de uma mensagem de solicitação de conexão na rede (Join Request) e uma de aceitação na rede (Join Accept) entre o dispositivo e o servidor. Primeiro o dispositivo inicia o procedimento de mandar a mensagem de solicitação de conexão para o servidor de rede. Essa mensagem inclui o DevEUI, AppEUI e o DevNonce.

O AppEUI representa o identificador da aplicação, o DevEUI é um identificador global único do dispositivo. O DevNonce, é uma sequência aleatória de números, começando com 0 quando o dispositivo é ligado, e é incrementado cada vez que o dispositivo faz uma solicitação. Então, o DevNonce nunca deve ser reutilizado para um dado valor de AppEUI, O valor de MIC é calculado pelo dispositivo, e o AppKey é compartilhado entre o dispositivo e o servidor de rede.

A mensagem de solicitação de conexão é enviado ao servidor de rede, que chega se o dispositivo está autenticado checando o MIC, usando o DevEUI e o AppEUI. Então ele redireciona ao servidor de aplicação. Conseqüentemente, se a mensagem é rejeitada, nenhuma resposta será recebida no dispositivo, o processo será encerrado pelo servidor de rede, e o processo de ingresso na rede irá falhar. Se o processo obtiver sucesso, uma mensagem aceitação da conexão será enviada do servidor de rede para o dispositivo. A Figura 2.15 apresenta o processo de troca e geração de chaves na ativação OTAA.

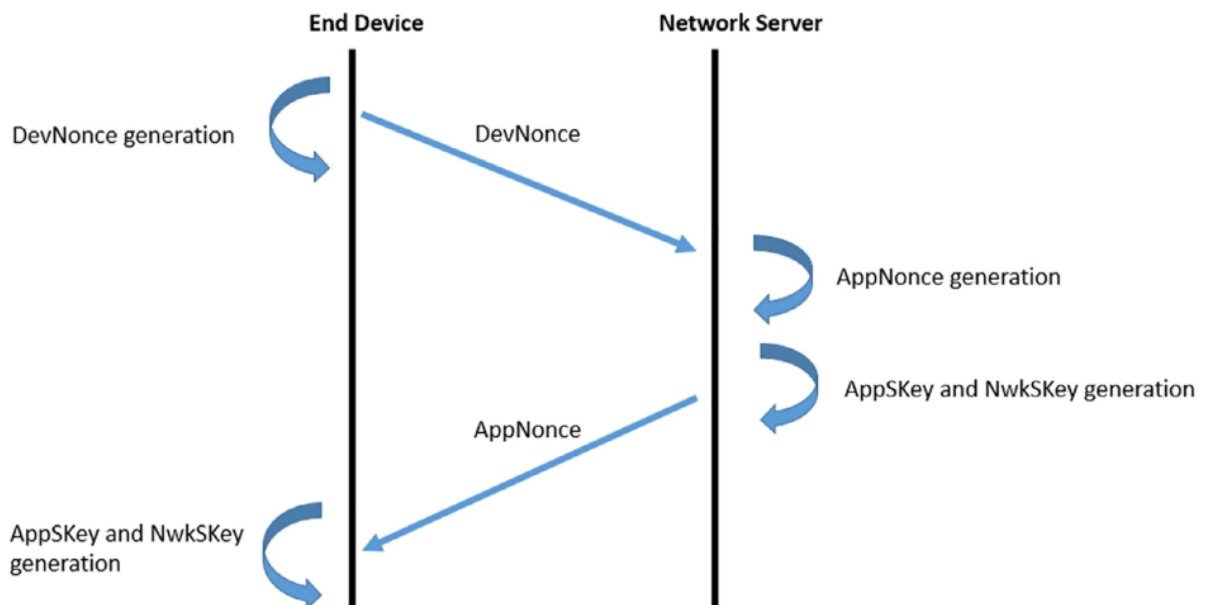


Figura 2.15 – Troca e geração de chaves em ativação OTAA. (NOURA et al., 2020)

A mensagem de aceitação de conexão consiste em 3 bytes:

- AppNonce: é um identificador aleatório único gerado pelo servidor de rede.
- DevAddr: o endereço do dispositivo associado pelo servidor de rede ao dispositivo.
- NetID: um identificador da rede usado para separação de endereços de diferentes redes LoRaWAN geográficas.

A Figura 2.16 apresenta o esquema completo de troca de mensagens para ativação OTAA.

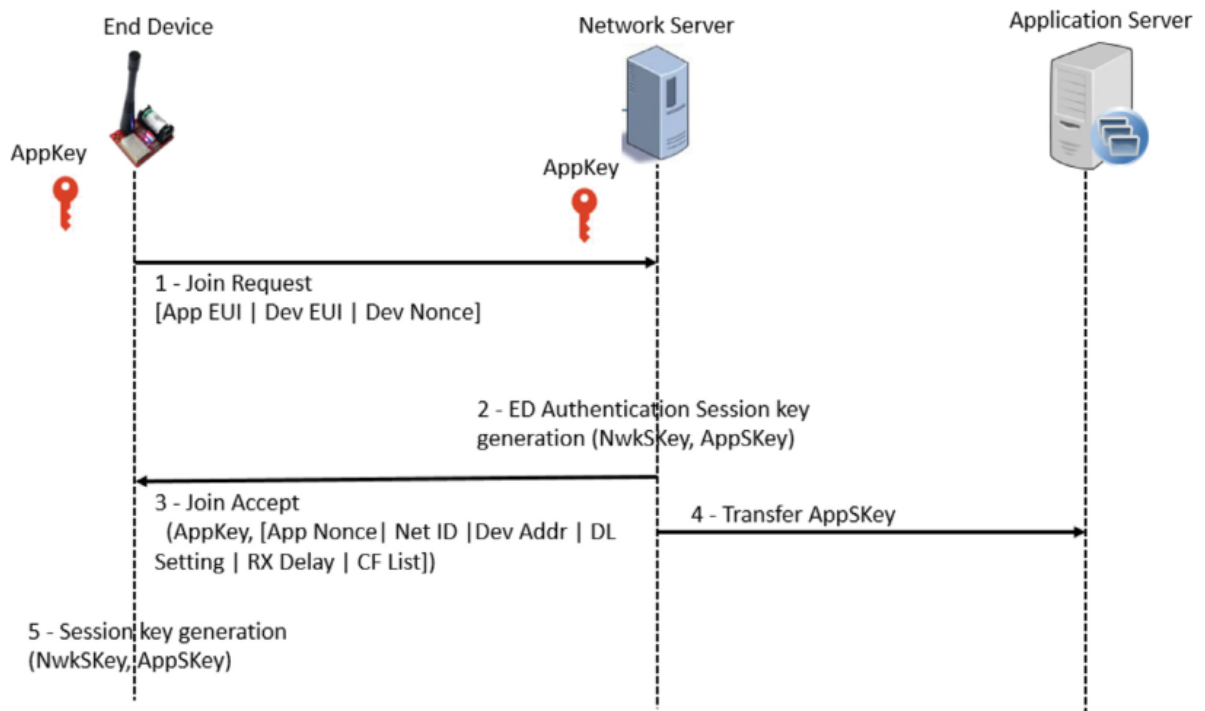


Figura 2.16 – Ativação OTAA. (NOURA et al., 2020)

2.5.1.2 Ativação por Personalização (ABP)

Na ativação ABP não há procedimento de solicitação de conexão. No servidor de rede é realizado um cadastramento prévio do dispositivo, onde é cadastrado o DevAddr e as quatro chaves de seção: FNwkSIntKey, SNwkSIntKey, NwkSEncKey. No servidor de aplicação também é realizado um cadastramento prévio da AppSKey. Todas as chaves são cadastradas no dispositivo.

2.6 PARÂMETROS REGIONAIS DA REDE LORAWAN

No protocolo LoRaWAN são definidas diferentes faixas de frequência, canais e outras especificações conforme a região onde a rede está instalada. A Tabela 2.3 apresenta os planos de frequências normatizados no protocolo LoRaWAN.

Tabela 2.3 – Planos de frequência normalizados no protocolo LoRaWAN.

Nome do plano de frequências	Nome usual do plano
EU863-870	EU868
US902-928	US915
CN779-787	CN779
EU433	EU433
AU915-928	AU915
CN470-510	CN470
AS923	AS923
KR920-923	KR920
IN865-867	IN865
RU864-870	RU864

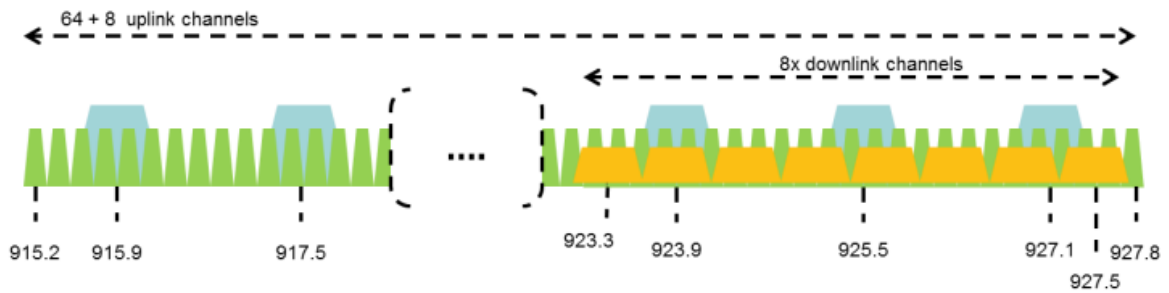
Fonte: LoRa Alliance (2020a)

No Brasil é utilizado o plano AU915, onde estão definidos um total de 72 canais para *Uplink* e 8 canais de *Downlink*, conforme os seguintes parâmetros (LoRa Alliance, 2020a):

- *Upstream*: 64 canais numerados de 0 a 63, utilizando largura de banda de 125 kHz, com *Data Rates* de código DR0 até DR5, com taxa de codificação de 4/5, iniciando em 915,2 kHz incrementando linearmente a cada 200 kHz até a frequência de 927,8 kHz.
- *Upstream*: 8 canais numerados de 64 a 71, utilizando largura de banda de 500 kHz com DR6 iniciando em 915,9 MHz e aumentando linearmente até a frequência de 927,1 MHz.
- *Downstream*: 8 canais numerados de 0 a 7 com largura de banda de 500 kHz, DR8 até DR13, iniciando em 923,3 MHz aumentando linearmente até a frequência de 927,5 MHz.

A Figura 2.17 apresenta os canais utilizados para *downlinks* e *uplinks* no plano AU915.

Figura 2.17 – Canais utilizados no plano AU915.



Fonte: LoRa Alliance (2020a)

Os códigos de *Data Rate* são uma maneira simplificada de expressar a combinação do fator de espalhamento e a largura de banda. A Figura 2.4 apresenta a configuração de cada código de *Data Rate*.

Tabela 2.4 – Configurações de *Data Rate*

<i>Data Rate</i>	Configuração	Indicativo físico de <i>bit rate</i> (bit/sec)
0	Lora: SF12/125kHz	250
1	Lora: SF11/125kHz	440
2	Lora: SF10/125kHz	980
3	Lora: SF9/125kHz	1760
4	Lora: SF8/125kHz	3125
5	Lora: SF7/125kHz	5470
6	Lora: SF8/500kHz	12500
7	RFU	
8	Lora: SF12/500kHz	980
9	Lora: SF11/500kHz	1760
10	Lora: SF10/500kHz	3900
11	Lora: SF9/500kHz	7000
12	Lora: SF8/500kHz	12500
13	Lora: SF7/500kHz	21900
14	RFU	
15	Definido no LoRaWAN	

Fonte: Adaptado de LoRa Alliance (2020a)

No plano não há uma limitação específica para o tamanho do *payload*, porém há a limitação de 400ms de tempo de ar (*airtime*) para as mensagens, sendo esse o tempo que o dispositivo necessita para a transmissão da mensagem.

2.7 COMUNICAÇÃO COM MEDIDORES

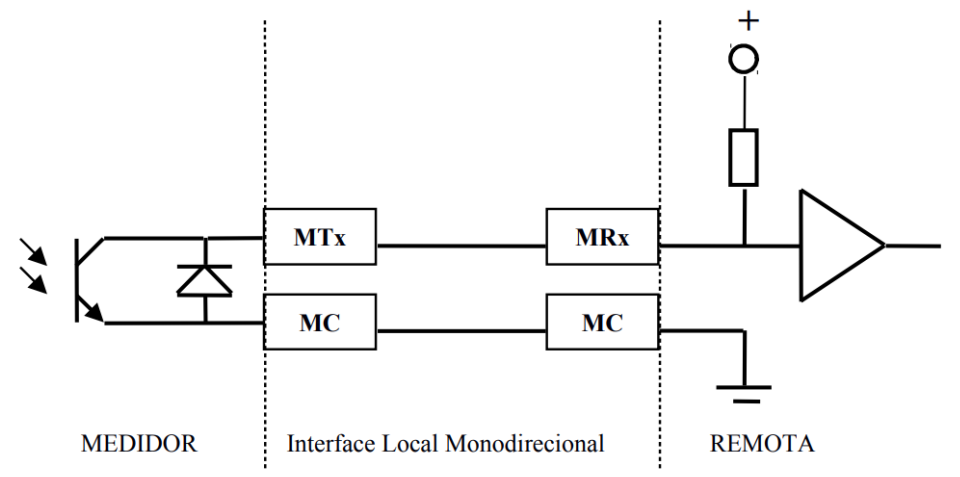
Entre os protocolos de comunicação utilizados por medidores de energia, no Brasil os mais encontrados atualmente, nos medidores já instalados, são os protocolos PIMA e ABNT NBR 14522, ambos de desenvolvimento nacional.

2.7.1 PIMA

O Protocolo para Infraestrutura de Medição Avançada (PIMA) é um protocolo desenhado para utilização em saída de comunicação serial assíncrona unidirecional. O protocolo abrange as grandezas de consumo, energia ativa e reativa, em ambos os fluxos, consumo e geração, tensões e alguns alarmes predefinidos de níveis de tensão e sentido de corrente.

A conexão entre o medidor e o dispositivo para a comunicação é realizada a fios, utilizando apenas um terminal comum para a referência entre os dispositivos e um terminal para a transferência de dados, sendo o terminal de dados do medidor do tipo coletor aberto, necessitando um *pull up* no dispositivo de leitura. A Figura 2.18 apresenta o diagrama elétrico para os circuitos de saída do medidor e entrada do dispositivo de comunicação.

Figura 2.18 – Diagrama elétrico para a comunicação PIMA.



Fonte: COPEL (2018)

Na versão atual do protocolo, a velocidade de transmissão é definida em 2400bps, em versões anteriores eram aceitas velocidades de 300bps e 1200bps. Devido a característica de comunicação unidirecional assíncrona, o envio de dados é realizado de maneira periódica, com a definição de tempo mínimo entre o final de um pacote e o início de outro como o tempo de 200 *bits*, e a periodicidade máxima para o envio das informações é de 5 segundos.

A formatação dos pacotes de dados são apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Formato de dados no pacote PIMA.

Preâmbulo	Identificador	Tamanho	Escopo + Índice	Dados	CRC
2 Bytes	5 Bytes	1 Byte	2 Bytes	n Bytes	2 Bytes

Fonte: COPEL (2018)

Cada parte do pacote é definida como:

- **Preâmbulo:** Indica o início do pacote. É composto pelo caracteres hexadecimais AA e 55.
- **Identificador:** Informa o número de série do medidor. É constituído por 5 *bytes* no formato BCD, que permite uma numeração de até 10 dígitos. Os *bytes* mais significativos são apresentados antes dos menos significativos.
- **Tamanho:** Apresenta a soma do número de *bytes* que formam o Escopo + Índice e Dados.
- **Escopo + Índice:** Indica o tipo de informação enviada, podendo ser medidas de consumo, tensão, alarme, horário ou data. É admitido apenas um escopo e um índice por pacote
- **Dados:** Corresponde aos valores de interesse da transmissão. Este tem seu tamanho variável conforme o dado transmitindo, variando de 1 a 4 *bytes*.
- **CRC:** Caractere de redundância cíclica da mensagem CRC16, aplicado sobre todos os *bytes* do pacote, exceto o Preâmbulo e o próprio CRC, com semente zero.

Não há uma padronização em relação aos dados disponibilizados na saída PIMA do medidor, deixando à escolha do fabricante decidir se o medidor disponibilizará apenas o dado de consumo total ou demais informações presentes no protocolo.

2.7.2 NBR 14522

A norma ABNT NBR 14522 define o padrão de comunicação leitor-medidor, saídas de usuário e formatos de dados, com o intuito de alcançar a compatibilidade entre os sistemas e equipamentos de medição de energia de diferentes fabricantes. A norma foi criada no ano de 2000 e em 2008 foi lançada a segunda versão que segue como versão vigente (ABNT, 2008).

2.7.2.1 Saídas de usuário

As saídas de usuário são saídas seriais de comunicação unidirecionais assíncronas a fio, similares ao protocolo PIMA, porém a NBR 14522 padroniza os dados que devem ser disponibilizados. A NBR 14522 prevê 4 tipos de saída de usuário, sendo elas: Normal, Estendida, Grandezas e Mista. As principais diferenças entre os 4 tipos de saídas de usuário são as velocidades de transmissão e a quantidade de dados.

2.7.2.1.1 Normal

A saída normal possui em seu bloco de dados as seguintes informações: contador de segundos até o fim do intervalo de demanda, indicador de reposição de demanda, indicador de intervalo reativo, indicadores indutivos e capacitivos para cálculo de UFER e DMCR, segmento horo-sazonal, tipo de tarifa, pulsos de energia ativa e reativa.

A cada segundo o medidor envia o pacote contendo todas as informações, ao final do intervalo de demanda, o último pacote é enviado 3 vezes, repetindo os mesmos dados, a cada segundo. A cada reposição de demanda, o indicador de reposição de demanda é complementado. As demais características do protocolo são:

- Velocidade: 110 Baud \pm 3%.
- Caractere: 1 start bit, 8 bits de dado e 1 a 2 stop bits.
- Tamanho do bloco: 8 caracteres.
- Tempo entre blocos: 1 segundo.
- Correspondência lógica: Nível lógico "1" corresponde à saída desativada.

2.7.2.1.2 Estendida

A saída estendida visa fornecer todos os dados metrológicos, e não apenas os dados referentes a faturamento. Isso é possível através da apresentação da informação em quatro quadrantes e uma verificação de confiabilidade dos dados mais eficiente.

Nesse protocolo o medidor fornece as seguintes informações: contador de segundos até o fim do intervalo de demanda, indicador de reposição de demanda, indicador de fim de intervalo de UFER, posto reativo, posto horário, quadrante, tarifa de reativos, número de pulsos de energia ativa (kWh-d ou kWh-r, conforme quadrante), número de pulsos de energia reativa (kvarh-Q1 a kvarh-Q4, conforme quadrante). Como na saída normal, na

estendida um bloco de informações é enviado a cada segundo e repetido 3 vezes ao final do intervalo de demanda. As demais características do protocolo são:

- Velocidade: 110 Baud \pm 3%.
- Caractere: 1 start bit, 8 bits de dado e 1 stop bits.
- Tamanho do bloco: 9 bytes.
- Tempo entre blocos: 1 segundo.
- Correspondência lógica: Nível lógico "1" corresponde à saída desativada.

2.7.2.1.3 Grandezas

A saída de usuário com grandezas instantâneas fornece informações referentes as tensões, correntes e potências para aplicações de acompanhamento ou supervisão, auxiliando a conhecer melhor o comportamento do ponto de medição. No entanto, esta saída não fornece as informações necessárias para faturamento.

Cada bloco carrega as seguintes informações: carácter de definição do tipo de ligação (estrela ou delta) e ponto de medição (primário ou secundário), número de série do medidor, estampa de tempo em segundos contados a partir das 00:00:00 de 01/01/1980, tensões de cada fase, corrente de cada fase e corrente de neutro, potência ativa e reativa de cada fase e frequência da rede. As demais características do protocolo são:

- Velocidade: 600 Baud \pm 3%.
- Caractere: 1 start bit, 8 bits de dado e 1 stop bits.
- Tamanho do bloco: 53 bytes.
- Tempo entre blocos: 1 segundo.
- Correspondência lógica: Nível lógico "1" corresponde à saída desativada.

2.7.2.1.4 Mista

A saída de usuário mista combina as grandezas instantâneas com as informações para controle de demanda. Neste protocolo cada bloco de informação possui: informação do tipo de ligação, estampa de tempo em segundos contados a partir das 00:00:00 de 01/01/1980, número de série do medidor, relação de TP, relação de TC, multiplicador dos pulsos, tensões, correntes e potências secundárias do medidor, frequência da rede, número de segundos restantes do intervalo de demanda, posto reativo, indicador de reposição de demanda, posto horário, contadores de pulsos de energia ativa e reativa, ambas positivas e negativas.

Nesse protocolo, diferente dos anteriores, os blocos de informações não representam as mesmas informações em todos os envios. As informações referentes a número de série do medidor, relação de TP, relação de TC, multiplicador dos pulsos são enviadas de maneira alternada, é enviada uma delas por envio, seguindo a sequência até a última, então o ciclo de envio dessas informações é reiniciado. As demais características do protocolo são:

- Velocidade: 600 Baud \pm 3%.
- Caractere: 1 start bit, 8 bits de dado e 1 stop bits.
- Tamanho do bloco: 56 bytes.
- Tempo entre blocos: 1 segundo.
- Correspondência lógica: Nível lógico "1" corresponde à saída desativada.

2.7.2.2 Comunicação convencional leitor-medidor

A comunicação convencional leitor-medidor é uma comunicação assíncrona e bidirecional não simultânea, onde não somente é possível extrair medidas, mas também realizar a parametrização dos medidores. Esta comunicação comumente é encontrada através de uma porta óptica, composta por um emissor e um receptor infravermelho especificada pela ABNT NBR14519 (ABNT, 2000).

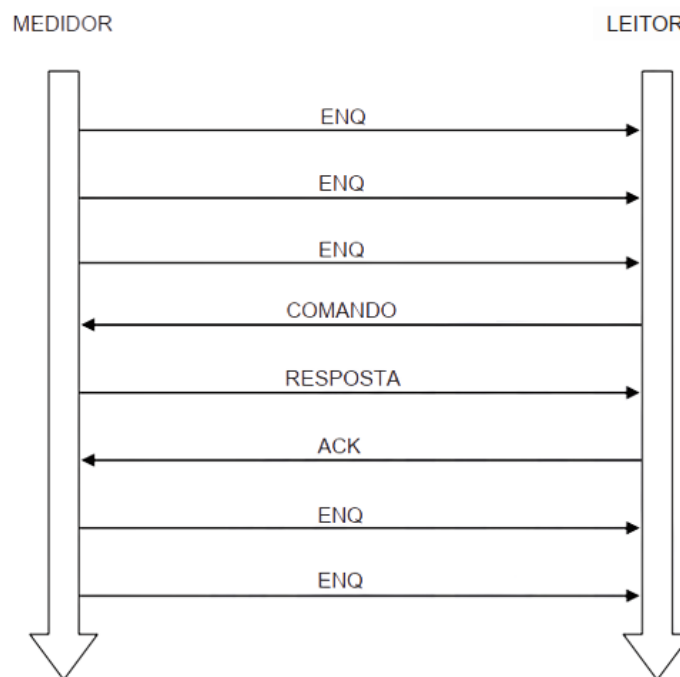
Este tipo de comunicação é baseado no modelo de comando, enviado pelo leitor, e resposta, enviada pelo medidor. Existem dois tipos de comandos, os simples, que podem ser atendidos somente com uma resposta, e os compostos, onde é necessária mais de uma resposta.

O leitor deve iniciar a comunicação, colocando um nível lógico alto na sua saída (Marca), este é considerado válido pelo medidor após o período de 1 segundo. Então o

medidor inicia o envio dos caracteres de sinalização (05 hexadecimal), chamado de "ENQ", utilizado para a sincronização da comunicação. Enquanto a sessão de comunicação está aberta, e não há tráfego de mensagens, o medidor permanece enviando ENQ, para que o leitor, ao enviar algum comando, realize a ação logo após o recebimento do ENQ. Caso o medidor verifique a integridade do comando e esteja correto ele enviará uma resposta, caso contrario ele enviará um NAK (15 hexadecimal) e o leitor irá enviar novamente o comando.

Quando o comando enviado é de resposta simples, após o recebimento da resposta e verificação de integridade, o leitor envia um ACK (06 hexadecimal) se os dados recebidos estiverem integros, caso contrario é enviado um NAK e o medidor enviará novamente a resposta. Ao receber o ACK o medidor voltará a enviar ENQ caso não seja encerrada a sessão de comunicação. A Figura 2.19 esquematiza um exemplo de comunicação com resposta simples e sem falhas.

Figura 2.19 – Esquema de troca de mensagens no protocolo NBR 14522.



Fonte: Adaptado de ABNT (2008).

Caso o comando seja de resposta composta, ao receber a primeira resposta, caso essa seja bem sucedida, o leitor enviará um ACK e o medidor responderá a próxima parte da resposta. Se em algum momento da resposta houver falha e o leitor enviar um NAK, o medidor enviará novamente o último dado onde houve a falha.

Neste protocolo as mensagens de comando e respostas possuem, respectivamente, 64 e 256 bytes, acrescidos de mais 2 bytes utilizados para CRC. A velocidade de comunicação é 9600 *baud*, com variação de até 2% para mais ou para menos e cada carácter é

composto por 1 *start bit* de nível lógico "0", 8 *bits* de dado e 1 *stop bit* de nível lógico "1".

A norma define 67 comandos diferentes, dentre eles existem 4 chamados "comandos estendidos". Dentro da categoria de comandos estendidos há a possibilidade do fabricante inserir mais comandos conforme desejado, seguindo a mesma estrutura do restante dos comandos do protocolo, porém com a função que o mesmo designar.

2.8 FATORES DE QUALIDADE DE ENERGIA

A ANEEL, juntamente com outros agentes e instituições do setor elétrico, elaborou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist). O Prodist é composto por 11 módulos e tem como objetivo normatizar e padronizar as relações das distribuidoras e consumidores de energia elétrica, a operação do sistema de distribuição e dos agentes operadores de energia.

O módulo 8 do Prodist trata sobre a qualidade do fornecimento de energia elétrica, com isso, engloba a qualidade do produto, qualidade do serviço, qualidade comercial e segurança do trabalho e das instalações (BRASIL, 2022).

Quando trata-se de qualidade do produto, refere-se a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) fornecida pela distribuidora, sendo estabelecidos valores de referência, indicadores e limites para os fenômenos ocorridos no sistema para manter a conformidade da onda de tensão em regime permanente e transitório.

2.8.1 Tensão em regime permanente

O módulo 8 define os limites adequados, precários e críticos de nível de tensão, medidos a partir do ponto de conexão da unidade consumidora (UC) com o sistema de distribuição. A tensão em regime permanente deve ser avaliada através de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada, de acordo com as seguintes modalidades:

- Eventual: por reclamação do consumidor ou por determinação da fiscalização da ANEEL
- Amostral: por determinação da ANEEL, de acordo com sorteio realizado para cada trimestre
- Ininterrupta: por meio do sistema de medição de que trata a Resolução Normativa nº 502/2012

Os níveis de tensão considerados como adequados, precários ou críticos variam

conforme o nível de tensão do ponto de conexão da unidade consumidora. A Tabela 2.6 apresenta estes níveis para a tensão de atendimento de 380/220V.

Tabela 2.6 – Níveis de tensão em ponto de ligação em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (380/220)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	(350<TL<399)/(202<TL<231)
Precária	(331<TL<350 ou 399<TL<403)/ (191<TL<202 ou 231<TL<233)
Crítica	(TL<331 ou TL>403)/ (TL<191 ou TL>233)

Fonte: ANEEL (2022)

O instrumento de medição deve realizar a amostragem do nível de tensão a cada 10 minutos, e após uma semana de coleta de dados, com um total de 1008 leituras válidas consecutivas, realiza os cálculos dos índices de duração relativa da transgressão de tensão precária (DRP) e duração relativa de transgressão para tensão crítica (DRC). As Equações 2.4 e 2.5 apresentam, respectivamente, o cálculo para obter os índices de DRP e DRC.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2.4)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (2.5)$$

As variáveis nlp e nlc representam, respectivamente, o número de leituras precárias no intervalo de tempo e o número de leituras críticas no intervalo de tempo. O limite aceitável para o DRP é de 3% e para o DRC é de 0,5%.

2.8.2 Resolução Normativa nº 871

A Resolução Normativa (RN) nº 871 foi lançada em 11 de fevereiro de 2020 e estabelece atualizações nos módulos 6 e 8 do Prodist. Com essa atualização tornou-se obrigatório o envio mensal dos indicadores individuais de transgressão de conformidade de tensão, de uma base amostral de unidades consumidoras, à ANEEL por parte da concessionária de energia elétrica. O arquivo contendo estes indicadores deve ser gerado de maneira informatizada e deve ser auditável.

As alterações no Prodist impostas pela RN nº 871 começaram a valer a partir de 1º de janeiro de 2021, data na qual as concessionárias ficaram responsáveis por começar a

realizar o acompanhamento dos indicadores de qualidade nas unidades consumidoras da base amostral.

A base amostral de unidades consumidoras a serem monitoradas é definida pela ANEEL, com base em um sorteio realizado através de um modelo estatístico aleatório, utilizando os dados presentes na Base de Dados Geográficos da Distribuidora (BDGD). A quantidade de unidades consumidoras a ser monitorada é dada conforme o número total de unidades consumidoras atendidas pela concessionária. A Tabela 2.7 apresenta o tamanho da base amostral conforme o número total de unidades consumidoras atendidas pela concessionária.

Tabela 2.7 – Dimensão da amostra trimestral exigida a partir de 2021.

Número total de unidades consumidoras da distribuidora	Dimensão da amostra (unidades consumidoras)	Dimensão da amostra com a margem de segurança (unidades consumidoras)
N<10.000	26	30
10.000<N<30.000	36	42
30.000<N<100.000	60	66
100.000<N<300.000	84	93
300.000<N<600.000	120	132
600.000<N<1.200.000	156	172
1.200.000<N<2.000.000	210	231
2.000.000<N<3.000.000	270	297
M>3.000.000	300	330

Fonte: ANEEL (2022)

A dimensão amostral apresentada na Tabela 2.7 foi definida para o ano todo de 2021, mas a partir de 2022 há a necessidade do aumento trimestral da dimensão da base amostral. Esse também definido com base no número total de unidades consumidoras atendidas pela concessionária. A Tabela 2.8 apresenta o número de unidades consumidoras a serem adicionadas à base amostral trimestralmente.

Tabela 2.8 – Número de unidades consumidoras a ser adicionada trimestralmente à base de medições.

Número total de unidades consumidoras da distribuidora	Dimensão da amostra (unidades consumidoras)	Dimensão da amostra com a margem de segurança (unidades consumidoras)
N<10.000	3	4
10.000<N<30.000	4	5
30.000<N<100.000	7	8
100.000<N<300.000	10	11
300.000<N<600.000	14	15
600.000<N<1.200.000	18	20
1.200.000<N<2.000.000	24	26
2.000.000<N<3.000.000	30	33
N>3.000.000	34	37

Fonte: ANEEL (2022)

Para as medições amostrais realizadas a partir do ano 2021, a distribuidora deve manter registro em sistema informatizado do processo específico da unidade consumidora, pelo período mínimo de 10 anos, contendo obrigatoriamente os seguintes dados:

- Código identificador da unidade consumidora ou do ponto de conexão medido, que deve equivaler ao constante da BDGD informada pela distribuidora, conforme disposto no Módulo 6 do PRODIST;
- Período de observação de cada conjunto de 1.008 leituras válidas (ano, mês, dia, hora e minuto inicial e final).
- Histórico dos indicadores individuais DRP e DRC, associados a cada conjunto de 1.008 leituras válidas.
- Coordenadas geográficas da unidade consumidora ou coordenadas geográficas dos postes da rede de distribuição a que estiverem vinculadas as unidades consumidoras;
- Tipo de ligação e fases do circuito de baixa tensão (A, B ou C) nas quais a unidade consumidora está conectada.
- Providências para a regularização dos níveis de tensão e data de conclusão, caso existam.

3 DESENVOLVIMENTO

Com base nos objetivos desejados, e nos conceitos abordados sobre a rede LoRa, o protocolo LoRaWAN e o protocolo NBR14522, neste capítulo estão descritas as metodologias adotadas para o desenvolvimento do sistema.

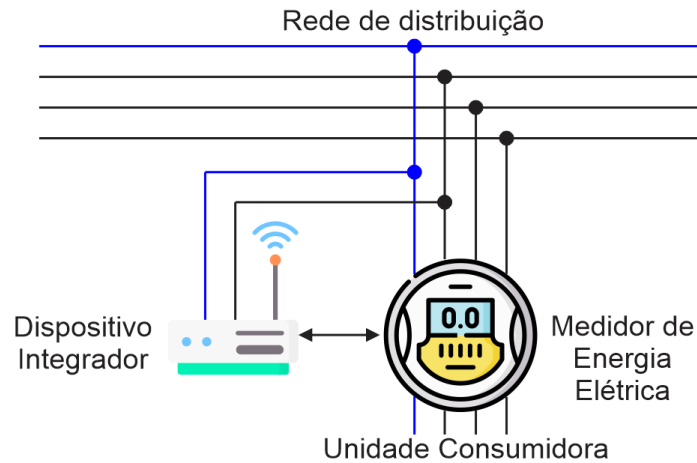
São demonstradas as definições de desenvolvimento, tanto na parte de *hardware* quanto de *firmware* do dispositivo criado para a comunicação com os medidores de energia. É apresentado o local de aplicação do sistema desenvolvido e cobertura de sinal da rede LoRa previamente instalada. Por último é apresentada a arquitetura proposta para o desenvolvimento do *software* de gerenciamento e exibição dos dados.

3.1 DISPOSITIVO

As fases iniciais do projeto de P&D compreendiam o alinhamento dos objetivos, definições de requisitos e especificações e as simulações numéricas e computacionais, para então entrar na etapa de desenvolvimento de *hardware* e *firmware* embarcado, previsto para iniciar no segundo ano de projeto. Ao final do segundo ano a previsão era da fabricação de protótipos e testes laboratoriais, porém com a entrada em vigor da RN nº 871 algumas etapas foram antecipadas no cronograma. Com isso foi determinado como requisito inicial de funcionalidade somente a obtenção dos indicadores de qualidade DRP e DRC, e foi dado início à etapa de desenvolvimento de *hardware* e *firmware*.

Uma definição determinada pela concessionária Mux Energia foi a utilização dos medidores eletrônicos E450 da fabricante Landis+Gyr. De acordo com a concessionária, esse foi o medidor certificado como compatível para o atendimento do módulo 8 do Prodist encontrado disponível no mercado para a compra. Com isso foi estabelecido que o dispositivo utilizaria a comunicação baseada no protocolo ABNT NBR 14522 via porta óptica, a comunicação disponibilizada por esse modelo de medidor. Esse medidor não apresenta nenhuma saída elétrica de corrente contínua, então, o dispositivo deverá ser conectado à rede elétrica da entrada de energia da unidade consumidora para a alimentação. A Figura 3.1 apresenta o esquema de instalação proposto para o dispositivo.

Figura 3.1 – Esquema de instalação do dispositivo.



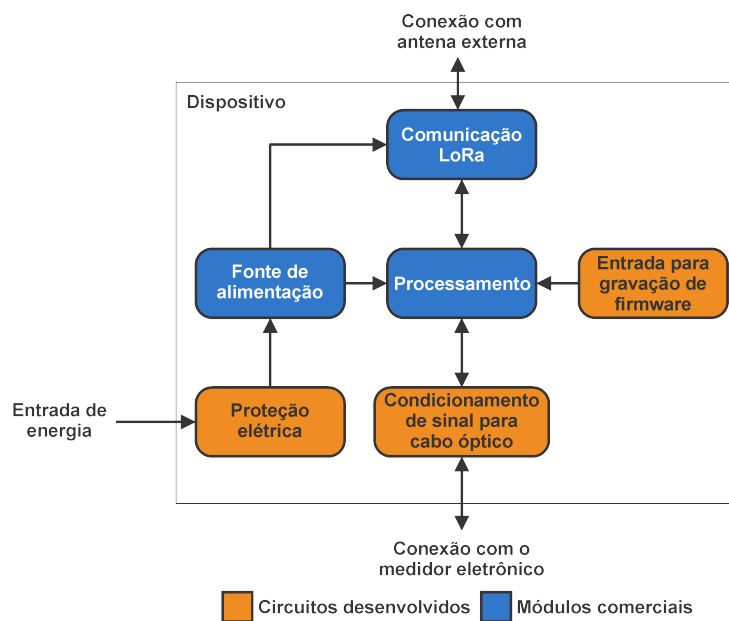
Fonte: Autor

Por questões de segurança, foi definido que o dispositivo deve ser colocado dentro da parte lacrada na caixa de entrada de energia da unidade consumidora, com isso, outro requisito foi o desenvolvimento utilizando o menor espaço possível.

3.1.1 Desenvolvimento de Hardware

Com base nos requisitos para o dispositivo, foi elaborado o diagrama de blocos apresentado na Figura 3.2 para o desenvolvimento de hardware.

Figura 3.2 – Diagrama base para desenvolvimento de hardware.



Fonte: Autor

Dado o período reduzido para o desenvolvimento do dispositivo, determinados componentes foram escolhidos visando a agilidade no tempo de desenvolvimento, como para a fonte de alimentação, processamento e comunicação Lora.

Para a função de processamento foi selecionado o ESP32, produzido pela Espressif, que apresenta as seguintes características (ESPRESSIF SYSTEMS, 2022):

- Processador: 2 núcleos com clock de até 240MHz
- Conectividade Wireless: Wi-fi 802.11 b/g/n 2.4Ghz até 150Mbps, Bluetooth V4.2 e Bluetooth Low Energy (BLE)
- Memória: ROM de 448KB, SRAM de 520KB e flash de até 16MB
- Periféricos: UART, SPI, SDIO, I²C, PWM, I²S, GPIO, ADC, DAC, sensor de toque capacitivo.

As principais funcionalidades que levaram a decisão de utilizar o ESP32 como processador foram: conectividade *Wireless* integrada, por facilitar a configuração do dispositivo a campo, e a grande disponibilidade de entradas e saídas, tornando flexível o desenvolvimento e inclusão de novas funções ao dispositivo.

Em questão de características físicas o ESP32 apresenta módulos, como o ESP32-WROOM-32D, apresentado na Figura 3.3, que diminuem drasticamente o tempo de desenvolvimento, visto que trazem todos os componentes necessários para o funcionamento do processador e integração do mesmo aos demais componentes do dispositivo.

Figura 3.3 – Módulo para PCI ESP32-WROOM-32D.



Fonte: Mouser Electronics (2022)

Os módulos baseados no processador ESP32 são produzidos em uma grande escala, visto que possuem uma gama de aplicações muito ampla. Com isso torna-se eco-

nomicamente viável a utilização desses módulos quando comparado ao uso de processadores, uma vez que ao utilizar processadores são necessários componentes eletrônicos extras para o funcionamento do mesmo e mais algum módulo extra para a comunicação Wireless.

Para a prototipagem há o módulo NodeMCU baseado no ESP32, que trata-se de uma placa de desenvolvimento, possibilitando a conexão de componentes externos, viabilizando os testes preliminares para validar a capacidade do processador de realizar todas as funções esperadas do dispositivo final. A Figura 3.4 apresenta a placa de desenvolvimento baseada em ESP32.

Figura 3.4 – NodeMCU baseado em ESP32.



Fonte: Vida de Silício (2022)

Para a comunicação com a rede LoRa foi utilizado um módulo RFM95, da fabricante HopeRF, que assim como o ESP32, vem com todos os componentes necessários para o funcionamento, bastando apenas alimentar o módulo, comunicar com o processador e colocar o conector para a antena. As principais características do módulo são (HopeRF, 2019):

- Frequência de operação: 915MHz
- Poder de transmissão: +20dBm
- Alta sensibilidade: até -144dBm
- Erro de frequência: +/-7KHz
- Tipo de modulação: LoRa
- Interface: SPI

Para a alimentação do circuito foi utilizado o módulo fonte HLK-PM03, um módulo ultra compacto da fabricante Hi-Link. Este realiza a conversão da energia em corrente alternada (AC) para o nível de tensão em corrente contínua (DC) adequado para o funcionamento de todo o circuito. As principais características do módulo são (Hi-Link, 2018):

- Tensão de entrada: 100 à 240 VAC
- Tensão de saída: 3,3 VDC
- Corrente de saída: 1 A
- Potência de saída: 3 W
- Dimensões: 34 mm x 20 mm x 15 mm

Os demais circuitos desenvolvidos para o dispositivo são:

- Proteção elétrica: conjunto de varistor e fusível para evitar a queima do dispositivo por surtos de tensão, e em caso de problemas com o dispositivo, evitar danos a rede elétrica.
- Condicionamento de sinal para cabo óptico: conjunto de resistores e transistores para adequação do sinal do processador para o emissor e receptor infravermelho do cabo óptico.
- Entrada para gravação de *firmware*: conjunto de resistores e transistores para conexão de conversor Serial/USB para a comunicação entre o dispositivo e o computador para gravação de *firmware*.

3.1.2 Desenvolvimento de Firmware

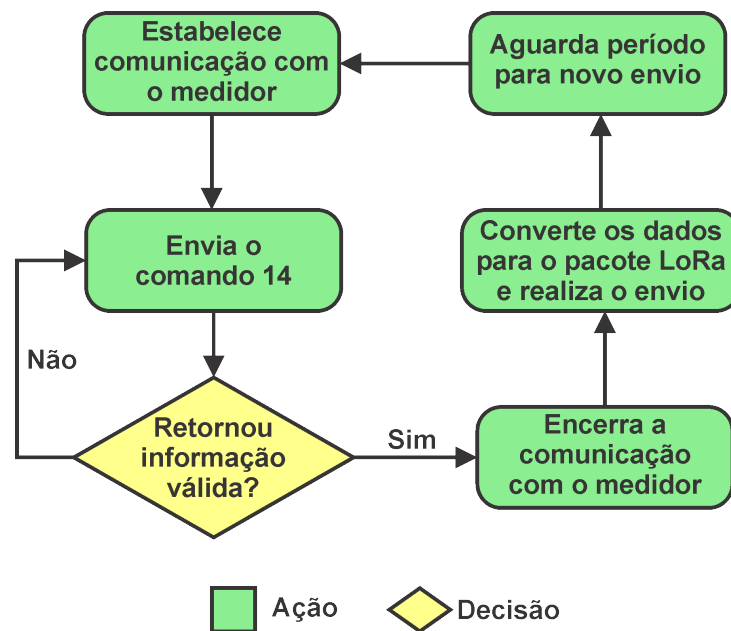
O requisito inicial do dispositivo era a capacidade de realizar a leitura dos indicadores de qualidade DRP e DRC, mas para a primeira versão de testes já foi implementado também o comando para a leitura das grandezas instantâneas da rede. Durante o período entre os testes em campo das primeiras unidade e a produção do primeiro lote para a instalação foi implementado o comando para corte e religação da unidade consumidora.

Apesar do requisito inicial ser a leitura dos indicadores de qualidade, DRP e DRC, o desenvolvimento do firmware do dispositivo foi iniciado pela leitura das grandezas instantâneas da rede, comando 14 da ABNT NBR 14522. Essa mudança no cronograma de desenvolvimento foi realizada devido ao comando para a leitura dos indicadores de qualidade ser um comando estendido, ausente na norma. Quando o comando não é estabelecido na norma, fica a cargo do fabricante definir o número do comando e os dados

necessários, mantendo o formato do pacote e velocidade de comunicação. Desse modo é necessário o contato com o fabricante para o desenvolvimento do comando. Esse contato, de acordo com as políticas da empresa Landis+Gyr, é realizado somente com o cliente, no caso, a concessionário de energia.

Para agilizar o processo de validação da comunicação o comando 14 foi implementado primeiro, pois garantindo o envio e recebimento de dados entre o dispositivo e o medidor, torna-se mais fácil a implementação dos outros comandos. Para isso foi definida a rotina de operação do dispositivo apresentada na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Diagrama de blocos do funcionamento da leitura de grandezas instantâneas.



Fonte: Autor.

Após o dispositivo estabelecer a conexão com o medidor e enviar o comando 14 ele recebe os dados e faz a checagem de CRC, para garantir a integridade das informações recebidas, caso haja problema nessa etapa ele reenvia o comando. Caso a mensagem esteja íntegra, o dispositivo encerra a sessão de comunicação com o medidor e então realiza a conversão da mensagem recebida para o pacote LoRa, uma vez que a mensagem recebida possui 256 bytes, e o pacote LoRa, para não exceder o limite de *airtime* com as configurações aplicadas, tem seu tamanho máximo limitado a 49 bytes para atender o protocolo LoRaWAN. Então o dispositivo aguarda o prazo para novo envio, que foi definido como 5 minutos para a leitura das grandezas instantâneas.

Para a leitura dos indicadores de qualidade a sequência lógica de operação do dispositivo é a mesma, somente com diferença no comando enviado e no período de envios, nesse caso de uma vez ao dia. Os dados referentes ao DRP e DRC são gerados semanalmente, porém por se tratar de um dado crítico foi estabelecido o envio a cada 6 horas do dado como forma de redundância, para garantir o recebimento.

Também são extraídos do medidor os dados referentes as faltas de energia. O medidor armazena os horários de falta e retorno de energia, e também contadores de faltas e retornos. Esses dados são enviados sempre que o dispositivo é iniciado, e como forma de redundância, são enviados diariamente também.

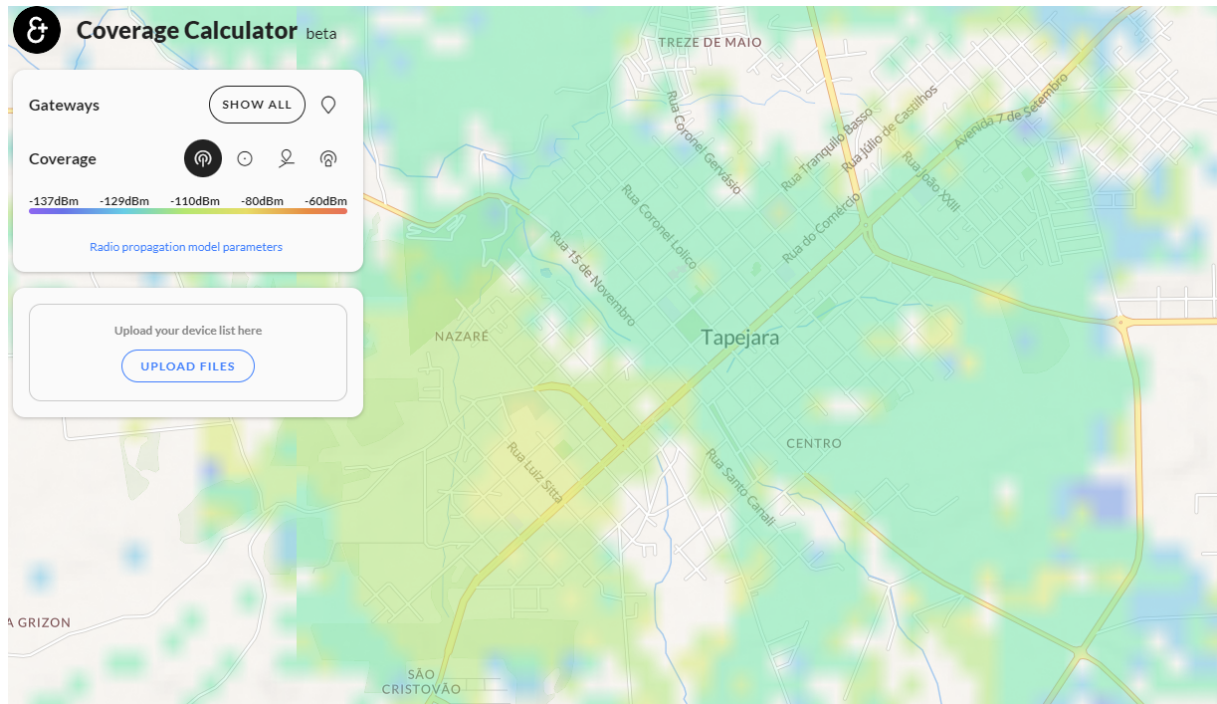
Para realizar os comandos de corte e religamento da unidade consumidora é necessário que o dispositivo abra uma sessão de comunicação com senha. Nesse processo o dispositivo envia um comando solicitando a abertura de sessão com senha e o medidor retorna uma resposta que contém uma *string*. Então, o dispositivo combina a senha com a *string* recebida do medidor através de uma metodologia definida pelo fabricante do medidor e envia ao medidor. Caso o medidor receba o dado da maneira esperada é aberta a sessão de comunicação com níveis maiores de acesso, caso sejam realizadas 5 tentativas sem sucesso o medidor para de responder a solicitação de abertura de sessão com senha pelo período de 24 horas.

Quando um comando de corte ou religamento é enviado a partir da plataforma, o mesmo fica pendente por um período de até 30 minutos. Caso nesse tempo o dispositivo não receba o comando e execute a ordem, a mesma é excluída e é reportado erro ao operador.

3.2 LOCAL DE APLICAÇÃO

A instalação do sistema foi realizada na cidade de Tapejara, a qual está sob concessão da empresa Mux Energia. A cidade, localizada na região norte do estado do Rio Grande do Sul, possui uma população estimada de 24.973 habitantes, e uma região urbana de pequeno porte. A Figura 3.6 apresenta a área urbana da cidade de Tapejara com as dimensões aproximadas.

Figura 3.7 – Mapa de cobertura da rede LoRa já existente em Tapejara.



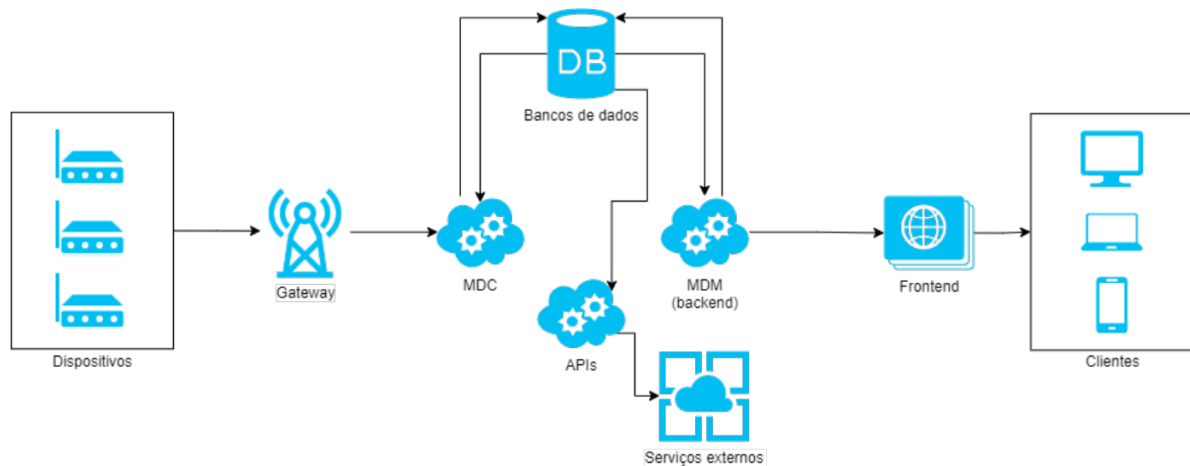
Fonte: Autor.

Para garantir uma maior área de cobertura e melhorar intensidade de sinal nas regiões já cobertas, no projeto, foi definida a instalação de outros 2 *gateways*. O critério para alocação dos novos *gateways* foi garantir a maior área coberta, mesmo que em algumas regiões a qualidade do sinal seja prejudicada.

3.3 SOFTWARE EM NUVEM PARA GERENCIAMENTO E VISUALIZAÇÃO

Para realizar a integração entre o sistema de comunicação e o usuário foi desenvolvido um software em nuvem. O software é responsável pelo armazenamento de dados, apresentação dos mesmos ao usuário e ao recebimento de comandos do usuário para o sistema. A Figura 3.8 apresenta a arquitetura utilizada no software.

Figura 3.8 – Arquitetura de funcionamento do *software*.



Fonte: Autor.

O *Gateway* captura os pacotes dos dispositivos e envia para o *Measurement Data Collector* (MDC) via internet utilizando o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT). O MDC recebe os dados e os insere em um banco de dados próprio para séries temporais, o que aumenta o desempenho das inserções e das buscas. Essa parte do sistema não pode ser acessada por nenhum outro nó além dos *gateways*.

O *Measurement Data Manager* (MDM) tem como função buscar os dados armazenados pelo MDC e entregá-los aos usuários. Os usuários utilizam o *frontend*, que consiste na interface do sistema, para requisitar os indicadores de qualidade de acordo com as unidades consumidoras e o período de competência. Então, o MDM busca os dados e entrega um arquivo auditável para o usuário.

Os indicadores de qualidade também podem ser requisitados por meio de uma *Application Programming Interface* (API), que disponibiliza *endpoints* para o sistema integrado de gestão empresarial (ERP) utilizado pelas concessionárias. Dessa forma, a gestão dos dados fica centralizada e os arquivos auditáveis podem ser enviados automaticamente para a agência reguladora.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos do desenvolvimento do dispositivo físico, da validação de comunicação, tanto com o medidor quanto com a rede LoRa. É apresentada a simulação de cobertura obtida na cidade de Tapejara com a instalação dos novos *gateways* previstos. São apresentadas as principais métricas de sinal obtidas após a instalação do sistema e, ao final do capítulo, são discutidos todos os resultados apresentados.

Devido à necessidade de manter a segurança e privacidade das informações, os dados referentes a localização de *gateways* e de unidades consumidoras são omitidas, assim como os números utilizados para referência as unidades consumidoras são números fictícios, diferentes dos utilizados pela concessionária.

4.1 DISPOSITIVO

O dispositivo desenvolvido é montado em uma caixa com dimensões de 60x75x36mm (AxLxP), com conector para antena do tipo RP-SMA, cabo óptico padrão ABNT NBR14522 e entrada de alimentação 100-240VAC. A Figura 4.1 apresenta o dispositivo desenvolvido.

Figura 4.1 – Protótipo desenvolvido.



Fonte: Autor.

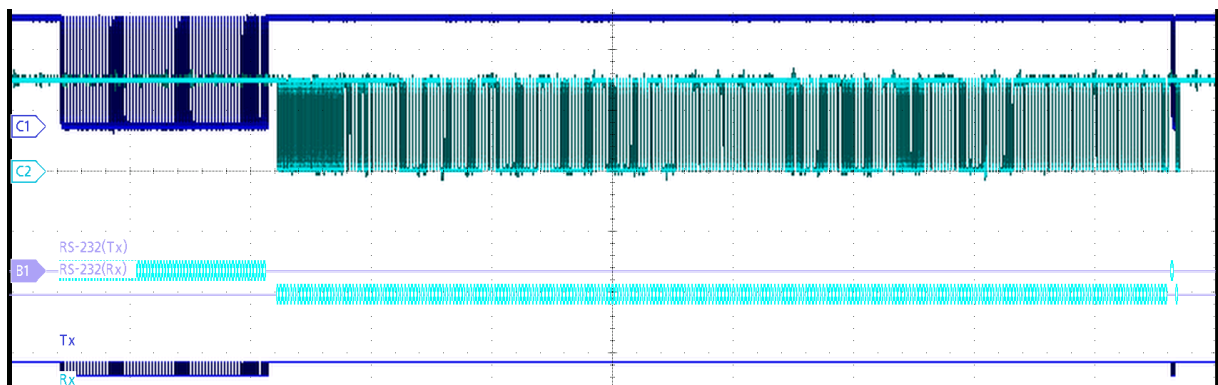
Os testes realizados no dispositivo seguiram as seguintes etapas:

- Testes laboratoriais de comunicação via cabo óptico com o medidor Landys+Gyr E450.
- Teste comparativo de simulação em Free Space Path Loss e dispositivo LoRa.
- Teste em campo com duas unidades.

4.1.1 Testes de comunicação com medidor de energia elétrica

Para a realização do teste de comunicação com o medidor, foram utilizados dois canais do osciloscópio para monitorar as etapas de envio e recebimento de sinal do cabo óptico no dispositivo. Foi utilizado o comando 14 como referência para validar a comunicação entre os dispositivos. A Figura 4.2 apresenta a janela completa de comunicação, compreendendo o envio do comando e o recebimento da resposta.

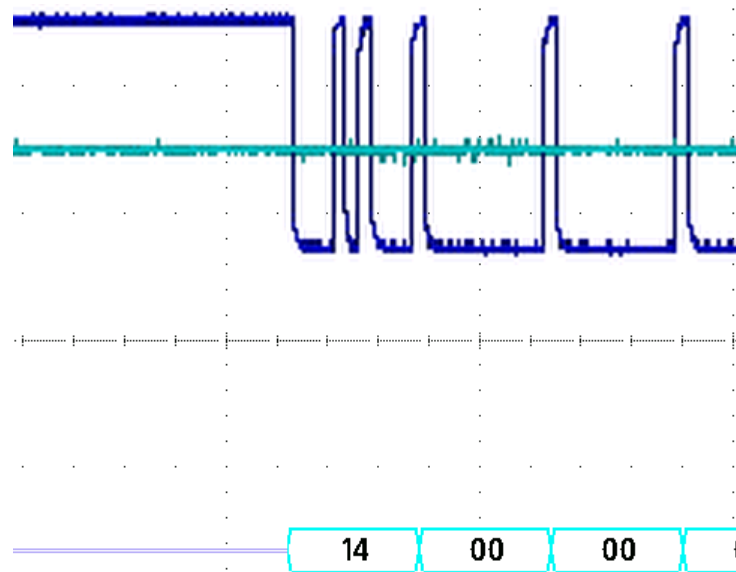
Figura 4.2 – Janela completa de comunicação entre o dispositivo e o medidor.



Fonte: Autor.

O sinal de cor azul representa o comando enviado pelo dispositivo e o sinal de cor verde representa a resposta recebida. A Figura 4.3 apresenta o byte "14" no início, representando o comando enviado.

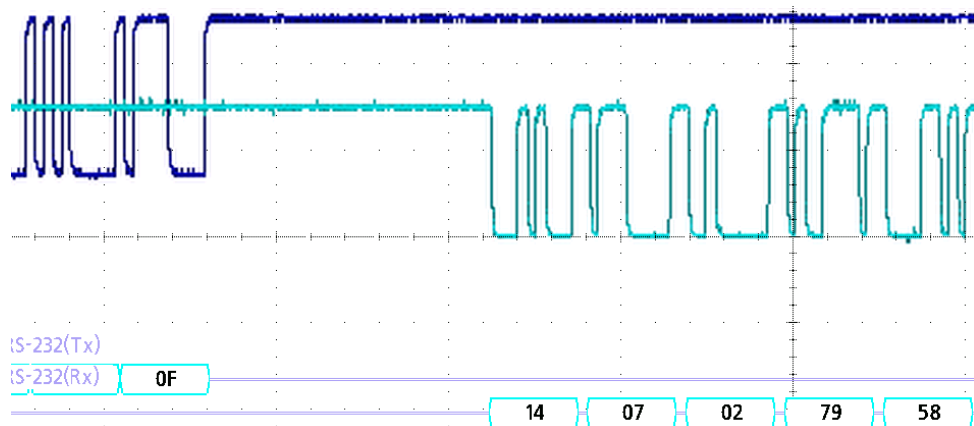
Figura 4.3 – Início do comando enviado pelo dispositivo.



Fonte: Autor.

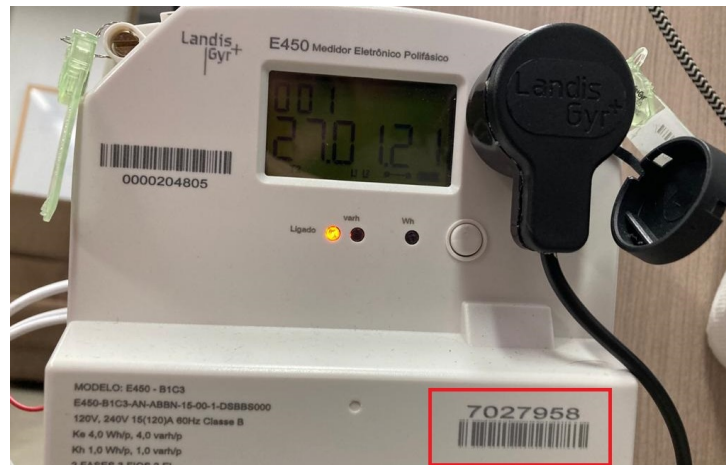
Ao terminar de receber o comando, o medidor processa e envia a resposta, essa iniciando com o byte referente ao comando recebido, seguido do número de série do medidor. A Figura 4.4 apresenta o final do comando enviado e o início da resposta do medidor, e a Figura 4.5 apresenta o medidor utilizado com destaque para o número de série do mesmo.

Figura 4.4 – Final do comando do dispositivo e início da resposta do medidor.



Fonte: Autor.

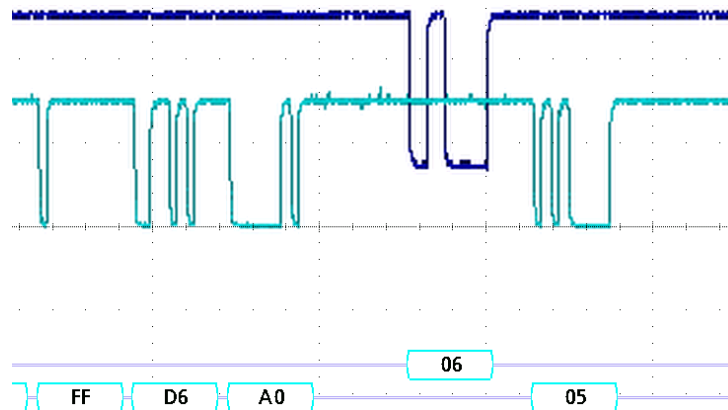
Figura 4.5 – Medidor utilizado para o teste laboratorial.



Fonte: Autor.

Na resposta enviada pelo medidor, os dois últimos bytes são o CRC. Após o dispositivo efetuar a checagem de CRC ele retorna o byte "06" para confirmar o recebimento, e o medidor, ao receber o byte "06" envia o byte "05" para confirmar que recebeu a confirmação da mensagem. A Figura 4.6 apresenta o final da resposta do medidor e a confirmação de recebimento de ambos os dispositivos.

Figura 4.6 – Final da troca de mensagens entre os dispositivos.



Fonte: Autor.

4.1.2 Testes de comunicação com a rede LoRa

O dispositivo foi configurado no plano AU915, utilizando os Data Rates 2 e 3, ou seja, SF9 e SF10 com largura de banda de 125kHz, alternando entre 8 diferentes canais para a comunicação e método de ativação OTAA.

Para validar a comunicação com a rede LoRa foi realizado um comparativo com simulação em Free Space Path Loss, com uma distancia do dispositivo até o gateway de 1,1km. A Figura 4.7 apresenta a posição geográfica do teste.

Figura 4.7 – Local de teste da comunicação LoRa.



Fonte: Autor.

O local utilizado para o teste foi em frente à Incubadora Tecnológica de Santa Maria (ITSM), localizada dentro do campus sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O gateway utilizado como referência encontra-se instalado no topo do prédio da reitoria da universidade.

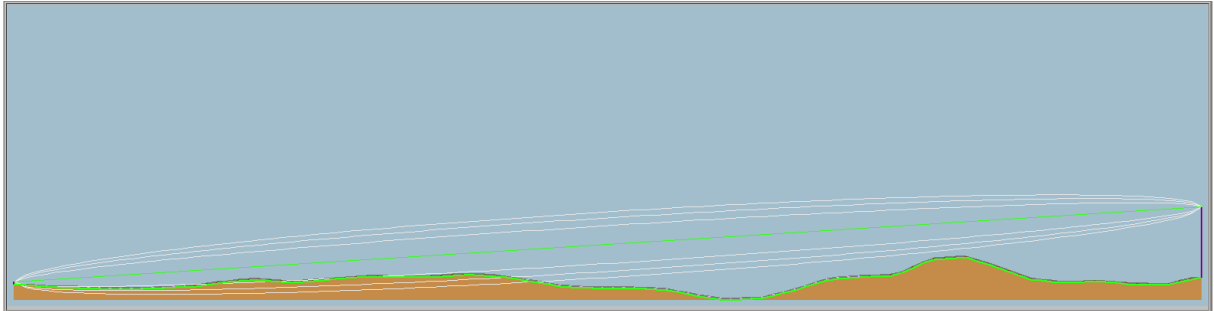
Foram realizadas as simulações utilizando os modelos ITM e ITWOM utilizando, respectivamente, as plataformas Radio Mobile e Coverage. A primeira plataforma apresenta como resultado um relatório com dados referentes as diferentes perdas estimadas durante o cálculo além da potência de sinal recebida. A Tabela 4.1 apresenta os dados obtidos pela simulação através da plataforma Radio Mobile.

Tabela 4.1 – Resultado de simulação com a plataforma Radio Mobile.

Free Space Loss	92,47dB
Obstruction Loss	-4,89dB
Forest Loss	0,00dB
Urban Loss	0,00dB
Statistical Loss	0,00dB
Total Path Loss	94.01dB
Received Signal	-68,01dBm

A Tabela 4.1 demonstra que para a área em questão não há dados referentes as perdas devido a vegetação e a urbanização, fatores esses presentes no local de teste. Outro resultado apresentado no relatório é uma vista da topografia da região, apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Relevo entre o dispositivo de teste e o gateway.



Fonte: Autor.

A plataforma Coverage apresenta um resultado simplificado, com apenas o nível de sinal obtido e a distância entre o dispositivo e o gateway. O nível de sinal obtido através dessa simulação foi de -88dBm.

Para o comparativo com as simulações foram coletados os valores de RSSI de 5 envios no local utilizado na simulação, os dados coletados são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Nível de RSSI obtido em 5 envios.

Envio	1º	2º	3º	4º	5º	Média
RSSI (dBm)	-103	-99	-109	-95	-109	-103

O resultado apresentou uma diferença significativa em relação as simulações, porém na área do teste há algumas edificações, e na linha de visão entre o dispositivo e o gateway, na Avenida Roraima, há uma quantidade significativa de árvores.

Com o dispositivo instalado dentro do prédio da ITSM foram coletados dados do envio ao mesmo gateway da simulação, a Tabela 4.3 apresenta os dados sobre 10 envios.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos a partir de uma sequência de 10 envios.

Envio	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	10º
RSSI (dBm)	-109	-115	-114	-113	-114	-114	-112	-	-113	-109
SNR	1,5	3,8	4,5	-1	3,5	4,8	4,5	-	4,2	5,2

No 8º envio a mensagem não chegou ao gateway sendo monitorado, porém na região do teste há outro gateway LoRa instalado, assim, em um teste de uma semana,

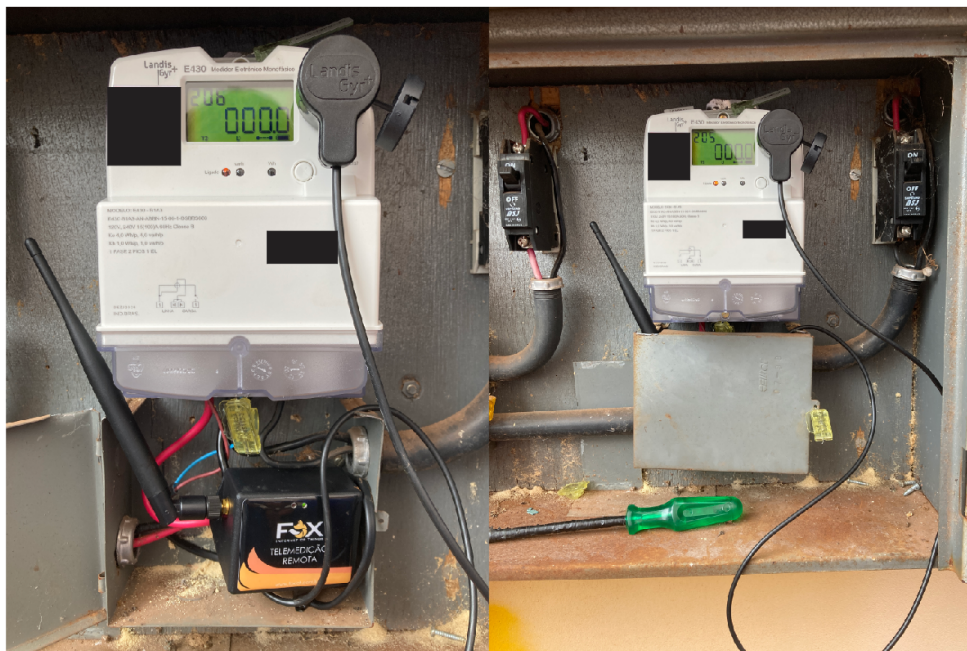
com o período de envio de 1 minuto, a taxa de entrega foi de 100%, com um total de 10.080 envios.

4.1.3 Teste na cidade de Tapejara

Os testes iniciais foram realizados utilizando a instalação de rede LoRa já existente na cidade de Tapejara. Foram definidas duas unidades consumidoras a serem monitoradas, aqui definidas como unidade consumidora 1 (UC1) e unidade consumidora 2 (UC2). As unidades definidas para teste fazem parte da base a ser monitorada permanentemente, mas possuem diferentes características escolhidas conforme explicado a seguir.

Sabendo que as plataformas utilizadas para a simulação em Free Space Path Loss não possuem os dados regionais necessários para os cálculos de perdas devido a urbanização da cidade, a UC1 foi escolhida uma residência próxima ao gateway, cerca de 250 metros, porém a entrada de energia encontra-se instalada entre duas casas próximas, ambas de dois andares. A Figura 4.9 apresenta o dispositivo instalado na UC1.

Figura 4.9 – Instalação do dispositivo na UC1.

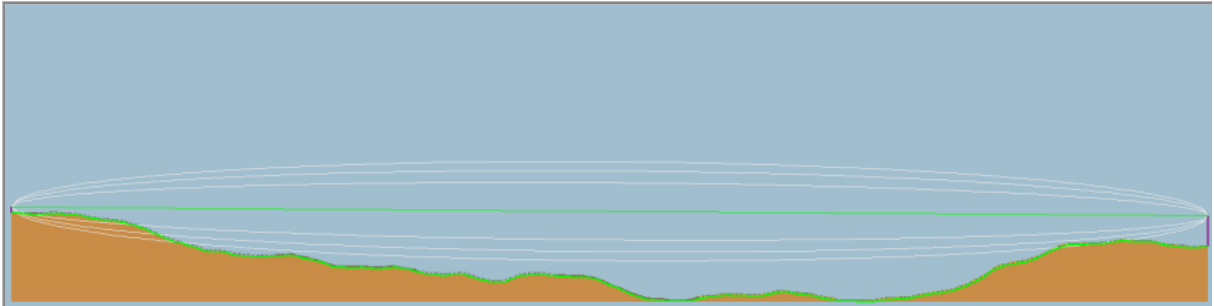


Fonte: Autor.

A UC2 foi definida em um ponto no outro lado da cidade, distante cerca de 2,5 quilômetros, sendo uma das maiores distâncias possíveis dentro do perímetro urbano da cidade. O ponto de instalação da entrada de energia da UC2 fica em local alto em relação ao relevo da cidade, porém na direção onde seria a linha de visão com o gateway, há um obstáculo no lado oposto da rua, uma residência de maior porte, de dois andares. A Figura

4.10 apresenta a vista topográfica entre o gateway e a UC2.

Figura 4.10 – Relevo entre o gateway e a UC2.



Fonte: Autor.

Na UC2 o dispositivo foi instalado de maneira similar à UC1, como demonstrado na Figura 4.9. No entanto com essa instalação ambas não tiveram resultados satisfatórios em relação a comunicação, na UC1 a taxa de entrega ficou abaixo de 30%, e na UC2 não estava havendo comunicação na rede LoRa. Para melhorar a comunicação foi realizada a troca por uma antena com cabo extensor, onde foi possível a instalação com a mesma na parte exterior da caixa de entrada de medição. A Figura 4.11 e a Figura 4.12 apresentam as unidades consumidoras com a antena externa.

Figura 4.11 – UC1 com a antena externa.



Fonte: Autor.

Figura 4.12 – UC2 com a antena externa no topo do poste de entrada de energia.



Fonte: Autor.

A Tabela 4.4 apresenta os dados obtido para cada UC através das simulações e de uma média de 10 envios dos dispositivos.

Tabela 4.4 – Comparativo entre simulações e valores recebidos.

Unidade consumidora	Radio Mobile	Coverage	Recebido
UC1	-59,48dBm	-82dBm	-104,85dBm
UC2	-80,96dBm	-111dBm	-90,60dBm

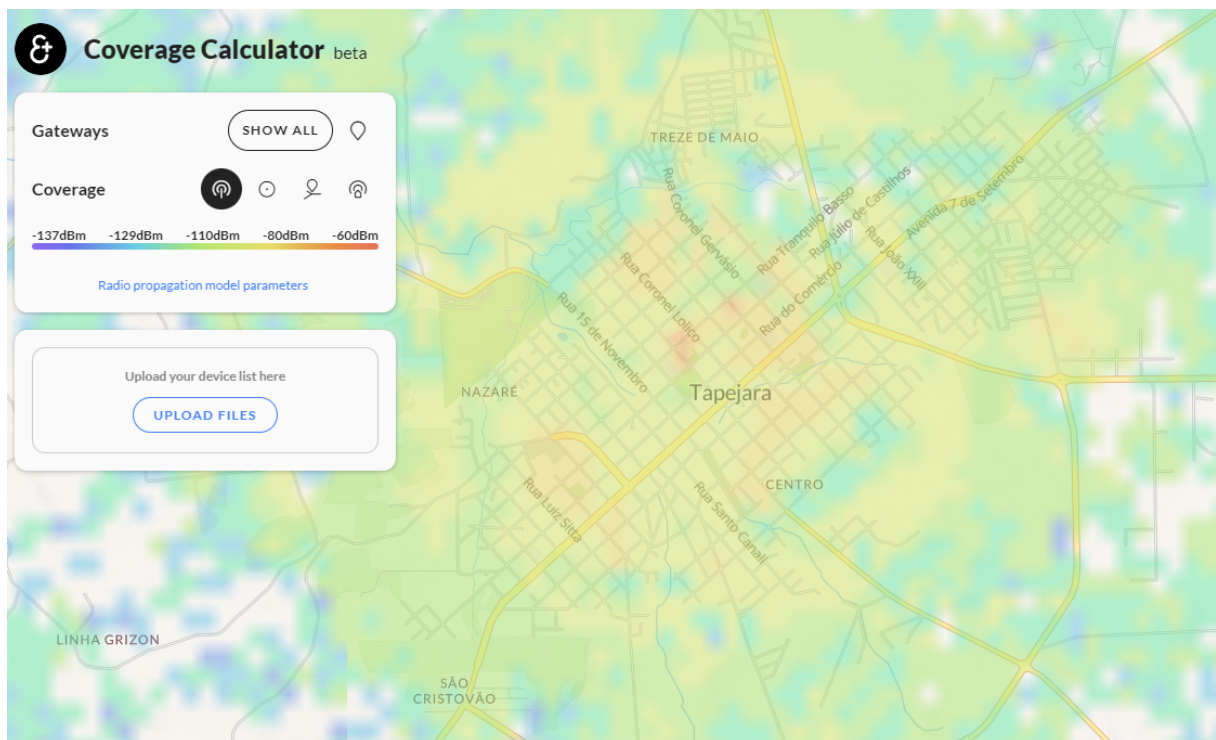
Fonte: Autor.

4.1.4 Simulações de cobertura da instalação dos novos gateways

Para as simulações de cobertura foi utilizada o modelo de terreno irregular com obstruções (ITWOM v3.0). Este modelo foi definido com base na região de instalação, uma vez que a instalação das antenas dos gateways encontram-se em altitudes relativamente baixas quando comparadas à torres de transmissão de redes de longo alcance, como redes celulares por exemplo. Nesse contexto, a atenuação causada pela urbanização e matas presentes tornam-se de grande relevância.

Para a instalação dos novos gateways haviam 4 locais disponíveis, dois na região central e dois nos bairros na região nordeste da cidade. Para a definição das posições de instalação o principal critério foi a garantia de cobertura de sinal sobre as áreas onde encontram-se as unidades consumidoras definidas pela ANEEL para o monitoramento permanente. Com esse critério foram definidas as posições e o resultado da simulação resultante é demonstrado na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Resultado simulado da ampliação da rede LoRa em Tapejara.



Fonte: Autor.

4.2 SISTEMA INSTALADO

Após a instalação de 172 dispositivos foram analisados dados de RSSI, SNR e taxa de entrega durante o período de 7 dias para avaliar a qualidade da comunicação. A

instalação foi realizada utilizando a antena conectada diretamente ao dispositivo, com isso 5 dispositivos encontraram-se com indicadores de qualidade da comunicação baixos. A antena desses dispositivos foi substituída pela antena externa. A Tabela 4.5 apresenta os dados de RSSI, SNR e taxas de entrega (T.E.) anteriores e posteriores a troca de antenas.

Tabela 4.5 – Comparativo antes e depois da troca de antenas.

UC	Antes da troca			Depois da troca		
	RSSI (dBm)	SNR (dB)	T.E. (%)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	T.E. (%)
UC3	-117,5	-10,2	46,2	-107	6,2	93,1
UC4	-121	-12,8	13	-117	-3	76,9
UC5	-113,5	-10,6	35,4	-117	-1,4	68,6
UC6	-117,5	-5,4	60,2	-115,5	-2,6	80,2
UC7	-116,5	-3,7	72,7	-109	5,3	82,4

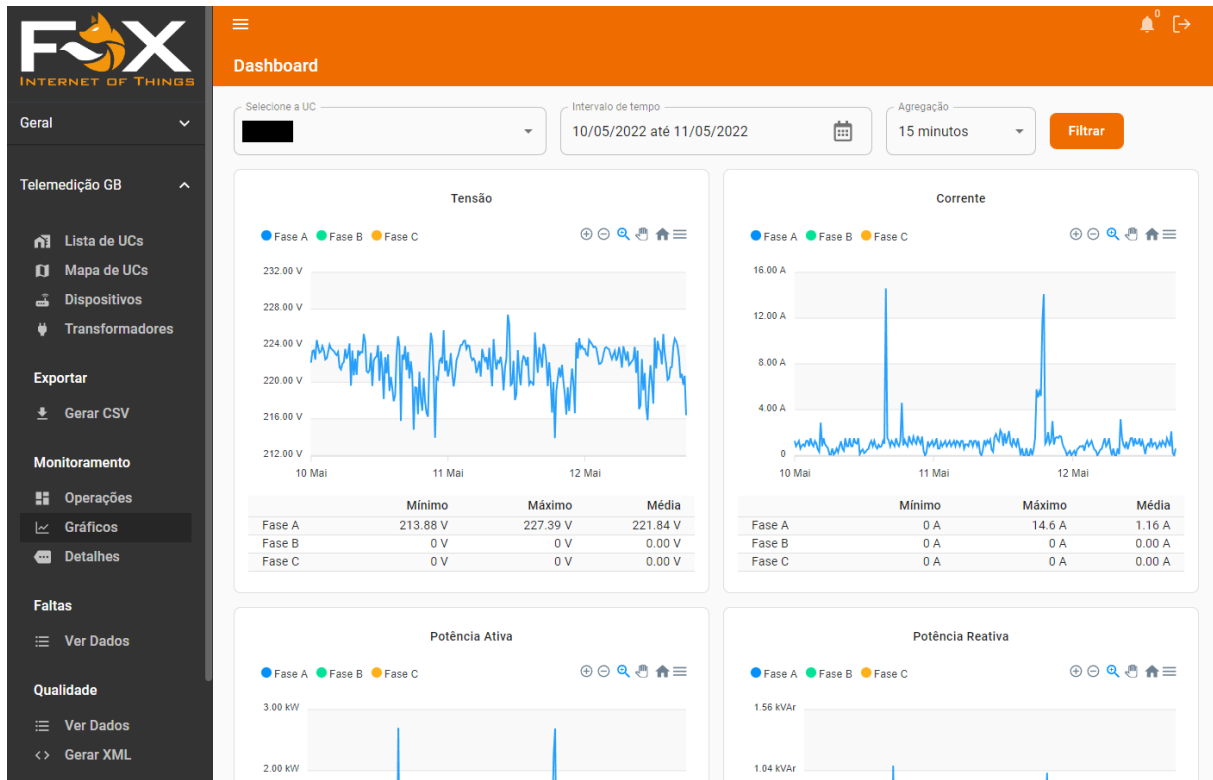
Após 6 meses da instalação do sistema foi realizado uma análise da taxa de entrega dos dispositivos durante um período de 30 dias. Durante esse período a taxa de entrega média do sistema foi de 95,10%, o dispositivo com menor taxa de entrega foi a UC4 citada na Tabela 4.5, com uma taxa de entrega de 53,9%. A UC5 citada na Tabela 4.5 ainda aparece entre as piores taxas de entrega, com 67,7%, enquanto as outras UCs com antenas trocadas apresentam taxas acima de 80%. Com exceção de 5 dispositivos, todos os outros encontram-se com taxa de entrega acima de 75%.

Durante o período de 6 meses foram realizadas 13 tentativas de corte de energia elétrica, das quais duas apresentaram falha em tentativas consecutivas na mesma unidade consumidora, antes da terceira tentativa já não era mais necessário o corte da unidade em questão. Após os 11 comandos bem sucedidos, todas as unidades foram religadas com sucesso na primeira tentativa.

4.3 SOFTWARE DE GERENCIAMENTO

Com a plataforma desenvolvida é possível o monitoramento e consulta de valores históricos das seguintes variáveis do sistema: tensões por fase, correntes por fase, potências ativas, reativas e aparentes por fase, fator de potência por fase, energia consumida total, energia gerada total, data e hora de falta de energia e retorno, e valores dos indicadores de qualidade DRC e DRP. A Figura 4.14 apresenta parte da visualização de gráficos de valores históricos das grandezas elétricas.

Figura 4.14 – Tela de gráficos da plataforma de gerenciamento.



Fonte: Autor.

Outras funcionalidades da plataforma incluem: criação de alertas personalizáveis, geração de arquivo .XML para o envio à ANEEL e envio de comandos para o corte e religamento das unidades consumidoras. Para a geração dos arquivos .XML a plataforma já realiza os cálculos dos indicadores mensais a partir dos índices semanais, conforme os meses de competência selecionados pelo usuário. A Figura 4.15 apresenta uma consulta de dados de DRP e DRC para a geração de um arquivo .XML.

Figura 4.15 – Tela de consulta de indicadores de qualidade.

The screenshot shows the 'Gerar código XML' page in the Fox IoT system. The interface includes a sidebar with navigation options such as 'Gerar CSV', 'Operações', 'Gráficos', and 'Ver Dados'. The main area features search filters for 'Seleção as UCs', 'Mês de início', 'Ano de início', 'Mês de fim', and 'Ano de fim'. A table titled 'Lista de dados' displays quality indicators with columns for 'codigo_UC', 'sigla_indice', 'valor_indicador', 'periodo_competencia', and 'ano_competencia'. The table shows 8 rows of data, with the second row having a value of 0.60 highlighted in green. A 'Buscar Dados' button and a 'Salvar como XML' button are also visible.

codigo_UC	sigla_indice	valor_indicador	periodo_competencia	ano_competencia
[REDACTED]	DRP	0.00	1	2022
[REDACTED]	DRC	0.00	1	2022
[REDACTED]	DRP	0.60	2	2022
[REDACTED]	DRC	0.07	2	2022
[REDACTED]	DRP	0.00	3	2022
[REDACTED]	DRC	0.00	3	2022
[REDACTED]	DRP	0.00	4	2022
[REDACTED]	DRC	0.00	4	2022

Registros por página: 10 1-8 de 8

Copyright © Fox IoT 2022. Versão 1.6.11

Fonte: Autor.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A comunicação entre dispositivo e medidor mostrou-se funcional para a comunicação via protocolo NBR14522 na comunicação convencional leitor-medidor. No entanto, esse tipo de comunicação não é o único utilizado atualmente, somente dentro do protocolo NBR14522 há outros tipos de comunicação, que também poderiam ser aplicáveis aos medidores de consumo residencial, fora outros protocolos existentes. A falta de um padrão de comunicação é mencionada também por Lloret et al. (2016), ressaltando que isso causa um empecilho a interoperabilidade entre os diferentes fabricantes, dificultando a instalação de uma AMI. Além da necessidade da implementação de outros protocolos no dispositivo, aumenta a complexidade para a configuração do dispositivo no momento da instalação.

Em relação a comunicação LoRa, foram observadas divergências entre as simula-

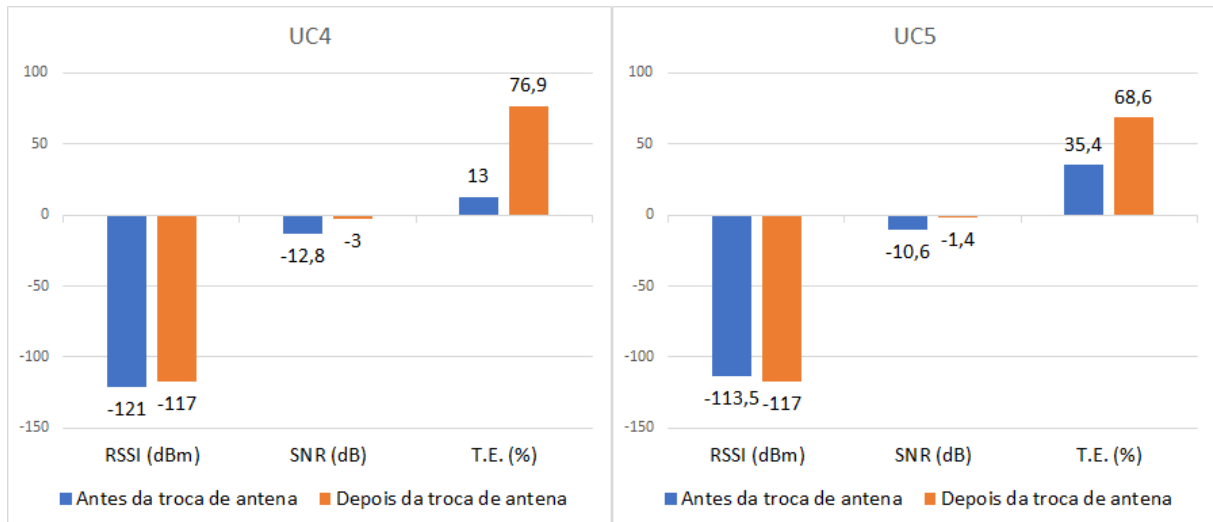
ções e os resultados obtidos. Porém eram esperados resultados práticos inferiores aos simulados devido aos ambientes de teste. No caso do primeiro teste, realizado em frente à ITSM, há a presença de prédios no entorno e vegetação no caminho entre o dispositivo e o *gateway*, no teste da UC1 há grande presença de construções e no teste da UC2 há pouca interferência de construções. Com isso foi observado que tanto no teste da ITSM quanto no teste da UC1 foi obtido um resultado inferior mesmo à simulação com modelo ITWOM, que considera uma maior perda por obstáculos no caminho. Por outro lado, no caso da UC2, que encontra-se a uma maior distância e com poucas obstruções, o resultado ficou muito próximo ao da simulação em ITM, sendo que a simulação em ITWOM apresentou um nível de atenuação do sinal significativamente maior.

Uma situação comparável é apresentada por Kasampalis et al. (2013), onde os autores compararam simulações baseadas no modelo ITWOM e no modelo de terreno irregular (Longley-Rice ITM). No comparativo apresentado, o transmissor de referência tratava-se de um emissor na banda UHF (490MHz) com a antena instalada a uma altura de 70 metros, com envios em distâncias de até 86 quilômetros de distância.

Os autores atestaram que em maiores distâncias as simulações no modelo ITWOM apresentaram maiores divergências, sendo que em resultados práticos os níveis de sinais foram melhores, mais próximos aos resultados do modelo ITM. Com base nesses resultados, foi chegada a conclusão que nesse caso a simulação no modelo ITWOM superestima as perdas causadas pelas obstruções, que no caso dessa aplicação era pequena devida a grande altitude utilizada.

Nos dispositivos que necessitaram a troca de antenas foi observado que os que possuíam um SNR inferior a -10dB apresentavam uma taxa de entrega significativamente menor que os outros. Esse fato se deve aos *Data Rates* utilizados, que conforme a Tabela 2.2, para o SF9 o SNR limite é -12,5dB e para o SF10 é -15dB, logo muitos pacotes são descartados devidos aos níveis de SNR. Com a troca de antenas, apesar de um impacto pequeno no RSSI, com a melhora do SNR houve grande melhora na taxa de entrega. A Figura 4.16 apresenta um comparativo das métricas de RSSI, SNR e taxa de entrega na UC4 e UC5, as mais impactadas, antes e depois da troca de antenas.

Figura 4.16 – Comparativo antes e depois da troca de antenas na UC4 e UC5.



Fonte: Autor.

Quanto ao funcionamento do sistema de comunicação em geral, foi atingido um resultado satisfatório, uma vez que menos de 5% dos dispositivos instalados apresentam taxas menores que 75% de taxa de entrega das mensagens. Com a adoção de técnicas para a alternância randômica entre canais e adição pequenas alterações no período de envio, também de forma randômica, a utilização de somente dois *Data Rates* já mostrou-se suficiente para evitar as colisões de pacotes.

A colisão de pacotes ocorre quando dois, ou mais, dispositivos enviam a informação ao mesmo tempo, com o mesmo *Data Rate* e utilizando o mesmo canal. Caso não sejam aplicadas técnicas para alterações randômicas nesses parâmetros pode ocorrer o evento que numa falta de energia, no momento em que há o retorno, dois ou mais dispositivos iniciem enviando com as mesmas configurações e haja a colisão de pacotes em todos os envios dos dispositivos.

Esse problema foi observado por Vizzotto (2020), onde em um sistema de AMI, alguns dispositivos, apesar de não apresentarem níveis ruins de sinal, tinham seus pacotes descartados devido a colisões. No período de análise, dois dispositivos apresentaram taxas de 0,26% e 0,50%, o que mostra que a falta de aleatoriedade nos parâmetros de envio na rede LoRa pode impossibilitar, quase que totalmente, a comunicação.

Sobre os comandos de corte, as falhas ocorridas não representam um problema visto que os comandos de corte de energia são enviados somente na situação de inadimplência do consumidor, logo não há necessidade de atuação em curto período de tempo. Para o comando de religamento também não há a necessidade de rápida atuação, visto que a concessionária tem o período de 24 horas para realizar a religação da energia após a quitação do débito. Sem a utilização do sistema, com a necessidade de deslocamento até o local para realizar cortes e religamentos, o período médio para a realização das ações é de algumas horas.

Em vista de funcionalidades e tráfego de mensagens por hora, o sistema implementado é comparável ao sistema de comunicação com medidores de energia elétrica implementado na cidade de Kuta na ilha de Bali (WIBISONO et al., 2017). O sistema de Kuta conta com 1000 *smart meters* comunicando a cada 30 minutos através da rede LoRa utilizando 4 *gateways*. A Tabela 4.6 apresenta um comparativo entre o tráfego de mensagens no sistema de Kuta e do sistema de Tapejara.

Tabela 4.6 – Comparativo dos sistemas de Kuta e Tapejara

	Kuta	Tapejara
Nº de dispositivos	1000	172
Periodo de envio (min)	30	5
Nº de gateways	4	3
Envios por hora	2000	2064
Envios por hora por gateway	500	688

Em termos de funcionalidades o sistema aplicado aplicado por Wibisono et al. (2017), além de apresentar os dados à concessionária de energia, também apresenta os dados aos clientes, sendo esse um ponto importante do sistema, uma vez que lá existem clientes pré pagos, além dos clientes pós pagos. Com o sistema os dois tipos de clientes podem acompanhar o consumo em tempo real, e ainda os clientes pré pagos podem adicionar créditos ao medidor. Também foi explorada a função de corte e religamento do medidor, mas não é citado se há o monitoramento das grandezas elétricas do medidor.

Em um comparativo do sistema implementado em Kuta e o sistema apresentado nesse trabalho, é possível notar que o sistema apresentado nesse trabalho explora melhor a capacidade dos *gateways* LoRa, uma vez que encontram-se cobrindo uma área maior com tráfego de mensagens similar, e utilizando um *gateway* a menos. Wibisono et al. (2017) cita que houve 100% de sucesso na leitura dos medidores, mas não cita sobre taxas de entrega do sistema.

5 CONCLUSÃO

O objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento e implementação de um dispositivo de comunicação bidirecional, de longo alcance, compatível com o protocolo ABNT NBR14522. Para isso foi proposto um dispositivo com comunicação através de rede LoRa compatível com comunicação via porta óptica para medidores de energia elétrica. O dispositivo foi validado em laboratório tanto a comunicação com medidores quanto a comunicação de longo alcance via rede LoRa. Posteriormente o dispositivo foi testado em campo, onde seus resultados de intensidade de sinal foram comparados com simulações. Após validado foi realizada a instalação de 168 unidades.

Após o sistema instalado foi possível o monitoramento das grandezas elétricas da rede em tempo real, assim como o armazenamento dos dados históricos em bancos de dados, além do telecomando para cortes e religamentos.

Como principais contribuições do trabalho é possível destacar o comparativo entre os resultados de simulações de sinal na rede LoRa, mostrando que é necessário uma grande atenção em relação aos obstáculos presentes no ambiente de utilização. Quando há poucos obstáculos, as simulações mostram-se com resultados semelhantes aos encontrados após a instalação dos dispositivos. Mas apesar das diferenças nos resultados, as simulações foram importantes para a definição de posicionamento dos gateways, para diminuir os impactos causados devido ao relevo. Outro fato importante é que nos resultados de simulações ainda havia uma grande margem para atenuações, visto que a rede LoRa consegue operar mesmo com baixos valores de RSSI.

Outra importante contribuição foi a validação do uso da rede LoRa para uma AMI em uma rede de unidades consumidoras de classe B. Mesmo com a utilização de apenas dois *Data Rates* para os dispositivos e utilizando um período de envio relativamente baixo para redes de comunicação LPWAN foi obtida uma boa taxa de entrega. Com isso é possível afirmar que o número de unidades consumidoras monitoradas ainda pode sofrer uma grande expansão somente utilizando diferentes *Data Rates* e aumentando o período de envio, evitando colisões de pacotes. O tamanho limite do pacote LoRaWAN foi suficiente para a obtenção das grandezas elétricas em pacote único. Os dados sobre registro de faltas de energia, retornos e os indicadores de qualidade foram realizados em envios separados, porém como esses dados se alteram somente após longos períodos de tempo isso não representa uma limitação.

5.1 PRÓXIMOS PASSOS DO PROJETO

Até a finalização desse trabalho pode ser dito em relação ao escopo geral do projeto que a solução proposta foi desenvolvida e validada em campo, porém para a conclusão de todos os requisitos ainda haverá os seguintes avanços:

- **Implementação de outros protocolos de comunicação com medidores:** Além do protocolo PIMA, já citado nesse trabalho, outro protocolo que vem sendo adotado por fabricantes de medidores é o DLMS/COSEM. Diferente dos outros protocolos, que tratam-se de protocolos criados no Brasil, o protocolo DLMS é definido na norma IEC-62056, utilizado internacionalmente. Recentemente foi apresentado o conceito *DLMS over LoRaWAN*, onde é realizada uma compressão das informações do protocolo DLMS para envio através da rede LoRa com protocolo LoRaWAN (LoRa Alliance, 2021).
- **Integração da plataforma de gerenciamento com a plataforma de cobrança da concessionária:** Para a geração das contas de energia elétrica é utilizada outra plataforma, essa integrada ao sistema financeiro da empresa. Com a integração da plataforma de gerenciamento com a plataforma de cobrança é possível a geração automática das faturas, e ao instalar dispositivos em rotas completas de faturamento é possível reduzir o trabalho do leiturista.
- **Desenvolvimento de dispositivo integrado para o corte e religamento:** O desenvolvimento de um dispositivo para a função de corte e religamento é importante para a modernização de medidores que ainda não possuem essa funcionalidade. No protocolo NBR14522 já está previsto esse comando, porém nem todos os medidores possuem essa função integrada. O protocolo PIMA, por ser uma comunicação unidirecional, já implica que os medidores que operam com esse protocolo não possuem função de corte e religamento integrado.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Além dos objetivos já previstos no projeto, há ainda algumas melhorias e desenvolvimentos que podem ser realizados para tornar o sistema ainda mais funcional.

- **Reconfiguração dos *Data Rates* para alocação ideal:** Apesar do bom funcionamento do sistema em geral, para facilitar uma expansão futura do sistema é recomendado a utilização de alocação dinâmica de *Data Rate*, utilizando algum método para a detecção do *Data Rate* ideal para a posição do dispositivo. Para que assim

além de melhorar a performance da rede, tenha uma fácil instalação, dispensando o conhecimento sobre configuração de rede LoRa pelo instalador.

- **Desenvolvimento de dispositivo com outro tipo de comunicação de longo alcance:** A instalação de uma rede LoRa torna-se atrativa financeiramente em locais onde haverá uma grande densidade de dispositivos instalados. Após a instalação, o custo mensal para manter a rede é muito baixo, ao contrário de uma rede celular por exemplo, onde não há custo de instalação, porém haverá o custo mensal por ponto, onde em uma instalação com grandes quantidades de dispositivos haverá um grande custo mensal. Porém em casos de instalação em um ponto isolado, pode se tornar mais viável a instalação de um dispositivo que use algum padrão de rede celular. Outro caso onde a rede LoRa não é uma boa opção é no caso de clientes de classe A, onde o faturamento da energia consumida é mais complexo, e necessita da extração da memória de massa do medidor. Para isso é necessário um grande tráfego de dados, que o protocolo LoRaWAN não é capaz de suprir.
- **Desenvolvimento de plataforma para o cliente ter acesso aos dados:** Com uma plataforma para o consumidor ter acesso a seus próprios dados, seria possível um consumo mais consciente da energia. Com o acompanhamento diário o consumidor pode entender melhor como a mudança de seus hábitos pode interferir no consumo. A partir dos dados armazenados do cliente também torna possível uma simulação precisa de viabilidade econômica da adoção da tarifa branca.
- **Transformador de distribuição monitorado com todas as unidades consumidoras telemedidas:** A partir do monitoramento de um transformador de energia elétrica e todos os clientes conectados ao mesmo é possível extrair outras métricas do sistema. Com este monitoramento é possível mensurar as perdas totais, técnicas e não técnicas, naquela rede. Fazendo uma análise do nível das perdas, caso seja um nível anormal, e acompanhando a queda de tensão ao longo da rede é possível estimar o possível ponto de problema na rede, seja ele um problema técnico ou um ponto com um possível furto de energia. Em caso de sobrecarga em alguma fase do transformador, torna-se mais fácil o remanejamento das cargas, uma vez que é possível ver quais unidades consumidoras contribuem mais para essa sobrecarga, e analisar se a substituição da fase de alimentação pode sanar o problema sem a necessidade de troca de transformador.

5.3 PUBLICAÇÕES REALIZADAS RELACIONADAS AO TRABALHO

Ao decorrer do mestrado, o seguinte artigo em congresso foi publicado:

ADAM, L., BARRIQUELLO, C. H., BERNARDON, D. P., CARLOTO, F. G., MAZIERO, L., MARCHESAN, T. B. "**Desenvolvimento de Dispositivo para Comunicação à Longa Distância com Medidores de Energia Elétrica para Consumidores do Grupo B**" Proceedings of the 13th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2021), Santa Maria, Brasil, 2021.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 14519 - Medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos) - Especificação**. [S.I.], 2000. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 23 p.

_____. **NBR 14522 - Intercâmbio de informações para sistemas de medição de energia elétrica**. [S.I.], 2008. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 141 p.

ADDVALUE. **Satcom-IoT via LoRa-WAN**. Addvalue, 2018. Acesso em 20 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.addvaluetech.com/satcom-iot-via-lora-wan/>>.

ANEEL. **Prodlist: Módulo 8 - qualidade do fornecimento de energia elétrica**. 2022. Acesso em 06 abr. 2015. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf>.

BRASIL. **Procedimentos de Distribuição - Prodlist**. Ministério de Minas e Energia, 2022. Acesso em 06 abr. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodlist>>.

COPEL. **ETC 3.11 – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA SAÍDA SERIAL AS-SÍNCRONA UNIDIRECIONAL**. [S.I.], 2018. DEPARTAMENTO DE MEDIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO, 12 p. Acesso em 08 nov. 2020. Disponível em: <<https://copel0.sharepoint.com/sites/documentos-site-copel/Documentos%20Compartilhados/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2Fdocumentos%2Dsite%2Dcopel%2FDocumentos%20Compartilhados%2FEspecifica%C3%A7%C3%B5es%20t%C3%A9cnicas%20de%20equipamentos%20de%20medi%C3%A7%C3%A3o%2FETC311%20Saida%20Serial%20Medidores%20eletronicos%2Epdf&parent=%2Fsites%2Fdocumentos%2Dsite%2Dcopel%2FDocumentos%20Compartilhados%2FEspecifica%C3%A7%C3%B5es%20t%C3%A9cnicas%20de%20equipamentos%20de%20medi%C3%A7%C3%A3o&p=true>>.

DYER, S. A. **Suvery of Instrumentation and Measurement**. United States of America: John Wiley and Sons, Inc., 2001. 875 p.

EDISON, T. A. **Electric Meter**. [S.I.], 1881. US Patent 251.545, 2 p. Acesso em 08 nov. 2020. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US251545>>.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32WROOM32E ESP32WROOM32UE**: Datasheet. [S.I.], 2022. 32 p. Acesso em 23 jun. 2021. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf>.

GARCIA, F. D. et al. Power metering: History and future trends. In: **2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)**. [S.I.: s.n.], 2017. p. 26–33.

GHOSLYA, S. **LoRa is a chirp spread spectrum modulation based wireless networking standard**. All About LoRa and LoRaWAN, 2020. Acesso em 20 jan. 2021. Disponível em: <<https://www.sghoslya.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>>.

GUNGOR, V. C. et al. A survey on smart grid potential applications and communication requirements. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 9, n. 1, p. 28–42, 2013.

HAN, J.; WANG, J. An enhanced key management scheme for lorawan. **Cryptography**, v. 2, n. 4, 2018. ISSN 2410-387X. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2410-387X/2/4/34>>.

Hi-Link. **3W Ultra-small PowerModule**: Pm03/pm01/pm09/pm12. Version: 2.21. [S.l.], 2018. 13 p. Acesso em 23 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>>.

HopeRF. **RFM95W/96W/98W**: Low power long range transceiver module. Version: 2.0. [S.l.], 2019. 123 p. Acesso em 23 jun. 2021. Disponível em: <<https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190801/RFM95W-V2.0.pdf>>.

HOURNEY, A. **Smart Metering Technology Promotes Energy Efficiency for a Greener World**. Analog Dialogue, 2009. Acesso em 08 nov. 2020. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-43/number-1/articles/smart-metering-tech-promotes-energy-efficiency%20.pdf>>.

KASAMPALIS, S. et al. Comparison of itm and itwom propagation models for dvb-t coverage prediction. In: . [S.l.: s.n.], 2013.

LI, L. et al. Research on the architecture of automatic meter reading in next generation network. In: **2008 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 92–97.

LLORET, J. et al. An integrated iot architecture for smart metering. **IEEE Communications Magazine**, v. 54, n. 12, p. 50–57, 2016.

LoRa Alliance. **What is LoRa and LoRaWAN, and how to use it?** LoRa Alliance, 2019. Acesso em 20 jan. 2021. Disponível em: <<http://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRaWAN101.pdf>>.

_____. **RP002-1.0.1 LoRaWAN® Regional Parameters**. 2020. Acesso em 30 mar. 2021. Disponível em: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/rp_2-1.0.1.pdf>.

_____. **What is LoRaWAN**. LoRa Alliance, 2020. Acesso em 20 jan. 2021. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/about-lorawan/>>.

_____. **DLMS over LoRaWAN®**. 2021. Acesso em 20 jan. 2022. Disponível em: <<http://www.utcamericalatina.org/novoSite/wp-content/uploads/2021/02/Lora-Alliance.pdf>>.

Mouser Electronics. **Espressif Systems ESP32-WROOM-32D-N4**. 2022. Acesso em 06 abr. 2015. Disponível em: <<https://br.mouser.com/ProductDetail/Espressif-Systems/ESP32-WROOM-32D-N4?qs=Li%252BoUPsLEntUgv1ft2QYWQ%3D%3D>>.

NICOLAU, C. T. **Medição de Energia Elétrica: impactos da mudança tecnológica no setor jurídico de uma concessionária distribuidora de energia elétrica**. 2013. 84 25. Monografia (Dissertação de mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

NOURA, H. N. et al. Lorawan security survey: Issues, threats and possible mitigation techniques. **Internet Things**, v. 12, p. 100303, 2020.

ONS. **Histórico de operação**. 2022. Acesso em 20 jan. 2022. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>.

REZA, M. N. H. et al. Industry 4.0–technological revolution and sustainable firm performance. In: **2021 Emerging Trends in Industry 4.0 (ETI 4.0)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.

SEMTECH. **SX1276/77/78/79**: Datasheet. Revision 7. [S.l.], 2020. 132 p. Acesso em 20 jan. 2021. Disponível em: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001Rbr/6EfVZUorrpoKFvaF_Fkpgp5kzjiNyiAbqcpqh9qSjE>.

_____. **What are LoRa® and LoRaWAN®?** LoRa and LoRaWAN: Technical overview, 2020. Acesso em 20 jan. 2021. Disponível em: <<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>>.

SURESH, P. et al. A state of the art review on the Internet of Things (IoT) history, technology and fields of deployment. **International Conference on Science, Engineering and Management Research (ICSEMR)**, 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7043637>>.

The Things Network. **Device Classes**. 2020. Acesso em 30 mar. 2021. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/classes/>>.

_____. **End Device Activation**. 2020. Acesso em 30 mar. 2021. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/end-device-activation/>>.

Vida de Silício. **ESP32 NodeMcu – DevKit v1**. 2022. Acesso em 06 abr. 2015. Disponível em: <<https://www.vidadesilicio.com.br/produto/esp32-esp-wroom-32-nodemcu/>>.

VIZZOTTO, W. D. **Implantação e avaliação de infraestrutura avançada de medição de energia em uma instituição pública**. 2020. 90 f. Dissertação (Dissertação) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020.

WHYTE, A. G. **Forty Years of Electrical Progress**. London: Ernest Benn, 1930. 159 p.

WIBISONO, G. et al. Development of advanced metering infrastructure based on lora wan in pln bali toward bali eco smart grid. In: **2017 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4.