

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO**

Luan Lorenzo dos Santos Borges

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE FALTAS EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO REDE SIGFOX**

Araranguá

2019

Luan Lorenzo dos Santos Borges

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE FALTAS EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO REDE SIGFOX**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia de Computação.
Orientador: Prof. Dr. Roderval Marcelino

Araranguá

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Borges, Luan Lorenzo dos Santos
Sistema de monitoramento de faltas em redes de
distribuição de energia elétrica utilizando rede
SigFox, 2019.
76 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus
Araranguá, Graduação em Engenharia de Computação,
Araranguá, 2019.

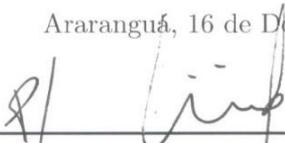
Inclui referências.

1. Engenharia de Computação. 2. Monitoramento de
faltas. 3. Rede Sigfox. 4. Aplicação web dinâmica.

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE FALTAS EM
REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
UTILIZANDO REDE SIGFOX**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado para a obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia de Computação”, e aprovado em sua forma final pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Araranguá, 16 de Dezembro 2019.



Prof. Dr. Fabrício de Oliveira Ourique
Coordenador do Curso

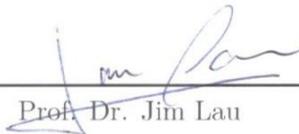
Prof. Dr. Mauricio Girardi
Coordenadoria Especial de Física,
Química e Matemática
SIAPE 1543564

Portaria 1901/2019/6R

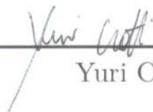
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Roderval Marcelino
Orientador



Prof. Dr. Jim Lau



Yuri Crotti

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Geanny e Márcio, por todo suporte e incentivo que me deram durante esses anos e por sempre me apoiarem em minhas buscas pelos meus sonhos e objetivos. Sou grato a minha irmã, Maria Lua, pela amizade e companheirismo nas diversas situações que passamos juntos.

Agradeço aos amigos que fiz durante esses cinco anos de graduação, e que de alguma forma impactaram minha vida positivamente. Aos meus amigos de infância que, mesmo distantes fisicamente, sempre se fizeram presentes em minha vida.

Agradeço ao professor Roderval Marcelino pela paciência e pelas orientações que foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho. Além disso, sou grato pela oportunidade de participar do Laboratório de Pesquisa Aplicada (LPA), onde foi possível trabalhar em projetos que me proporcionaram grandes aprendizados.

Por fim, gostaria de agradecer à Universidade Federal de Santa Catarina por me proporcionar essas experiências, baseadas nos pilares de ensino, pesquisa e extensão de qualidade.

*A vida não se acaba quando deixamos de
viver e sim quando deixamos de buscar
algo nela.*

Bob Marley

RESUMO

Um dos principais problemas nas redes de distribuição de energia elétrica é a ocorrência de faltas que geram prejuízos tanto para as concessionárias, quanto para os consumidores. Neste cenário, as agências reguladoras estabelecem indicadores de continuidade que levam em consideração informações sobre a frequência e a duração da interrupção e, a partir desse valores, aplicam penalidades às concessionárias. Os processos de correção e diagnóstico dessas faltas ainda apresentam abordagens tradicionais em grande parte das concessionárias, onde o processo inicia apenas a partir da ligação dos consumidores e é baseado nas estimações dos operadores. Com isso, técnicas de localização dessas faltas que visam a diminuição do tempo de restabelecimento do sistema vêm sendo pesquisadas e desenvolvidas baseadas em novas tendências tecnológicas. Neste trabalho é proposto um modelo de monitoramento de faltas baseado em uma rede de sensores sem fio, que utiliza a rede Sigfox como meio de comunicação e uma aplicação web como plataforma de visualização baseado em um diagrama dinâmico da rede analisada. A partir do sistema proposto, foi desenvolvido um protótipo do dispositivo de monitoramento e da aplicação, onde foram realizados testes para avaliação da comunicação a partir da taxa de sucesso na transmissão das mensagens de eventos gerados a partir da variação de uma grandeza elétrica e na análise dos índices de SNR e RSSI do sinal em diferentes distâncias. Além disso, foi avaliado o comportamento da aplicação web a partir de uma simulação em software utilizando o modelo de rede IEEE 37 Node Test Feeder e a partir das mensagens do dispositivo configurado.

Palavras-chave: Monitoramento de faltas. Rede Sigfox. Aplicação web dinâmica.

ABSTRACT

One of the main problems in electricity distribution networks is the occurrence of faults that generate losses for both utilities and consumers. In this scenario, regulatory agencies establish continuity indicators that take into account information about the frequency and duration of the interruption and, based on these values, apply penalties to the concessionaires. Correction and diagnosis of these faults still present traditional approaches in most concessionaires, where the process starts only from the consumers connection and is based on the operators estimates. With this, techniques of localization of these faults that aim to reduce the system restoration time have been researched and developed based on new technological trends. This work proposes a fault monitoring model based on a wireless sensor network, which uses the Sigfox network as a communication medium and a web application as a visualization platform based on a dynamic diagram of the analyzed network. From the proposed system, a prototype of the monitoring device and the application was developed, where tests were performed to evaluate the communication from the success rate in the transmission of event messages generated from the variation of an electrical quantity and in the analysis. SNR and RSSI indices of the signal at different distances. In addition, the behavior of the web application was evaluated from a software simulation using the IEEE 37 Node Test Feeder network model and from the configured device messages.

Keywords: Fault monitoring. Sigfox Network. Dynamic web application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Fluxograma de desenvolvimento	26
Figura 2	Diagrama esquemático de um sistema elétrico de potência	30
Figura 3	Taxa de dados necessária versus capacidade de alcance das tecnologias de comunicação por rádio: posicionamento LPWAN.	36
Figura 4	Arquitetura de rede LoRaWAN	39
Figura 5	Arquitetura da rede Sigfox	42
Figura 6	Diagrama de sequência WebSocket sobre TCP	44
Figura 7	Modelo lógico do sistema proposto	48
Figura 8	Fluxograma do funcionamento do dispositivo	50
Figura 9	Representação do modelo no <i>back-end</i> da Sigfox	52
Figura 10	Formato JSON do corpo da requisição <i>callback</i>	53
Figura 11	Diagrama de contêiner da aplicação web	55
Figura 12	Diagrama de sequência - processamento do <i>callback</i>	56
Figura 13	Diagrama entidade relacionamento	57
Figura 14	Multi-Sensor Sigfox Embedded Development Kit	59
Figura 15	Protótipo do dispositivo para teste	60
Figura 16	Configuração da mensagem de transmissão para teste ..	61
Figura 17	API REST da camada de serviços	62
Figura 18	Página web de monitoramento das faltas	63
Figura 19	Pontos de realização do experimento	65
Figura 20	Gráfico da distância em relação ao índice SNR	66
Figura 21	Gráfico da distância em relação ao índice RSSI	67
Figura 22	Gráfico da distância em relação á eficiência da comunicação	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Visão geral das tecnologias LPWAN: Sigfox, LoRaWAN	37
Tabela 2	API WebSocket orientada a eventos.....	44
Tabela 3	Requisitos funcionais da aplicação web	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNI	Confederação Nacional da Indústria	23
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica	23
LPWAN	Low Power Wide Area Network	25
IoT	Internet of Things	35
ITU	International Telecommunication Union	35
ISM	Industrial, Scientific and Medical	36
MAC	Media Access Control	37
LoRa	Long Range	37
FSK	Frequency Shifting Keying	37
CSS	Chirp Spread Spectrum	37
CI	Circuitos Integrados	38
TDOA	Time Difference of Arrival	38
GPS	Global positioning system	40
D-BPSK	Differential Binary Phase-Shift Keying	40
UNB	Ultra Narrow Band	40
DSL	Digital Subscriber Line	41
HTTP	Hypertext Transfer Protocol	42
API	Application Programming Interface	42
REST	Representational State Transfer	42
TCP	Transmission Control Protocol	43
UTF-8	8-bit Unicode Transformation Format	43
SVG	Scalable Vector Graphics	45
XML	Extensible Markup Language	45
CSS	Cascading Style Sheets	45
SMIL	Synchronized Multimedia Integration Language	45
URL	Uniform Resource Locator	53
JSON	JavaScript Object Notation	53
SQL	Structured Query Language	57

LISTA DE SÍMBOLOS

V	Volts	30
DEC	Duração equivalente de interrupção por consumidor	32
FEC	Frequência equivalente de interrupção por consumidor	32
DIC	Duração de interrupção individual por consumidor	32
FIC	Frequência de interrupção individual por consumidor	32
TA	tempo de atendimento de emergência	33
Hz	Hertz	36
UL	Uplink	36
DL	Downlink	36
dB	Decibel	66
dBm	Decibel miliwatt	66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS	25
1.1.1 Objetivo Geral	25
1.1.2 Objetivos Específicos	25
1.2 METODOLOGIA	26
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	27
2 TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA	29
2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	29
2.2 FALTAS NO SISTEMA ELÉTRICO	31
2.2.1 Indicadores de qualidade de serviço	32
3 REDES LPWAN	35
3.1 LORAWAN	36
3.2 SIGFOX	39
3.2.1 Arquitetura da rede Sigfox	41
4 TECNOLOGIAS WEB	43
4.1 WEBSOCKET	43
4.2 <i>SCALABLE VECTOR GRAPHICS</i>	45
5 MODELO PROPOSTO	47
5.1 VISÃO GERAL	47
5.1.1 Dispositivo de monitoramento de faltas	48
5.1.2 Infraestrutura da Sigfox	52
5.1.3 Aplicação web	53
5.1.3.1 Camada do servidor	54
5.1.3.2 Camada de armazenamento	57
5.1.3.3 Camada do cliente	58
6 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO	59
6.1 PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO	59
6.2 PROTÓTIPO DA APLICAÇÃO WEB	61
7 TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	69
8.1 TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os sistemas de transmissão e distribuição energética vêm se tornando cada vez mais complexos. Esta complexidade está relacionada ao aumento da demanda, ocasionada pelo crescimento dos núcleos populacionais e ao desenvolvimento das indústrias. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia realizado pela Empresa de Pesquisa Energética EPE (2018), entre 2017 a 2027, é esperado um crescimento anual de 2,3% no consumo final de energia. Além desse cenário, as empresas de comercialização e distribuição de energia elétrica se encontram em um mercado de grande competitividade devido às normas estabelecidas pelas agências reguladoras, que estabelecem índices de qualidade. Com isso, as concessionárias têm focado seus investimentos com o objetivo de obter um aumento no desempenho técnico e financeiro (RAMOS, 2014).

Um dos principais problemas enfrentados pelas concessionárias para manter a eficiência e a confiabilidade do sistema de distribuição de energia elétrica são as faltas. Uma falta em um circuito é qualquer falha que interfere no fluxo normal da corrente, danificando o funcionamento do sistema e a entrega da energia elétrica aos consumidores finais. Pode ser causada por descargas atmosféricas, falhas de equipamentos, colisão, entre outras (STEVENSON, 1986). Esta descontinuidade no funcionamento gera prejuízos tanto para as concessionárias quanto para os consumidores domésticos e industriais. Uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional da Indústria CNI (2016) mostra que 67% das empresas que utilizam a eletricidade como principal fonte em seu processo produtivo são impactadas de forma significativa em razão das interrupções no serviço.

Dentro deste cenário, há a necessidade de um órgão regulador que garanta a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos consumidores. No Brasil, este papel é realizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Para isso, ela estabelece indicadores de continuidade que levam em consideração informações sobre a frequência e a duração da interrupção. Com esses indicadores, são estabelecidos padrões mínimos da qualidade do serviço fornecido pelas concessionárias, os quais, quando não cumpridos, acarretam o repasse de compensações financeiras aos consumidores. Dessa maneira, a concessionária, além de perder o valor não distribuído durante a falta, também é penalizada com descontos na fatura do consumidor (FANUCCHI, 2014).

Tendo estes fatores em vista, são necessários métodos que rees-

tabeleçam o fornecimento na área afetada no menor intervalo de tempo possível. A grande maioria das redes de distribuição de energia elétrica apresentam sistemas de proteção, que realizam um papel importante na prevenção de danos e nas interrupções geradas pelas faltas. Entretanto, estes sistemas atuam efetivamente apenas em curtos temporários. Ocorrem também os curtos permanentes e, nesses casos, é necessário a localização e intervenção de equipes de manutenção para religar com sucesso o sistema (STEVENSON, 1986).

Os procedimentos tradicionais de diagnóstico e correção de faltas iniciam-se a partir das ligações de reclamações dos consumidores. A partir de então, são executadas duas etapas: a localização geográfica do defeito e o deslocamento de equipes capacitadas para correção do problema. Este método tem como base a avaliação dos operadores para estimar a situação do defeito, considerando suas experiências em análise e planejamento de ações corretivas. A complexidade dos sistemas de distribuição de energia elétrica atuais torna esse procedimento uma tarefa difícil, podendo gerar um intervalo de tempo elevado de restabelecimento do sistema. A diminuição do tempo de localização da ocorrência tem impacto direto na diminuição do tempo em que a área afetada fica sem fornecimento e, conseqüentemente, nos índices de qualidade (SOUZA, 2008).

Novos métodos de controle e monitoramento dos sistemas de distribuição energética que visam a diminuição do tempo de localização e, conseqüentemente, restabelecimento mais rápido estão sendo pesquisados e desenvolvidos com fortes investimentos por parte das concessionárias. O foco principal está em soluções tecnológicas e procedimentos que automatizem e forneçam uma melhor disponibilização e aproveitamento da informação com objetivo de diminuir os custos operacionais através de uma maior assertividade das equipes de manutenção de campo tanto em relação à área geográfica da falha quanto ao tipo de equipamento com defeito (FANUCCHI, 2014).

Atualmente, vem surgindo soluções baseadas no conceito de *Internet of Things* (IoT) que tem como principal característica a interconexão e troca de dados entre dispositivos. Este conjunto de soluções são aplicados em diversos campos como: segurança, rastreamento de ativos, agricultura, *smart cities*, entre outros.

As aplicações em IoT possuem requisitos específicos como longo alcance, baixa taxa de dados, baixo consumo de energia e custo-benefício. Dentro desses requisitos e das limitações das outras tecnologias utilizadas nesse tipo de aplicação, foi impulsionado o surgimento de uma nova tecnologia de comunicação sem fio: *Low Power Wide Area Network*

(LPWAN) (MEKKI et al., 2019).

As tecnologias LPWAN vêm ganhando popularidade em aplicações industriais e de pesquisa devido suas características de baixo consumo energético, longo alcance e comunicação de baixo custo, destacando Sigfox, LoRa e NB-IoT que lideram o mercado. Este tipo de rede proporciona comunicação de longo alcance de 10 a 40km em zonas rurais e de 1 a 5km em zonas urbanas. Além disso, é altamente eficiente em termos de energia e custo (MEKKI et al., 2019).

Baseado no que foi exposto nessa introdução, neste trabalho é proposto um método de monitoramento de faltas em redes de distribuição elétrica utilizando os conceitos de IoT através de uma rede de dispositivos conectados por uma infraestrutura LPWAN. Dentro do modelo proposto, será desenvolvido um protótipo utilizando a rede Sigfox e uma aplicação web como ambiente de visualização e análise das faltas.

1.1 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos desta monografia de conclusão de curso.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver e validar um protótipo de um sistema de monitoramento de faltas em redes de distribuição de energia elétrica, utilizando como base a rede Sigfox e tecnologias web.

1.1.2 Objetivos Específicos

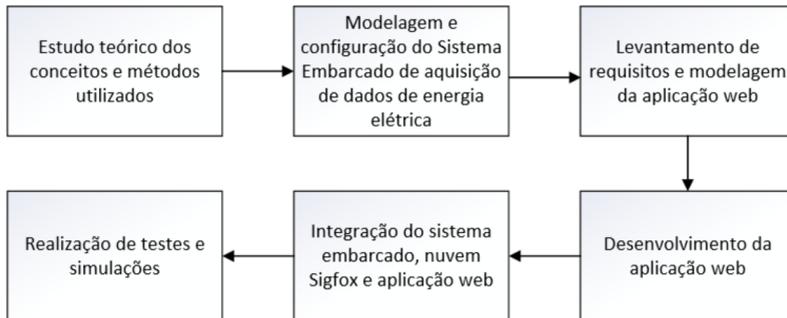
Esse trabalho possui como objetivos específicos:

- Desenvolvimento de um sistema embarcado para leitura e transmissão de grandezas elétricas;
- Desenvolvimento de um ambiente web integrado com a *Sigfox Cloud* monitorando dinamicamente eventos de uma rede de distribuição elétrica;
- Implementação de métodos para identificação de faltas com os dados obtidos;
- Testar o modelo proposto e analisar os resultados obtidos.

1.2 METODOLOGIA

A metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho é classificada em seis etapas, que são mostradas na Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma de desenvolvimento



Fonte: Elaborado pelo Autor

A primeira etapa consistirá na pesquisa bibliográfica sobre os conceitos e tecnologias utilizados neste trabalho. Destaca-se o estudo dos sistemas de distribuição de energia elétrica com ênfase nas faltas e nos indicadores de qualidade, e nas redes de comunicação sem fio LPWAN. Além disso, será abordado as principais tecnologias web que serão utilizadas para a dinamicidade da aplicação.

Na segunda etapa, será feito a modelagem e configuração do sistema embarcado de aquisição de dados das grandezas elétricas e transmissão através da rede Sigfox, que servirá como protótipo para realização dos testes.

A terceira etapa é onde será realizado o projeto da aplicação web, realizando o levantamento de requisitos, especificação da arquitetura e modelagem do software. Nesta parte, será definido como será realizado o fluxo de informação a partir dos eventos recebidos pela *Sigfox Cloud* no servidor até a interface web.

O próximo passo será o desenvolvimento da aplicação web baseado na modelagem e requisitos especificados, onde será implementado tanto a parte do servidor quanto a do cliente.

A quinta etapa consistirá na integração final dos componentes do sistema. Para isso será analisado a conectividade do dispositivo com a

estação base da Sigfox, e o acesso aos dados transmitidos por esse, pela aplicação desenvolvida.

Por fim, na sexta etapa, será realizado os testes de validação do protótipo do sistema. Será avaliado a correta detecção de variações de estado do ponto analisado pelo sistema embarcado, até o correto recebimento da mensagem na aplicação web. Além disso, será analisado o funcionamento do sistema a partir de um modelo de distribuição elétrica, onde os eventos dos dispositivos serão simulados por *software*.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho é dividido em oito capítulos. O **Capítulo 1** apresenta uma introdução ao contexto e a problemática que o trabalho aborda, os objetivos gerais e específicos e os procedimentos metodológico adotados para o desenvolvimento.

O **Capítulo 2** apresenta uma visão geral sobre as redes de distribuição de energia elétrica, as faltas dentro desse sistema e os indicadores de qualidade associados.

O **Capítulo 3** aborda as redes LPWAN apresentado suas principais características. Além disso, é apresentado um estudo sobre as redes LoRaWAN e Sigfox que consistem nas principais implementações desta categoria de rede.

O **Capítulo 4** trata das principais tecnologias web utilizadas para o desenvolvimento do protótipo deste trabalho, onde é abordado sobre o protocolo WebSocket e os gráficos SVG.

O **Capítulo 5** tem como objetivo descrever o modelo proposto, apresentando os principais componentes do sistema e como eles se comportam e se comunicam.

O **Capítulo 6** apresenta o protótipo desenvolvido para análise do modelo.

O **Capítulo 7** descreve os testes realizados para validação do protótipo e uma análise baseado nos resultados obtidos.

O **Capítulo 8** apresenta as considerações finais a partir do que foi desenvolvido neste trabalho.

2 TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO ELÉTRICA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos básicos de sistemas de distribuição de energia elétrica, definindo as faltas elétricas e os fatores de continuidade, tópicos fundamentais para a compreensão deste trabalho.

2.1 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

De modo geral, os sistemas elétricos de potência têm como principal função fornecer energia elétrica para consumidores de grande ou pequeno porte, com a qualidade adequada, no instante em que for solicitado. Esses sistemas são subdivididos em três principais grupos: geração, transmissão e distribuição (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

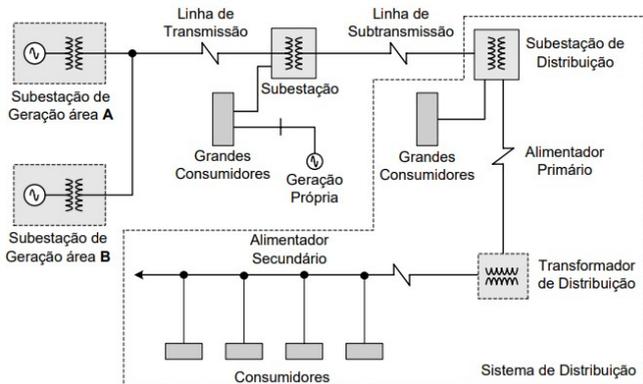
A Figura 2 apresenta um diagrama esquemático dos principais componentes de um sistema elétrico de potência. Destaca-se a existência de subestações de geração, linhas de transmissão, subestações, linhas de sub-transmissões, subestações de distribuição, alimentadores primários, transformadores de distribuição e os alimentadores secundários. Em cada parte do sistema elétrico são realizados aumentos ou reduções no nível de tensão de acordo com a viabilidade do subsistema (SOUZA, 2008). Este trabalho abrange a parte referente a distribuição da energia elétrica.

O sistema de distribuição de energia elétrica realiza a conexão entre a rede de transmissão e às unidades consumidoras. Inicia-se a partir da subestação de distribuição, e é composto pelo sistema de subtransmissão, por subestações de distribuição e pelas redes elétricas primárias e secundárias. As linhas dos sistemas de subtransmissão conectam as redes de transmissão às subestações de distribuição (ANEEL, 2017).

Nas subestações de distribuição é realizado a conexão entre as redes de subtransmissão e os alimentadores de média tensão que compõem as redes primárias, adequando a tensão elétrica ao nível primário de distribuição de energia. Os alimentadores das redes primárias alimentam as redes secundárias de distribuição, que são redes de baixa tensão (ANEEL, 2017).

O escopo deste trabalho consiste na etapa de entrega da energia ao consumidor final que é realizada pelas redes primária e secundária de distribuição, onde suas unidades de transformações são acopladas

Figura 2 – Diagrama esquemático de um sistema elétrico de potência



Fonte: (SOUZA, 2008)

aos postes na linha de distribuição. Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2010), as redes de distribuição primária (ou de média tensão) operam, usualmente, em uma tensão de 13,8kV e podem ter uma estrutura aérea ou subterrânea, sendo a primeira mais utilizada. Estas redes atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição que suprem a rede secundária, ou de baixa tensão. Dentre os consumidores primários, destacam-se indústrias de porte médio, conjuntos comerciais, instalações de iluminação pública, entre outros.

A última etapa de um sistema de distribuição de energia elétrica é realizado pelas redes de distribuição secundárias, que são conectados às redes primárias por transformadores de distribuição, geralmente instalados nos postes das redes aéreas. Este tipo de rede, supre a demanda dos consumidores de baixa tensão, como residências, pequenos comércios e indústrias. No Brasil, essas redes operam com tensões padronizadas de 220/127 V ou 360/220 V, com os circuitos da ordem de centenas de metros (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

A topologia de uma rede de distribuição elétrica é uma característica importante, e pode ser classificada em dois tipos: radiais ou em malha. Na configuração radial, as linhas se ramificam sequencialmente e a energia flui estritamente em uma direção. Já na configuração em malha, dois pontos geralmente são conectados por mais de um caminho, o que significa que algumas linhas formam ciclos no sistema (MEIER, 2006).

As redes primárias em instalações aéreas, apresentam topologia radial, o que permite realização de transferência de blocos de carga para re-energização, no menor tempo possível, caso ocorra falhas na rede de distribuição. Em instalações subterrâneas, pode operar na configuração em malha ou radia. O mesmo tipo de configuração ocorre nas redes secundárias, no entanto, nesse tipo de rede, geralmente é iniciado em uma configuração em malha até atingir seu limite de carga, onde é realizado a divisão da rede, com a colocação de outro transformador de distribuição (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBIA, 2010).

2.2 FALTAS NO SISTEMA ELÉTRICO

Uma falta consiste em qualquer falha que interfira no fluxo normal da corrente em um sistema elétrico. Esses eventos ocorrem de maneira aleatória, e podem ser muito prejudiciais a um sistema de potência. Diante disso, as redes de distribuição de energia elétrica utilizam de sistemas de proteção que visam prevenir os danos na linha de transmissão e nos equipamentos, como também evitar a interrupção do funcionamento da rede (STEVENSON, 1986).

As faltas são classificadas em temporárias ou permanentes, dependendo de como ocorre o restabelecimento do sistema. As faltas temporárias se caracterizam por desaparecerem após a atuação do sistema de proteção e imediato restabelecimento do funcionamento da rede. Já nas faltas permanentes é necessário a intervenção de equipes de manutenção para corrigir o defeito causador da interrupção e o sistema volte à operar normalmente. Essas faltas podem ser causadas por diversos fatores sendo os mais comuns descargas atmosféricas, ação de fatores climáticos, queda de árvores sobre linhas, colisões de veículos, manobras incorretas, falha de equipamentos, entre outros (STEVENSON, 1986).

Com a privatização das empresas de distribuição de energia elétrica, faz-se necessário um controle da qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores finais e dos serviços prestados pelas concessionárias. Para isso, torna-se essencial o estabelecimento de índices de desempenho do fornecimento. No Brasil, esse controle é realizado pela agência reguladora ANEEL.

O fornecimento de energia elétrica aos consumidores são avaliados em dois principais aspectos: qualidade do serviço e qualidade do produto. A qualidade do serviço analisa a “continuidade de fornecimento”, levando em conta interrupções no sistema elétrico, que podem

ser provocadas por falhas na rede de distribuição ou por atividades de manutenção no sistema. Já a qualidade de produto, avalia a conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Devido a relevância para este trabalho, será abordado o aspecto referente a qualidade do serviço.

2.2.1 Indicadores de qualidade de serviço

Para avaliação da qualidade de serviço são estabelecidos alguns indicadores de continuidade. Destacam-se os indicadores de continuidade coletivos (DEC e FEC) e os indicadores de continuidade individuais (DIC e FIC) (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). Esses indicadores serão analisados a seguir. Para isso, é necessários definir as seguintes variáveis:

- C_{ai} - número de consumidores atingidos na interrupção "i";
- C_s - número total de consumidores existentes na área de estudo;
- t_i - duração da interrupção de suprimento "i", usualmente em minutos;
- N - número de ocorrências no período de estudo.

O índice de duração equivalente por consumidor (DEC) indica o período de tempo, em média, em que cada consumidor na área de estudo considerada ficou sem fornecimento de energia no período considerado. A descrição formal é mostrada a seguir:

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ai} \cdot t_i}{C_s} \quad (2.1)$$

O índice de frequência equivalente por consumidor (FEC) define o número de interrupções que, em média, cada consumidor considerado sofre, sendo descrito por:

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^N C_{ai}}{C_s} \quad (2.2)$$

A ANEEL estabelece limites para os indicadores coletivos de continuidade. Estes, são apurados pelas distribuidoras e enviados periodicamente para a ANEEL realizar a avaliação (ANEEL, 2016). Entretanto, é necessário também ter um controle mais preciso sobre cada

consumidor. Desta forma, são definidos indicadores relacionados à duração e frequência de interrupções em um determinado consumidor. O primeiro, é o índice de duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC) que consiste no intervalo de tempo que em cada unidade consumidora ocorreu descontinuidade da distribuição elétrica (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010). É descrito pela seguinte formulação:

$$DIC = \sum_{i=1}^N t_i \quad (2.3)$$

O outro índice de análise individual é a frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC) que aponta o número de interrupções ocorridas por unidade consumidora em um período de observação. É dado por:

$$FIC = N \quad (2.4)$$

Os limites para os indicadores DIC e FIC são definidos e analisados em períodos mensais, trimestrais e anuais (ANEEL, 2016). A Resolução ANEEL 024/2000 estabelece a definição das metas coletivas e individuais a partir de um conjunto de unidades consumidoras e seus históricos. Além disso, define uma relação entre os dois tipos de indicadores. Com essa relação, é calculado a penalidade que a concessionária deve destinar ao consumidor caso tenha sua meta transgredida, com ressarcimento direto em sua conta de energia.

Outro indicador importante para o gerenciamento das empresas de distribuição refere-se ao tempo de atendimento de emergência (TA). Este parâmetro consiste no intervalo de tempo que transcorre desde o instante em que ocorreu a falta na rede de distribuição até o restabelecimento do sistema. Este indicador é calculado a partir dois principais parâmetros: o tempo de pesquisa do defeito e o tempo médio para o reparo do defeito e o completo restabelecimento da rede (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

O tempo de pesquisa do defeito consiste de vários intervalos, como: tempo transcorrido desde o instante de ocorrência da falta até o conhecimento de sua ocorrência pela concessionária ("tempo de telefonemas"); tempo de acionamento da equipe de manutenção; tempo de deslocamento da equipe ao ponto de interrupção e identificar a causa e o ponto de defeito; por fim, o tempo de manobra de chaves para o restabelecimento das consumidoras fora da área em defeito (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2010).

3 REDES LPWAN

A Internet das Coisas (IoT, do Inglês *Internet of Things*) consiste em uma gama de aplicações tecnológicas baseadas em uma infraestrutura onde um grande volume de dispositivos são conectados e podem trocar informações ativamente via rede. Este conceito foi formalmente apresentado em 2005 pelo *International Telecommunication Union* (ITU) a partir da publicação do ‘*ITU Internet Report 2005: Internet of Things*’. A IoT vem sendo considerado a terceira onda de tecnologia da informação depois da internet e das comunicações móveis (NOLAN; GUIBENE; KELLY, 2016).

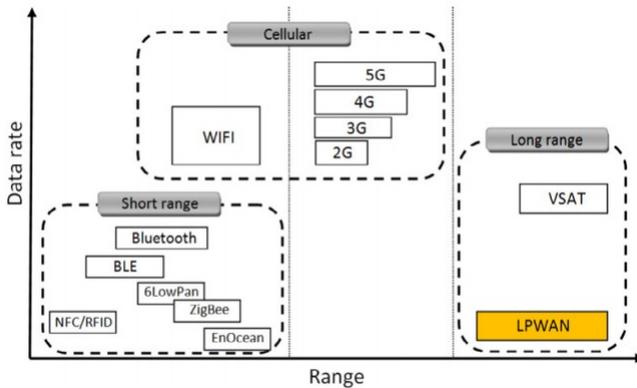
As aplicações de IoT não são definidas em termos de uma única tecnologia, mas sim de uma ampla variedade de tecnologias de comunicação, com e sem fio, e protocolos combinados com requisitos de aplicações que variam em largura de banda, frequência e área de alcance (NOLAN; GUIBENE; KELLY, 2016).

Segundo Ikpehai et al. (2019), a conectividade nas aplicações IoT será dominada por tecnologias de curto alcance (por exemplo, *Zig-Bee*, *Bluetooth*) por muitos anos. Entretanto, esses tipos de tecnologia não são adaptadas para cenários que exigem transmissão de dados em longo alcance. Comunicações celulares como 2G, 3G e 4G fornecem uma cobertura maior, porém há um consumo excessivo de energia do dispositivo. Dentro deste cenário e dos requisitos de comunicações de baixo consumo de energia, longa área de alcance e baixo custo foi impulsionado o surgimento de uma nova tecnologia de comunicação sem fio: as redes *Low Power Wide Area Network* (MEKKI et al., 2019).

As redes LPWAN apresentam uma comunicação de longo alcance, variando de 10 a 40 km nas zonas rurais e de 1 a 10 km nas zonas urbanas. Além disso, são altamente eficientes em termos de consumo de energia e custo, com preço de *chipset* de rádio inferior a 2 euros e um custo operacional de aproximadamente 1 euro por dispositivo anualmente. Em resumo, este tipo de rede é altamente adequado para aplicativos de IoT que precisam apenas transmitir pequenas quantidades de dados em longo alcance, como mostra a Figura 3 (MEKKI et al., 2019).

Apesar de muitas tecnologias que atualmente são categorizadas redes LPWAN já estivessem disponíveis, o termo “LPWAN” surgiu apenas em 2013. Desde então, muitas tecnologias LPWAN surgiram na largura de banda de frequência licenciada e não licenciada (MEKKI et al., 2019). Atualmente, destacam-se a LoRaWAN e Sigfox que são as

Figura 3 – Taxa de dados necessária versus capacidade de alcance das tecnologias de comunicação por rádio: posicionamento LPWAN.



Fonte: (MEKKI et al., 2019)

duas principais tecnologias LPWAN em termos de bases instaladas (IK-PEHAI et al., 2019). Diante disso, neste capítulo serão abordadas essas duas tecnologias, com foco maior no funcionamento da rede Sigfox visto que foi utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

A Tabela 1 provê uma visão geral das principais características das tecnologias: LoRaWAN e Sigfox. Geralmente, as redes LPWAN adotam faixas de rádio frequência ISM (do Inglês, *Industrial, Scientific and Medical*) não licenciadas, em especial, na faixa Sub GHz que oferecem vantagens em relação a outras faixas ISM de radio frequência como 2.4GHz (utilizadas nas tecologias *Bluetooth* e *ZigBee*, por exemplo) e 5GHz (802.11 ac). As principais vantagens são: as faixas Sub GHz tendem a consumir, consideravelmente, menos energia que as faixas de 2.4GHz e 5GHz e apresenta uma capacidade superior de vencer barreiras físicas e propagação de sinal com alcance maior (GARCIA; KLEINSCHMIDT, 2017).

3.1 LORAWAN

A LoRaWAN é uma tecnologia LPWAN proposto pela LoRa Alliance que define o protocolo de rede no controle de acesso ao meio

Tabela 1 – Visão geral das tecnologias LPWAN: Sigfox, LoRaWAN

Modulação	Sigfox D-BPSK	LoRaWAN CSS
Frequência	Bandas ISM não licenciadas (868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e 433 MHz na Ásia)	Bandas ISM não licenciadas (868 MHz na Europa, 915 MHz na América do Norte e 433 MHz na Ásia)
Largura de banda	100 Hz	250 kHz e 125 kHz
Taxa máxima de dados	100 bps	50 kbps
Bidirecional	Limitado / Half-duplex	Sim / Half-duplex
Máximo de mensagens/dia	140 (UL), 4 (DL)	Ilimitado
Comprimento máximo da carga	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes
Alcance	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)
Imunidade a interferências	Muito alta	Muito alta
Autenticação e criptografia	Não suportado	Sim (AES 128b)
Taxa de dados adaptável	Não	Sim
Localização	Sim (RSSI)	Sim (TDOA)
Permite rede privada	Não	Sim
Padronização	A empresa Sigfox está colaborando com o ETSI em a padronização da rede baseada em Sigfox	LoRa-Alliance

Fonte: Adaptado de (MEKKI et al., 2019)

(MAC) e a arquitetura do sistema para a rede. Já a tecnologia LoRa (do Inglês, *Long Range*) tem como proprietário a empresa Semtech e consiste na camada física ou na modulação sem fio utilizada para criar *link* de comunicação de longo alcance (ZHOU et al., 2019).

Muitas redes de comunicação sem fio legadas utilizam a modulação FSK (*Frequency Shifting Keying*) como camada física devido ser muito eficiente para obtenção de baixo consumo energético. A LoRa é baseado na modulação CSS (do Inglês, *Chirp Spread Spectrum*), que mantém a mesma característica de baixa potência da modulação FSK, entretanto, aumenta significativamente o alcance da comunicação (LORA ALLIANCE, 2015).

A técnica de modulação CSS tem sido utilizada na comunicação militar e espacial há décadas devido às longas distâncias de comunicação que podem ser alcançadas e sua robustez a ruídos, mas a LoRa foi a primeira que conseguiu reduzir o custo para uso comercial (REYNDERS; POLLIN, 2016). Esta técnica amplia um sinal de banda estreita por uma largura de banda de canal mais larga, possibilitando assim uma comunicação bidirecional, gerando um sinal com baixos níveis de ruído, permitindo alta resiliência à interferência e é difícil de detectar ou obstruir (MEKKI et al., 2019). Além disso, consiste no uso de um sinal *chirp* que varia constantemente com a frequência. A LoRa usa seis fatores de dispersão para adaptar a taxa de dados e o alcance da troca. Um fator de espalhamento mais alto permite um alcance maior às custas de uma taxa de dados mais baixa e vice-versa. A taxa de dados LoRa

está entre 300 bps e 50 kbps, dependendo do fator de espalhamento e da largura de banda do canal. Além disso, as mensagens transmitidas usando diferentes fatores de propagação podem ser recebidas simultaneamente pelas estações base LoRa. O comprimento máximo da carga útil para cada mensagem é 243 bytes e oferece criptografia baseada no algoritmo AES-128b.(MEKKI et al., 2019).

A vantagem de usar a modulação CSS é que o deslocamento no tempo e na frequência para o remetente e o receptor é o mesmo, reduzindo consideravelmente a complexidade do receptor (LAVRIC; POPA, 2017). Dessa forma, os produtos da LoRa conseguem oferecer CIs de baixo consumo de energia de aproximadamente 10μ A (NOLAN; GUIBENE; KELLY, 2016).

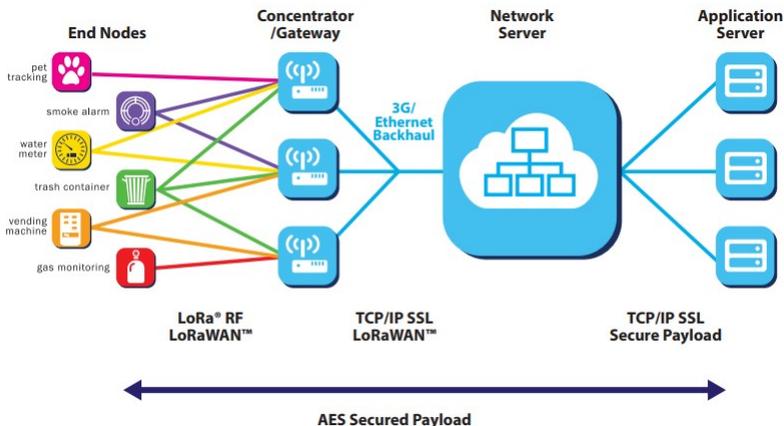
A LoRa utiliza bandas ISM não licenciadas na faixa Sub GHz. No Brasil sua operação é permitida nas frequências entre 902 e 907,5 MHz e entre 915 a 928 MHz. Além disso, utiliza-se como faixa 915 MHz na America do Norte, 868 MHz na Europa e 433 MHz na Ásia. Com isso, é possível alcançar distâncias de 5km em áreas urbanas e até 15km em áreas rurais (OSMAN; ABBAS, 2018).

O protocolo de comunicação e arquitetura de rede LoRaWAN foi baseado na LoRa, e sua primeira versão foi apresentada em 2015 pela LoRa-Alliance. Uma rede LoRaWAN é formada por vários componentes como: nós (dispositivos finais), *gateway* (ou estação base), servidor de rede e servidor de aplicação. A Figura 4 apresenta uma representação da arquitetura de rede da LoRaWAN. (ZHOU et al., 2019).

Em uma rede LoRaWAN os dispositivos se comunicam com *gateways*, entretanto não são associados com uma estação específica. Cada mensagem transmitida por um nó é recebida por múltiplos *gateways*. Esta abordagem redundante melhora a taxa de mensagens recebidas com sucesso e pode ser utilizada para localizar dispositivos através da técnica de localização baseada na diferença de horário de chegada (TDOA), suportada por uma sincronização de tempo muito precisa entre várias estações base. Entretanto, a necessidade de várias estações base pode aumentar o custo da implementação da rede. Os *gateways* encaminharão os pacotes recebidos dos dispositivos para o servidor de rede. A complexidade e inteligência do sistema são transferidas para o servidor de rede, que é responsável pelo gerenciamento da rede, filtragem dos pacotes redundantes, execução de verificações de segurança, enviar confirmações para o dispositivo final e enviar a mensagem para o servidor de aplicativos (LORA ALLIANCE, 2015).

As redes LoRaWAN podem ser de dois tipos: privada e pública. O tipo de rede privada pode ser operada por indivíduos particulares

Figura 4 – Arquitetura de rede LoRaWAN



Fonte: (LORA ALLIANCE, 2015)

ou empresas privadas em um contexto industrial. Na rede LoRaWAN pública, as operadoras de rede móvel possuem a infraestrutura de rede e a oferecem como um servidor aos clientes (MEKKI et al., 2019).

Os nós da rede LoRaWAN geralmente operam com energia de bateria e dispõem de recursos computacionais limitados. Os dispositivos são categorizados em três tipos de classes. Os dispositivos “Classe A” transmitem sua carga quando necessário e, em seguida, oferecem duas janelas de recepção. Na “Classe B”, é onde a rede oferece a possibilidade de enviar uma mensagem de *ping* ao dispositivo em slots regulares e fornece suporte para *fallback* para “Classe A” no caso de modelos de operação com restrição de bateria. A terceira classe é denominada “Classe C”. Nela, os dispositivos atuam como na “Classe A”, exceto que, quando não estão transmitindo, estão no modo de recepção contínua (NOLAN; GUBENE; KELLY, 2016).

3.2 SIGFOX

A Sigfox é uma operadora de rede LPWAN, desenvolvida em 2010 na França, que oferece uma solução de conectividade IoT ponta a ponta, com base em suas tecnologias patenteadas. A Sigfox oferece

uma solução de comunicação baseada em software, onde toda a complexidade da rede e de computação é gerenciada em nuvem e não nos dispositivos, reduzindo o consumo de energia e os custos associados (MEKKI et al., 2019).

Inicialmente, a configuração da Sigfox oferecia um link de comunicação unidirecional, onde apenas o dispositivo envia mensagens à estação base (*uplink*). Posteriormente, foi adicionado a comunicação bidirecional, apesar do limitado número de mensagens, permitindo a transmissão da estação base para os dispositivos (*downlink*) (LAVRIC; PETRARIU; POPA, 2019).

Para atender as restrições de autonomia de bateria e custo dos objetos conectados, o protocolo Sigfox é otimizado para mensagens pequenas. O tamanho da carga útil de dados de *uplink* vai de 0 a 12 bytes e *downlink* de 8 bytes. Este tamanho de mensagem é suficiente para envio de informações de sensores, eventos, coordenadas de GPS e dados da aplicação. Devido aos regulamentos de ocupação da banda pública, o número de mensagens por dispositivo é limitado em 140 mensagens *uplink* e 4 mensagens *downlink* por dia (SIGFOX, 2017).

As rede Sigfox utiliza a técnica de modulação D-BPSK (do Inglês, *Differential Binary Phase-Shift Keying*) através da *Ultra Narrow Band* (UNB) onde, para cada mensagem, há uma largura de banda fixa de 100Hz e é enviado em uma velocidade de 100bps (na Europa) ou 600bps (no EUA), dentro do espectro de frequência não licenciada (ISM). Como resultado da tecnologia UNB, os níveis de ruído permanecem muito limitados, o que beneficia a sensibilidade do receptor e permite transmissões de baixa potência de até 10 km nas áreas urbanas e 50 km nas áreas rurais (LAVRIC; PETRARIU; POPA, 2019).

Devido às características da tecnologia UNB da Sigfox, métodos de localização baseados em informações do tempo, como o TDOA, não são viáveis. Com isso, a Sigfox propõem seu método baseado na intensidade do sinal (RSSI) recebido nas estações base receptoras, combinado com algoritmos de aprendizado de máquina (AERNOUTS et al., 2018).

O acesso ao meio dentro da tecnologia SigFox é feito de forma aleatória. Dessa forma, a transmissão não é sincronizada entre a rede e o dispositivo. O dispositivo envia a mensagem em uma frequência aleatória e em seguida envia 2 réplicas em diferentes frequências e tempo, o que é chamado de “diversidade de tempo e frequência”. Esta diversidade aumenta muito a resistência do sistema a interferências pois uma mesma mensagem tenta vários “caminhos”, frequências e tempos diferentes para garantir a recepção bem-sucedida da mensagem. O acesso aleatório é um recurso essencial para obter uma alta qualidade de ser-

viço (SIGFOX, 2017).

Como não é necessário sincronização ou controle de acesso ao meio, não há mensagens de sincronização sendo trocadas entre o dispositivo e a estação base antes de transmitir os dados. Sendo uma grande vantagem em comparação com outras tecnologias que incluem todas essas etapas adicionais, impactando no consumo energético.

A tecnologia Sigfox utiliza a técnica de diversidade espacial, que parte do princípio da recepção colaborativa, onde um dispositivo não é associado à uma estação base específica, como ocorre nos protocolos celulares. A mensagem emitida é recebida por qualquer estação base próxima, sendo, em média, 3 estações base (SIGFOX, 2017).

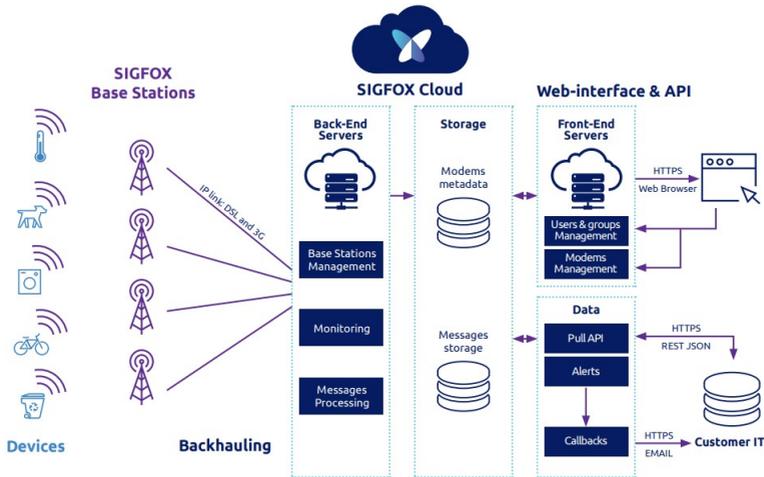
3.2.1 Arquitetura da rede Sigfox

A rede Sigfox possui uma arquitetura horizontal, composta por 2 principais camadas: *Network Equipment* e *Sigfox Support System*. A camada *Network Equipment* consiste principalmente nas estações bases, que são responsáveis por receber as mensagens dos dispositivos e transmitir para a outra camada através de uma conexão de rede IP (DSL e 3G). A camada *Sigfox Support System* é o serviço de nuvem da Sigfox (*Sigfox Cloud*), que tem como função principal processar as mensagens e as fornecer para aplicações terceiras. Além disso, oferece serviços essenciais para o monitoramento do status da rede e gerenciamento das estações bases. Inclui também, repositório e ferramentas para analisar os dados coletados ou gerados pela rede de dispositivos. A Figura 5 ilustra a arquitetura da rede Sigfox, apresentando as duas camadas e os componentes internos da *Sigfox Cloud* (SIGFOX, 2017).

Os servidores da Sigfox recebem muitas réplicas da mesma mensagem, porém apenas uma deve ser armazenada. O serviço de *back-end* é responsável por realizar esse processamento e filtragem. A *Sigfox Cloud* contém o armazenamento dessas mensagens em dois locais e também armazenam metadados que podem ser usados para criação de serviços (SIGFOX, 2017).

A Sigfox disponibiliza uma plataforma web própria para gerenciamento, configuração e monitoramento dos dispositivos e suas mensagens. Na *Sigfox Cloud* uma empresa é representada por um “Grupo” que pode conter diversos tipos de dispositivos. Cada tipo de dispositivo pode ser atribuído à uma “família” de dispositivos. Todas unidades do mesmo produto serão agrupados como um tipo de dispositivo para permitir que todos se comportem exatamente da mesma maneira quando

Figura 5 – Arquitetura da rede Sigfox



Fonte: (SIGFOX, 2017)

uma mensagem é recebida pela rede Sigfox (SIGFOX, 2017).

Para criar uma conexão entre a *Sigfox Cloud* e uma plataforma/servidor própria é disponibilizado dois métodos:

- **Callbacks:** Requisições HTTP unidirecionais, gerados pelo servidor da SigFox e enviados para os servidores terceiros instantaneamente após o recebimento de uma mensagem do dispositivo emissor;
- **API REST:** Conjunto de requisições HTTP bidirecional que funciona a nível de Grupo. Neste método é possível acessar os dados dos dispositivos registrados na rede a qualquer momento.

4 TECNOLOGIAS WEB

Neste capítulo é apresentado a definição das principais tecnologias web que são utilizadas no desenvolvimento da aplicação dinâmica deste trabalho.

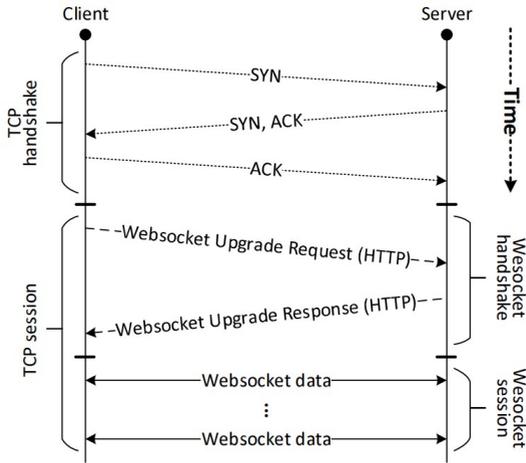
4.1 WEBSOCKET

O WebSocket consiste em um protocolo de comunicação a nível de aplicação que permite comunicação bidirecional entre uma página web e um servidor remoto. Esse protocolo fornece um canal de comunicação *full-duplex* que opera sobre uma única conexão *socket* TCP e permite a criação de aplicativos web em tempo real escaláveis (PIMENTEL; NICKERSON, 2012).

O protocolo WebSocket consiste de duas principais etapas: o *handshake* onde o cliente e o servidor trocam mensagens para estabelecer uma conexão; e a etapa de transferência de dados. A Figura 6 mostra um diagrama de sequência de uma sessão WebSocket, destacando a necessidade sobre o protocolo TCP comum. Antes de qualquer interação baseada no WebSocket possa ocorrer, exige-se que uma conexão TCP seja estabelecida entre o cliente e o servidor. Na primeira etapa, o cliente estabelece uma conexão com servidor através da mensagem *Websocket Upgrade Reques* que é uma requisição HTTP com cabeçalhos específicos que indicam ao servidor que o cliente quer trocar do HTTP regular para o protocolo WebSocket pelo resto da sessão. Se o servidor suportar o protocolo WebSocket, irá responder com uma requisição HTTP com um código de status 101, que indica a troca de protocolos. A partir deste momento, a comunicação em HTTP será concluída iniciando a troca de mensagens via WebSocket (SKVORC; HORVAT; SRBLJIC, 2014).

Durante uma sessão, cliente e servidor podem trocar mensagens em uma conexão *full-duplex* assíncrona. As unidades de dados transferidos em uma sessão WebSocket são chamados de quadros Websocket. O protocolo suporta quadro de dados binários, textos na codificação UTF-8 e e quadros de controle para sinalização em nível de protocolo. Informações mínimas de enquadramento são adicionadas a mensagem, resultando em um aumento de apenas 2 bytes no quadro. A sessão pode ser encerrada quando não for mais necessária para o cliente ou para o servidor (SKVORC; HORVAT; SRBLJIC, 2014).

Figura 6 – Diagrama de sequência WebSocket sobre TCP



Fonte: (SKVORC; HORVAT; SRBLJIC, 2014)

A especificação do WebSocket também define uma API para a interação com o protocolo, que contém padrões de mensagens. A Tabela 2 resume os eventos estabelecidos na API WebSocket.

Tabela 2 – API WebSocket orientada a eventos

Callback	Descrição
onopen	invocado quando a sessão WebSocket é estabelecida, sinalizando que o protocolo está pronto para transferir dados de carga útil
onerror	invocado sempre que ocorre um erro
onclose	invocado quando um dos pares termina o sessão
onmessage	invocado quando uma mensagem recebida de outro par chegar

Fonte: (SKVORC; HORVAT; SRBLJIC, 2014)

4.2 SCALABLE VECTOR GRAPHICS

O SVG (do Inglês *Scalable Vector Graphics*) consiste em um padrão utilizado para descrever gráficos vetoriais bidirecionais, interativos e animados baseado em uma gramática XML. Esse modelo foi criado pelo *World Wide Web Consortium* com a ideia principal de criar uma solução genérica orientada a documentos para gráficos que possam ser adaptados a mídia moderna (QUINT, 2003).

Este padrão apresenta diversos recursos gráficos básicos e avançados encontrados em sistemas de desenho para criação de imagens e diagramas vetoriais. Inclui formas básicas como linhas, polígonos, retângulos, círculos e elipses e formas mais complexas baseados em caminhos. Esses objetos gráficos apresentam características diferentes, mas todos compartilham a capacidade de instruções de transformações (como dimensionar, converter, girar ou inclinar) e recursos de estilo utilizando o CSS (do Inglês *Cascading Style Sheets*). Além disso, oferece a possibilidade de agrupamento hierárquico desses objetos e da identificação individual de cada forma, para alterações individuais. Além disso, oferece recursos gráficos avançados, com suporte para traços, preenchimentos sólidos, preenchimentos gradientes, transparência alfa, recorte, mascaramento e filtros (QUINT, 2003).

Além dos recursos apresentados para criação de grafos bidimensionais, esse padrão apresenta como grande diferencial os recursos dinâmicos oferecidos na criação de gráficos. O dinamismo do SVG gira em torno de dois fatores principais: animação e *script*.

A animação dos gráficos SVG é baseado na tecnologia SMIL (do Inglês *Synchronized Multimedia Integration Language*) que apresenta um módulo de animação projetado para ser reutilizado e adaptado a qualquer outra linguagem XML que necessite desse tipo de funcionalidade. Esse tipo de animação apresenta uma abordagem baseada no tempo, dependendo de uma única linha do tempo para todo o documento. Para criação destas animações basta especificar quais atributos XML ou propriedades de CSS deseja-se animar e, em seguida, especificar os valores de interpolação e parâmetros de tempo, especificando o início e a duração *script*.

Por fim, os gráficos SVG podem reagir a praticamente qualquer tipo de interação por meio de *scripts*, permitindo estabelecer controles lógicos das animações e dos recursos gráficos para gerar tipos de interação mais avançada. Esse processo que, permite acessar, ler, escrever e ajustar seu documento programaticamente, é realizado a partir da linguagem de programação JavaScript (QUINT, 2003).

5 MODELO PROPOSTO

Este capítulo tem como objetivo detalhar o sistema proposto de monitoramento de faltas em uma rede de distribuição de energia elétrica apresentando uma visão lógica e física, fornecendo assim, um entendimento de como os componentes do sistema interagem e se comportam.

5.1 VISÃO GERAL

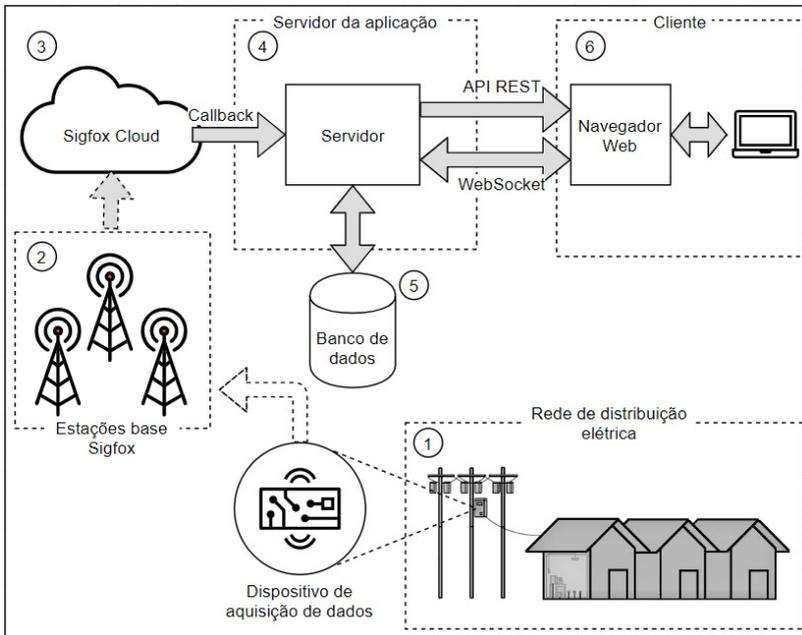
Novos métodos de monitoramento de faltas em redes de distribuição elétrica estão sendo pesquisados e desenvolvidos. Entretanto, muitos acabam não sendo adotados pelas concessionárias devido a complexidade e o custo de implementação. Além disso, novas tecnologias estão surgindo, possibilitando novas abordagens para solução de problemas. Dentre estas tecnologias, estão às voltadas para aplicações baseadas no conceito da Internet das Coisas e Cidades Inteligentes, mediante o uso de uma ampla rede de dispositivos embarcados para monitorar o ambiente urbano em tempo real, possibilitando agir de forma responsiva e obter informações necessárias para tomadas de decisão inteligentes (MATIN; ISLAM, 2012).

O modelo proposto neste trabalho baseia-se nessa visão de redes de sensores sem fio, utilizando a rede Sigfox como método de comunicação de dispositivos embarcados responsáveis pelo monitoramento de pontos estratégicos da rede de distribuição de energia elétrica, detectando possíveis faltas. É proposto também, uma aplicação web para acesso e supervisão dos dados gerados pelos eventos dos dispositivos. A Figura 7 apresenta o modelo lógico do funcionamento do sistema, destacando os principais componentes e suas comunicações.

O sistema completo apresenta seis principais componentes, como pode ser observado na Figura 7, sendo eles: os dispositivos de aquisição e transmissão de dados (1); a infraestrutura da Sigfox que engloba as estações bases (2), o serviço de nuvem e suas interfaces (3); e a aplicação web, composta pela camada do servidor (4), base de dados (5) e da aplicação do lado do cliente (6). Resumidamente, o processo inicia-se a partir da transmissão de uma mensagem de detecção de evento pelo dispositivo via rádio. A mensagem é recebida pelas estações bases e transmitida para *Sigfox Cloud*, onde será realizado o processamento e a transmissão para o servidor da aplicação a partir de uma requisição *callback*. O servidor da aplicação realiza a validação e o processamento

da requisição recebida para o armazenamento na base de dados e a transmissão para o navegador web a partir de uma mensagem WebSocket contendo os dados da ocorrência. A camada do cliente fornece a visualização do estado da rede de distribuição a partir de um diagrama dinâmico da rede e das informações dos eventos registrados pelo dispositivo, sendo atualizado a cada mensagem recebida. Esse modelo será abordado mais detalhadamente nas subseções a seguir.

Figura 7 – Modelo lógico do sistema proposto



Fonte: Elaborado pelo Autor

5.1.1 Dispositivo de monitoramento de faltas

Uma rede de sensores sem fio pode ser definida como uma rede de dispositivos embarcados que podem detectar o ambiente e comunicar as informações coletadas do campo monitorado através de *links* sem fio. O modo de operação desses dispositivos podem ser contínuo ou

acionado por eventos, dependendo do tipo da aplicação (BURATTI et al., 2009).

Para o problema de monitoramento de faltas, os dispositivos se enquadram no modo de trabalho acionado por eventos. Em geral, nesse modo de operação o processamento realizado é simples, onde o dispositivo compara o valor medido com um limite determinado (conhecido como *threshold*). A transição sobre este limite consiste no fenômeno de interesse, que determina a ocorrência de um evento. A partir disso, o dispositivo realiza a transmissão para um coletor ou estação base (BURATTI et al., 2009).

O fenômeno de interesse analisado neste trabalho consiste na interrupção ou restabelecimento da continuidade do fluxo elétrico de pontos estratégicos nas linhas de distribuição de energia elétrica da rede primária e secundária. Essas ocorrências são definidas a partir da medição das grandezas elétricas obtidas por sensores que definem o estado de operação da linha, podendo estar ativado ou desativado. Uma mudança de estado consiste na transição dessas grandezas elétricas mensuradas, sobre nível estabelecido como limite. Todo esse processo é de responsabilidade do dispositivo. A Figura 8, apresenta o fluxograma lógico do funcionamento esperado do sistema embarcado.

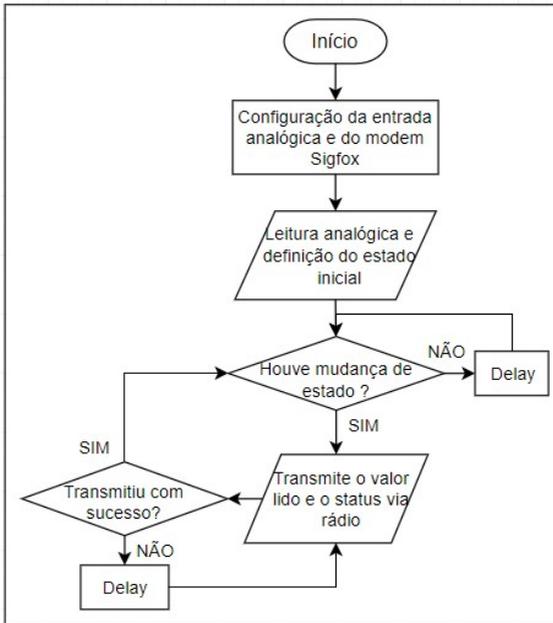
Para isso, os dispositivos de monitoramento de faltas devem conter quatro componentes básicos: unidade de aquisição de dados, unidade de processamento, unidade de transmissão e unidade de energia.

A unidade de aquisição de dados é composta por dois principais subcomponentes: sensores e conversores analógico-digital. Além disso, pode haver a necessidade de um sistema de condicionamento do sinal e sistemas de proteção em caso de sobretensão. O tipo de sensor é abstraído neste trabalho, devido à grande variedade de tipos de linhas de transmissão e suas diferentes características. Entretanto, já existem técnicas bastantes difundidas como a identificação a partir da corrente de curto-circuito proveniente de uma falta e do valor da tensão na linha de transmissão (SAU, 2016). Os sinais analógicos produzidos pelos sensores são convertidos em sinais digitais pelo conversor AD, que deve apresentar uma resolução coerente com o grau de precisão desejado.

O dado digital convertido é passado para unidade de processamento. Nela, é realizada a lógica do dispositivo, verificando os eventos de mudança de estado da linha de distribuição de energia elétrica, além do processo de codificação da mensagem e o controle de erros no processo de transmissão via rádio. Para isso, deve conter um microprocessador e unidades de memória.

As mensagens transmitidas pelos dispositivos tem uma carga útil

Figura 8 – Fluxograma do funcionamento do dispositivo



Fonte: Elaborado pelo Autor

de dados de 12 bytes, como foi citado na secção 3.2. Esse valor é suficiente para transmissão dos valores obtidos pela leitura dos sensores e o status da rede de distribuição elétrica. O formato da mensagem vai variar dependendo das grandezas medidas pelo tipo de sensor escolhido. O status pode ser representando com apenas 1 bit, sobrando o restante para os valores lidos. A especificação do tamanho e significado de cada bit deve ser configurado no *back-end* da Sigfox, para uma correta leitura.

A unidade de transmissão permite que o dispositivo envie mensagens às estações bases. Para isso, o dispositivo deve conter um *chipset* de rádio integrado que seja compatível com a Sigfox e uma antena que garanta o longo alcance.

A Sigfox tem uma abordagem aberta em relação à integração de hardware, permitindo a criação de um design de modem customizado. Ela provê a biblioteca *Sigfox Protocol Library* que permite a programa-

ção do protocolo de comunicação no dispositivo, abstraindo detalhes do protocolo de rádio e fornecendo um conjunto de funções simples. Entretanto, a empresa recomenda a utilização de *chipsets* que sigam um padrão chamado de “*Sigfox Verified modular design*”. Para isso, a Sigfox oferece seus próprios módulos e design de referência que contém o protocolo de comunicação embarcado. Esta solução apresenta como benefícios a facilidade e velocidade de implementação, contudo, a produção em larga escala pode ter um custo elevado.

Outro fator importante na conectividade do dispositivo é a qualidade da antena. Este componente é diretamente relacionado com a característica de longo alcance desejada no contexto dessa aplicação, visto que é responsável por converter os sinais conduzidos em ondas eletromagnéticas. Além disso, tem um grande impacto no consumo de energia do dispositivo. Devido a esses aspectos, a antena deve ser bem projetada e implementada, visando a otimização da performance da irradiação e a minimização da perda de propagação (SIGFOX, 2016).

Por fim, o dispositivo deve conter uma fonte de energia que garanta seu funcionamento. Nesta aplicação, e no cenário de utilização das redes LPWAN em geral, os dispositivos requerem um suprimento de energia autônomo, que se comunique por um longo período sem a necessidade de manutenção periódica. Geralmente, esse fornecimento é realizado por uma bateria, cujo dimensionamento elétrico é fundamental para o bom funcionamento e a sustentabilidade do dispositivo.

Uma análise do desempenho energético de um dispositivo Sigfox, realizado por Gomez et al. (2019), mostrou que com uma bateria de 2400mAh pode atingir uma vida útil de 1,5 anos (a 100 bits/s) ou 2,5 anos (a 600 bits/s) enquanto transmite uma mensagem *uplink* a cada 10 minutos, o que seria o cenário de maior sobrecarga do dispositivo considerando o limite de 140 mensagens por dia. À medida que a taxa de envio de mensagens diminui, o estudo apontou uma vida teórica assintótica de 14,6 anos. Além do período, mostrou que a direcionalidade da comunicação e o tamanho da mensagem apresentam grande influência na eficiência energética, sendo esse último o de maior impacto.

Como foi descrito, o modelo proposto apresenta uma abordagem baseada em eventos, onde a mensagem dentro de uma falta ou do restabelecimento do funcionamento. Além disso, a comunicação consiste estritamente no sentido *uplink*. Estes fatores são favoráveis ao baixo consumo. Entretanto, é necessário o monitoramento da carga da bateria e a configuração da transmissão de mensagens quando a vida útil estiver baixa, alertando a necessidade de manutenção.

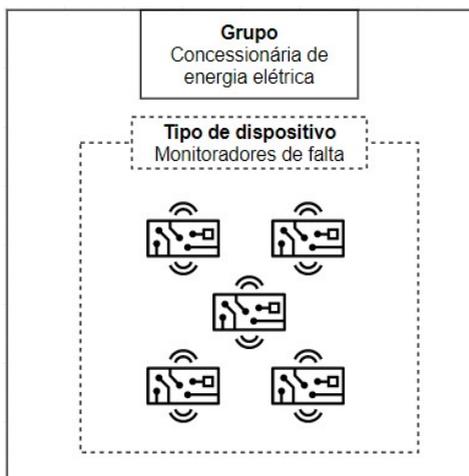
5.1.2 Infraestrutura da Sigfox

Esta parte do modelo consiste na infraestrutura que a Sigfox oferece para o desenvolvimento de aplicações, que envolve as estações bases e seu serviço de nuvem. Essas funcionalidades são operadas pela Sigfox a partir da rede pública fornecida e de suas tecnologias internas.

Um dos fatores primordiais para implementação deste modelo é a cobertura geográfica dos sinais das estações base. Devido à extensão da rede de distribuição de energia elétrica, é necessário realizar um dimensionamento correto que garanta a cobertura de todos os pontos de monitoramento, levando em consideração o ambiente e os fatores climáticos que possam gerar interferência no sinal.

Todos os dispositivos que compõem o sistema de monitoramento da rede de distribuição de energia elétrica devem estar registrados e configurados no *back-end* da Sigfox. Como foi citado na seção 3.2.1, eles apresentam uma estrutura de organização baseado em um grupo e tipos de dispositivo. A Figura 9 apresenta uma ilustração da estrutura deste modelo proposto.

Figura 9 – Representação do modelo no *back-end* da Sigfox



Fonte: Elaborado pelo Autor

O grupo consiste na concessionária responsável pela rede de dis-

tribuição de energia elétrica monitorada a partir da aplicação desta solução. No modelo proposto, dentro do grupo é registrado um tipo de dispositivo que consiste nos monitoradores de falta descritos na subseção anterior.

Ao registrar o tipo de dispositivo, é necessário configurar o formato das mensagens que serão recebidas na *Sigfox Cloud*, especificando os campos que cada conjunto de bits pertence para uma correta decodificação e atribuição de valores. Além disso, deve-se configurar também as chamadas *callback* para o envio de informação à aplicação web. Para tanto, deve especificar o método HTTP, o tipo do dado enviado, as variáveis do corpo da requisição e a rota URL do servidor para à qual será feita a requisição HTTPS. Todos dispositivos do mesmo tipo terão essas configurações equivalentes.

É utilizado uma requisição HTTP com o método POST, onde os dados no corpo da requisição estão no formato *JavaScript Object Notation* (JSON), que é uma estrutura baseado em chave e valor. A Figura 10, mostra como o callback foi configurado dentro do formato JSON no *backend* da Sigfox.

Figura 10 – Formato JSON do corpo da requisição *callback*

```
{
  "device" : "{device}",
  "data" : "{data}",
  "snr" : {snr},
  "rssi" : {rssi},
  "time" : "{time}"
}
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

5.1.3 Aplicação web

A aplicação web consiste no componente final do sistema a qual o operador da rede de distribuição de energia elétrica irá interagir com o objetivo principal de observar o estado de funcionamento dos pontos monitorados pelos dispositivos e acessar os dados gerado pelo sistema. Para isso, a aplicação desenvolvida deve seguir os requisitos funcionais mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Requisitos funcionais da aplicação web

Requisito	Descrição
RF1	O sistema deve provê uma rota URL para receber requisições <i>callback</i> da <i>Sigfox Cloud</i> ;
RF2	O sistema deve processar as mensagens <i>callback</i> recebidas e armazenar em uma base de dados;
RF3	O sistema deve provê um diagrama dinâmico da rede de distribuição de energia elétrica que mostre seu estado atual baseado nos eventos registrados pelos dispositivos;
RF4	O sistema deve possibilitar a visualização das informações dos últimos eventos registrados pelos dispositivos;
RF5	O sistema deve provê acesso aos registros de faltas baseado em um período de análise desejado;

Fonte: Elaborado pelo Autor

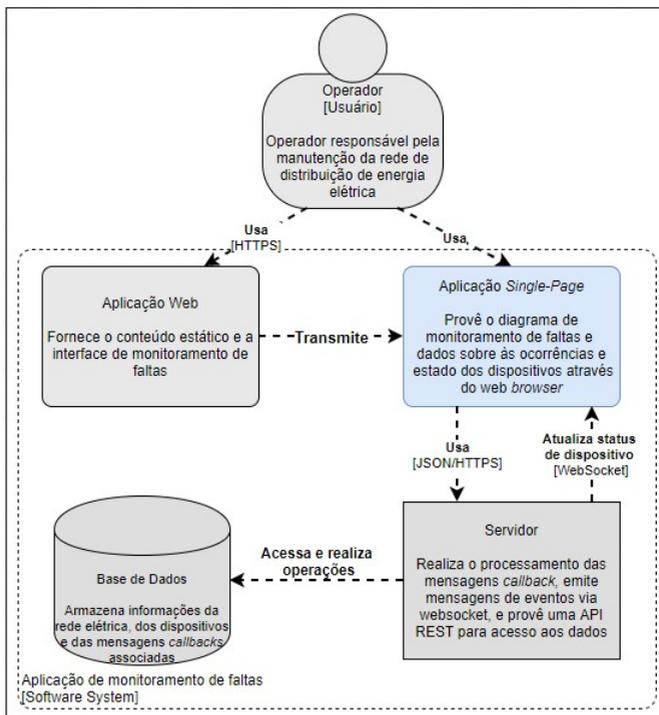
Para atender esses requisitos, neste modelo é proposto uma aplicação baseado na arquitetura de software cliente-servidor onde o sistema é composto de três principais subcomponentes, sendo eles: a base de dados, servidor e cliente. A Figura 11 apresenta um diagrama de contêiner destacando essas partes e as tecnologias adotadas que serão abordadas a seguir.

5.1.3.1 Camada do servidor

O servidor da aplicação tem como principais responsabilidades receber as chamadas *callbacks* enviadas pela *Sigfox Cloud* e fornecer uma camada de serviços para que a aplicação do lado do cliente possa acessar essas informações. Para isso, utiliza-se o modelo arquitetural REST sobre o protocolo HTTP como padrão de desenvolvimento da API da aplicação web (FIELDING; TAYLOR, 2002).

Como foi dito anteriormente, as mensagens *callbacks* consistem em requisições HTTP a partir do método POST. Com isso, a API REST definida pelo servidor deve disponibilizar um endereço URL para receber essas requisições. Ao receber essas chamadas, é realizado uma validação por meio do cabeçalho da requisição verificando se o remetente é de fato o sistema da Sigfox. Além disso, é feito um processamento da mensagem onde é verificado se o formato do corpo da requisição segue o padrão definido (Figura 10) e se o identificador do dispositivo encontra-se registrado na base de dados. Caso esteja, é realizado a conversão do dado, que é enviado no formato hexadecimal, para a codificação ASC II. Por fim, a mensagem é armazenada no banco de dados que será

Figura 11 – Diagrama de contêiner da aplicação web



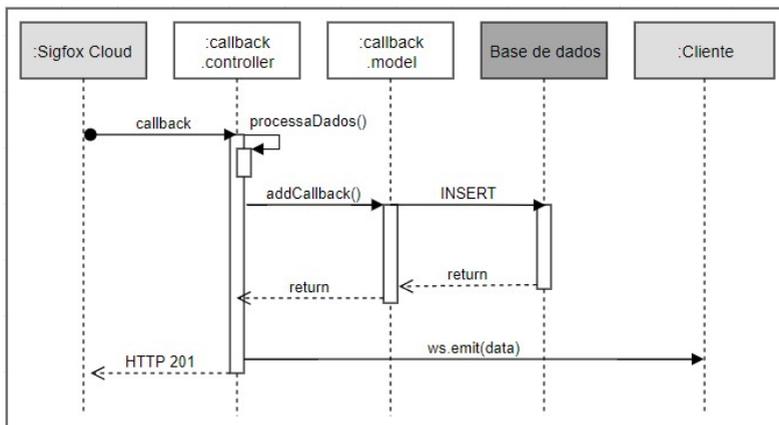
Fonte: Elaborado pelo Autor

abordado na subseção a seguir.

Na ocorrência de um evento, a aplicação do lado do cliente deve ser notificada para disponibilização da informação do evento recebido e atualização do status da rede de distribuição de energia elétrica. Para isso, é necessário a utilização do protocolo de comunicação WebSocket, visto que a comunicação via HTTP é unidirecional e necessita de uma requisição por parte do cliente para o envio de dados. Como foi abordado na Seção 4.1, o protocolo WebSocket é bidirecional, onde tanto o cliente quanto o servidor podem enviar mensagens a qualquer momento a partir do estabelecimento de uma conexão. Com isso, ao realizar a validação e o armazenamento de um evento, o servidor emite uma mensagem ao cliente com os dados da ocorrência.

A Figura 12 ilustra esse processo descrito a partir de um diagrama de sequência, que mostra o fluxo dos processos e as mensagens trocadas entre os diferentes componentes. Neste diagrama, a camada do servidor está representado pela subcamada de controle, responsável pela lógica do processamento da requisição, e a subcamada de modelo que tem como função criar uma interface com o banco de dados e realizar as operações sobre ele.

Figura 12 – Diagrama de sequência - processamento do *callback*



Fonte: Elaborado pelo Autor

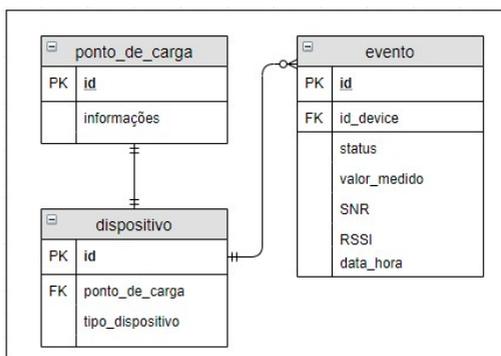
Além disso, essa camada deve oferecer serviços ao cliente que possibilite acessar os dados armazenados no banco de dados, a partir de diferentes parâmetros. Destaca-se a necessidade de: fornecer o estado atual da rede de distribuição de energia elétrica baseado nos últimos eventos registrados em cada ponto de carga monitorado; fornecer os últimos eventos de falta e restabelecimento registrados; acessar os registros de faltas em cada ponto de carga e em um determinado período de análise. Essas funcionalidades, são implementadas dentro da API REST a partir de uma requisição HTTP com método GET, por parte do cliente, nas rotas determinadas.

5.1.3.2 Camada de armazenamento

A base de dados consiste na camada responsável pelo armazenamento persistente dos dados gerados pelos dispositivos de monitoramento, baseado na modelagem dos pontos de cargas da rede de distribuição elétrica analisada e nos dispositivos associados a eles.

O modelo proposto neste trabalho é baseado em um banco de dados relacional a partir de uma linguagem SQL, devido a necessidade de associação entre as diferentes entidades do sistema. A Figura 13 apresenta um diagrama entidade relacionamento mostrando a associação entre as diferentes classes de tabelas, sendo: ponto de carga, dispositivo e evento.

Figura 13 – Diagrama entidade relacionamento



Fonte: Elaborado pelo Autor

Um ponto de carga é relacionado exclusivamente com um dispositivo, em uma relação de um para um. Ou seja, cada ponto analisado na rede de distribuição de energia elétrica apresentará apenas um dispositivo associado. Cada dispositivo apresenta vários eventos associados, a partir de uma relação de um para muitos. Essa estrutura de associação auxilia no processo de consulta dos dados por parte do servidor, onde é possível acessar informações sobre os eventos baseado em diferentes pontos de cargas e períodos. Além disso, garante a consistência dos dados dos eventos recebidos, onde um evento só é registrado se, o dispositivo associado pela chave estrangeira, está cadastrado na base de dados.

5.1.3.3 Camada do cliente

A aplicação do lado do cliente é o componente final do modelo proposto e apresenta o papel fundamental de disponibilizar as informações obtidas pela rede de sensores aos operadores da rede de distribuição de energia elétrica, para que seja realizado as tomadas de decisões e a manutenção da rede no menor tempo possível. Esse componente contempla os requisitos RF3, RF4 e RF5 mostrados na Tabela 3.

A aplicação proposta neste modelo é acessada a partir do navegador web e deve se comunicar com a camada do servidor para acessar os dados e os serviços disponibilizados. Como foi dito anteriormente, essa conexão é realizada de duas maneiras: a partir de uma API REST e pelo protocolo WebSocket. O primeiro provê acesso aos dados estáticos armazenados na base de dados e o segundo é responsável pela dinamicidade da disponibilização dos eventos ocorridos na rede.

O foco principal consiste em provê um diagrama dinâmico da rede de distribuição de energia elétrica. Esse diagrama apresenta o estado atual de todos os pontos de carga monitorados pelos dispositivos e, para isso, deve ser uma representação da rede de distribuição contendo esses pontos e suas linhas de transmissão que os conectam.

O diagrama é implementado utilizando a tecnologia SVG abordada na seção 4.2 deste trabalho. Cada nó do diagrama da rede de distribuição de energia elétrica deve ser associado com um ponto de carga armazenado no banco de dados, que será acessado e representado pelo seu identificador. O fluxo de funcionamento do processo inicia-se a partir de uma requisição da aplicação cliente para o *endpoint* da API do servidor que fornece o estado atual de cada nó, que consiste no último evento registrado de acordo com o status da tabela evento mostrado na Figura 13. O status pode estar no estado ON ou OFF de acordo com funcionamento da rede e é representado no diagrama pela cor do ponto de carga, podendo ser verde ou vermelho, respectivamente. Após a obtenção do estado atual, é iniciado a conexão WebSocket entre o cliente e o servidor. A partir daí, a aplicação irá escutar possíveis mensagens de detecção de eventos na rede por parte do servidor. Em caso de uma ocorrência de falta ou restabelecimento, ao receber a mensagem WebSocket, será atualizado o diagrama de acordo com o ponto da ocorrência e do status medido.

Além disso, a página de monitoramento deve conter um painel com as informações dos últimos eventos detectados. Esse painel também utiliza da API REST para obtenção dos últimos eventos e da conexão WebSocket para atualização dinâmica.

6 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

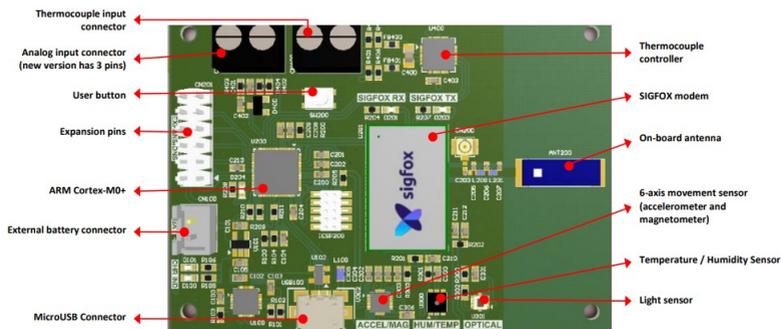
Nesse capítulo será realizada a apresentação do protótipo desenvolvido a partir da aplicação do modelo proposto em um cenário de estudo.

6.1 PROTÓTIPO DO DISPOSITIVO

O protótipo do dispositivo foi desenvolvido visando validar o processo de detecção dos fenômenos de interesse e a transmissão da mensagem através da rede Sigfox. O método utilizado foi baseado na leitura de uma grandeza analógica, e na detecção de um evento relacionado a transição do valor lido sobre um nível estabelecido, caracterizando uma falta ou restabelecimento do funcionamento do ponto da rede monitorado.

Para isso, foi utilizado a placa multi-sensor Sigfox EDK que consiste em um kit de desenvolvimento com diversos sensores e periféricos acoplados, que podem ser vistos na Figura 14. A placa tem como base o microcontrolador ARM Cortex-M0 + ATSAMD21G18A-M, que tem como característica uma alta eficiência em termos energéticos devido seu gerenciamento de energia integrado com funções de baixa potência. Além disso, a placa já apresenta um modem Sigfox configurado para uso (uDEV, 2016).

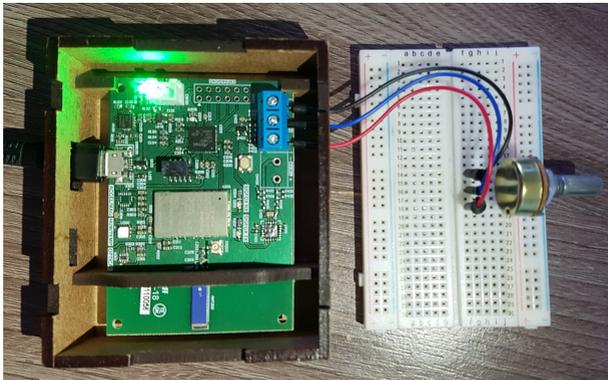
Figura 14 – Multi-Sensor Sigfox Embedded Development Kit



Fonte: (uDEV, 2016)

A configuração do protótipo do dispositivo foi baseada na entrada analógica acoplada e no conversor analógico-digital de resolução de 12 bits do microcontrolador. Para realização dos testes, foi utilizado um potenciômetro linear de $10k\Omega$ ligado ao conector de entrada analógica e estabelecido um nível de tensão como valor de *threshold*. Ao variar a resistência do potenciômetro, era variado a tensão de entrada em um intervalo de 0V à, aproximadamente, 3,5V. Quando o valor lido ultrapassava o limite estabelecido de 1,7V, era realizado a transmissão da mensagem composta pelo valor lido e o status do ponto monitorado. A Figura 15 mostra o dispositivo de teste utilizado.

Figura 15 – Protótipo do dispositivo para teste



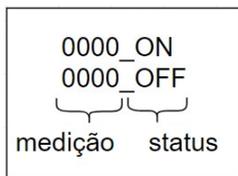
Fonte: Elaborado pelo Autor

A programação do dispositivo foi realizada utilizando a plataforma de desenvolvimento integrado Atmel Studio 7. Foi utilizando a linguagem de programação C e a biblioteca de desenvolvimento disponibilizada pelo fabricante da placa que contém diversas funcionalidades já implementadas. Além disso, foi utilizado o *software* SAM-BA (versão 2.17) para gravação do programa no microcontrolador.

A lógica utilizada foi baseada no fluxograma mostrado na Figura 8, onde a mudança de estado avaliado consistiu na mudança do nível de tensão lido. A mensagem transmitida foi configurada de acordo com o formato mostrado na Figura 16. Os quatro primeiros caracteres são o valor de tensão lido, seguido de um separador e do status do ponto analisado.

O dispositivo foi registrado no *backend* da Sigfox, onde foi confi-

Figura 16 – Configuração da mensagem de transmissão para teste



Fonte: Elaborado pelo Autor

gurado a chamada *callback* para a URL da aplicação web desenvolvida, que será abordada a seguir. O método HTTP e a configuração do corpo da requisição seguiu o padrão descrito na seção 5.1.2.

6.2 PROTÓTIPO DA APLICAÇÃO WEB

Nesta seção é descrito as tecnologias e o processo de desenvolvimento do protótipo da aplicação web a partir do modelo descrito na subseção 5.1.3.

Para a implementação da camada de serviços, foi utilizado a linguagem de programação JavaScript a partir do ambiente de execução Node.js¹ que permite a execução desta linguagem no lado do servidor. A API REST foi desenvolvida utilizando o *express.js*² que consiste em um *framework* para desenvolvimento de aplicativos web com Node.js e fornece métodos utilitários HTTP baseado na arquitetura REST. Com isso, Foi definido os seguintes *endpoints* para acesso dos serviços:

- `http://ipservidor:8080/api/callbacks`
- `http://ipservidor:8080/api/events/latest`
- `http://ipservidor:8080/api/loadpoints/state`

O primeiro item da lista acima consiste no endereço URL que recebe os chamadas *callbacks* com as informações dos eventos. Para configurar esse *endpoint* na plataforma da Sigfox é necessário que o endereço

¹<https://nodejs.org/>

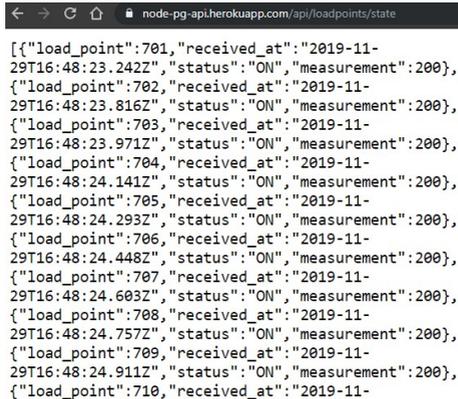
²<https://expressjs.com/>

IP do servidor esteja público. Para isso, foi utilizado a plataforma Heroku³ que fornece o serviço de hospedagem em nuvem de aplicações em diferentes linguagens. A base de dados também foi configurado nesta plataforma, onde foi utilizado o PostgreSQL⁴ como sistema de gerenciamento de banco de dados relacional, baseado na relação mostrada na Figura 13.

Para a modelagem da rede de distribuição de energia elétrica foi utilizado o modelo *IEEE 37 Node Test Feeder* que consiste em um modelo de rede real amplamente utilizado em testes e simulações no meio acadêmico. Os parâmetros detalhados são disponibilizados pela IEEE⁵ para referência. Parte destes parâmetros foram abstraídos nesse trabalho, devido sua irrelevância na aplicação.

Com base nesse modelo, foram realizados as inserções iniciais dos pontos de cargas, dispositivos e dos eventos, onde foram inicializados com o status ON. O ponto de carga com identificador 725 foi associado ao protótipo do dispositivo configurado na seção 6.1. A partir disso, era possível acessar os dados a partir da API. A Figura 17 mostra a resposta do servidor à uma requisição HTTP com método GET na rota para obter o estado atual dos pontos de carga. Percebe-se que os dados são obtidos no formato JSON.

Figura 17 – API REST da camada de serviços



```
[{"load_point":701,"received_at":"2019-11-29T16:48:23.242Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":702,"received_at":"2019-11-29T16:48:23.816Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":703,"received_at":"2019-11-29T16:48:23.971Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":704,"received_at":"2019-11-29T16:48:24.141Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":705,"received_at":"2019-11-29T16:48:24.293Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":706,"received_at":"2019-11-29T16:48:24.448Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":707,"received_at":"2019-11-29T16:48:24.603Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":708,"received_at":"2019-11-29T16:48:24.757Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":709,"received_at":"2019-11-29T16:48:24.911Z","status":"ON","measurement":200},
{"load_point":710,"received_at":"2019-11-
```

Fonte: Elaborado pelo Autor

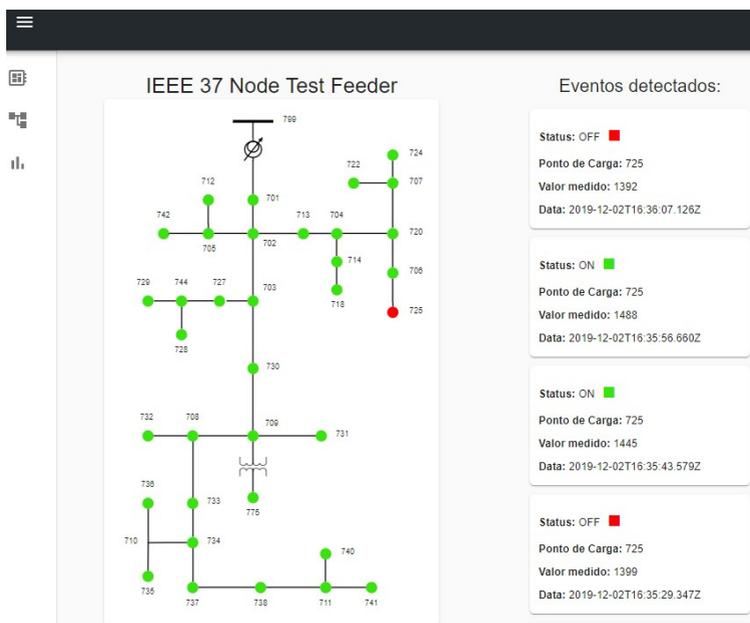
³<https://heroku.com/>

⁴<https://www.postgresql.org/>

⁵<https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>

Com o servidor e a base de dados configurados foi desenvolvido a aplicação web da camada do cliente. Para isso, foi utilizado o React⁶ que consiste em uma biblioteca JavaScript para criação de interfaces web. Essa tecnologia adota como base para criação de aplicações a componentização, onde cada item da página com sua funcionalidade consiste em um componente. Com isso, a página web é composta na combinação destas unidades. O benefício desta tecnologia, e a motivação na utilização deste trabalho, é que cada componente atualiza de forma independente, ou seja, quando ocorre uma mudança de estado da aplicação, apenas o componente afetado é renderizado novamente, não sendo necessário recarregar toda a página. Com isso, a atualização do diagrama da rede de distribuição de energia elétrica não interfere os outros componentes, o que gera um melhor desempenho no processo de dinamicidade. A Figura 18 mostra a página de monitoramento web desenvolvida.

Figura 18 – Página web de monitoramento das faltas



Fonte: Elaborado pelo Autor

⁶<https://reactjs.org/>

Com base no modelo de rede utilizado, foi desenvolvido o diagrama SVG e incorporado na aplicação dentro de um componente que pode ser observado na Figura 18, onde a cor de cada ponto de carga indica seu estado de funcionamento. Além disso, percebe-se o painel com os últimos eventos detectados e suas informações. A lógica do funcionamento da aplicação seguiu as especificações do modelo proposto.

7 TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A partir do protótipo desenvolvido e da integração dos componentes do sistema, foram realizados testes com o objetivo de avaliar seu funcionamento e sua viabilidade de aplicação em um contexto real. Os experimentos tiveram dois principais focos: análise da conectividade da tecnologia Sigfox, avaliando a qualidade do sinal e a área de cobertura em um ambiente urbano; e na avaliação da aplicação proposta como meio de visualização e controle no contexto da problema.

O primeiro experimento realizado consistiu na variação do nível de tensão e, conseqüentemente, no estado do ponto analisado até que o dispositivo transmitisse mensagens de detecção de eventos à estação base. Esse procedimento foi realizado variando as distâncias da estação base até que houvesse uma baixa eficiência na detecção das mensagens. O cenário da realização foi variado em um ambiente urbano e em condições climáticas normais. A Figura 19 mostra os pontos de transmissão das mensagens e a distância à estação base na cidade de Araranguá, Santa Catarina.

Figura 19 – Pontos de realização do experimento



Fonte: Elaborado pelo Autor

A partir das mensagens recebidas no servidor da aplicação, foi feito uma análise dos indicadores RSSI (do Inglês *Received Signal Strength Indication*) e SNR (*Signal Noise Ratio*). O RSSI indica a intensidade do sinal recebido pela estação base e o SNR consiste na relação entre

a potência do sinal (RSSI) e a potência do ruído recebido na estação base (FOROUZAN, 2008).

A Figura 20 mostra o gráfico gerado a partir das mensagens recebidas com a variação da distância em relação ao indicador de qualidade do sinal SNR.

Figura 20 – Gráfico da distância em relação ao índice SNR



Fonte: Elaborado pelo Autor

Os valores do SNR obtidos no experimento apresentaram um bom resultado nas distâncias de 0km à 2km, com valores superior a 18dB que representa um sinal estável e de alta qualidade, com exceção a 0,5km onde houve uma variação e, em algumas mensagens, foi obtido um alto índice de ruído que pode ter sido ocasionado por interferência de algum outro sistema do local da experimentação. Na distância de 3km já se percebe um impacto do ruído mas ainda apresenta um índice superior a 10dB que ainda é considerado um valor regular. A 4km foi obtido um valor inferior a 8dB o que impossibilita a realização de uma conexão instável e é caracterizada por uma grande perda dos pacotes.

Como o experimento consistiu de um teste estacionário, o RSSI deveria ter uma característica estável. Esse fato pode ser observado na Figura 21, onde o gráfico apresentou um comportamento aproximadamente linear entre o aumento da distância e o decaimento do índice RSSI, com exceção na distância de 0,5km. Segundo a documentação da Sigfox¹, um valor superior a -122dBm é considerado um bom sinal visto que o experimento conteve apenas uma estação base. Essa quali-

¹<https://support.sigfox.com/docs/link-quality:-general-knowledge>

dade pode ser observada até a distância de 2km. A 3km o índice RSSI também indica uma conexão regular visto que possui um valor entre -122dBm e -135dBm. Já a uma distância de 4km, o valor ultrapassa esse intervalo o que é considerado o limite do sinal.

Figura 21 – Gráfico da distância em relação ao índice RSSI



Fonte: Elaborado pelo Autor

Outro ponto importante a ser analisado pelo teste, é a eficiência da comunicação que analisa o número de mensagens recebidas pela estação base em relação ao número de mensagens que foram transmitidas. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos onde, no intervalo de 0km à 3km todas as mensagens enviadas pelos dispositivos foram corretamente recebidas pela estação base, chegando ao servidor da aplicação. Já a uma distância de 4km, apenas 60% das mensagens foram detectadas, indicando uma baixa cobertura do sinal a esta distância.

O segundo teste realizado envolveu a camada da aplicação web. O intuito do experimento realizado foi avaliar o comportamento do sistema considerando o modelo de rede de distribuição de energia elétrica adotado, validando a correta notificação dos eventos de falta, atualização do diagrama do estado da rede e acesso aos registros do banco de dados.

O teste consistiu na simulação das mensagens *callbacks* por meio de um processo em *software*. Para isso, foi configurado o formato da requisição HTTP de maneira semelhante ao da *Sigfox Cloud*, variando os valores do corpo da requisição de acordo com os cenários considerados no teste. Ou seja, para simulação de uma falta em um ponto de

Figura 22 – Gráfico da distância em relação á eficiência da comunicação



Fonte: Elaborado pelo Autor

carga desejado era especificado nos dados da requisição, o identificador do dispositivo e dados coerente com o evento simulado.

Além disso, foi observado a variação da aplicação a partir da emissão de eventos pelo protótipo do dispositivo que estava associado ao ponto de carga 725 do modelo de rede de distribuição onde, ao variar o estado do nível de tensão era observado a atualização do diagrama e do painel de eventos. A Figura 18, apresenta uma visualização dentro desse experimento.

Como resultado, os componentes aplicação web apresentaram comportamento coerente com os cenários de testes e das simulações. O servidor da aplicação conseguiu desempenhar as funções definidas no protótipo onde, na ocorrência de um evento, realizou o envio da notificação da ocorrência à interface no navegador web através da conexão WebSocket, além do armazenamento na base de dados. A aplicação web no lado do cliente também funcionou corretamente, e possibilitou a visualização do estado da rede a partir do diagrama em tempo real, de acordo com a regras estabelecidas no protótipo, indicando com cor vermelha as linhas de ocorrência da falta e em verde os pontos cujo funcionamento está adequado.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto um modelo de um sistema de monitoramento de faltas em redes de distribuição de energia elétrica que adota uma abordagem de redes de sensores sem fio cuja conectividade é realizada através da rede Sigfox, e tem como interface de visualização final do estado da rede, uma aplicação web.

Baseado neste modelo, foi desenvolvido um protótipo inicial para realização de testes que consistiu na configuração de um dispositivo embarcado para monitoramento de uma grandeza elétrica e no desenvolvimento da página web com um diagrama dinâmico da rede de distribuição e visualização dos eventos identificados.

Foi realizado testes com o protótipo do dispositivo para avaliação da conectividade da tecnologia Sigfox e da qualidade do sinal em ambiente urbano. Neste experimento foi analisado a área de cobertura do sinal e os índices de SNR e RSSI a partir da emissão de mensagens em diferentes distâncias. Os resultados apresentaram um comportamento esperado, onde em certos cenários foi observado uma maior instabilidade do sinal em relação aos ruídos.

Além disso, foi analisado o comportamento da aplicação web a partir de uma simulação utilizando o modelo *IEEE 37 Node Test Feeder* e da transmissão de mensagens por parte do protótipo do dispositivo. A aplicação funcionou adequadamente ao receber mensagens de detecção de faltas no servidor, onde foi possível visualizar a atualização do diagrama da rede e as informações do evento ocorrido.

A partir dos experimentos, foi possível perceber a validade da utilização da rede Sigfox como meio de comunicação para esta aplicação, visto a eficiência no consumo energético, na confiabilidade e na longa distância alcançada na transmissão das mensagens. Além disso, a integração com a *Sigfox Cloud* a partir do método *callback* em combinação com as tecnologias utilizadas para desenvolvimento da aplicação web se mostraram eficientes para realização do monitoramento do estado da rede, apresentando um curto intervalo entre a detecção da ocorrência e a disponibilização das informações. Destaca-se a utilização do protocolo WebSocket e do padrão SVG para visualização a partir de um diagrama dinâmico.

Contudo, a adoção deste modelo em um cenário real necessita de pesquisas em fatores que vão além do escopo deste trabalho, onde foi realizado apenas uma análise inicial a partir de um protótipo em um ambiente controlado.

Um dos fatores primordiais que deve ser considerado para implementação deste modelo é a cobertura geográfica dos sinais das estações base. Devido à extensão da rede de distribuição de energia elétrica, é necessário realizar um dimensionamento correto que garanta a cobertura de todos os pontos de monitoramento, levando em consideração o ambiente e os fatores climáticos que possam gerar interferência no sinal. Além disso, faz-se necessário o projeto do dispositivo embarcado, considerando o melhor tipo de sensor para essa abordagem de monitoramento e a especificação dos recursos computacionais levando em consideração a taxa de transmissão, a direcionalidade da comunicação e o tamanho das mensagens que apresentam grande influência na eficiência energética.

8.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir do que foi elaborado neste trabalho, sugere-se como trabalhos futuros para o desenvolvimento do modelo proposto os itens colocados a seguir:

1. Aplicação da solução proposta utilizando a tecnologia LoRaWAN a partir da configuração de uma rede privada.
2. Projeto e desenvolvimento do sistema embarcado de monitoramento de faltas utilizando sensores aplicáveis em um contexto real para detecção de faltas, considerando as diferentes características da rede de distribuição de energia elétrica.
3. Melhoria da aplicação web a partir do desenvolvimento de novos métodos que permitam uma melhor análise dos dados obtidos pela rede de sensores e geração de informações úteis para os operadores da rede. Além disso, métodos que permitam a criação do diagrama da rede de forma automática a partir de sua modelagem no banco de dados e a integração com serviço de visualização de mapa da região monitorada.

REFERÊNCIAS

- AERNOUTS, M. et al. A comparison of signal strength localization methods with sigfox. In: *2018 15th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.
- ANEEL. *Qualidade do Serviço*. 2016.
<https://www.aneel.gov.br/qualidade-do-servico2>. Acessado em julho de 2019.
- ANEEL. *Fundamentos do Setor Elétrico*. 2017.
<http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/sumario.html>. Acessado em julho de 2019.
- BURATTI, C. et al. An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 9, p. 6869–96, 09 2009.
- CNI. *Sondagem Especial - Indústria e energia*. 2016.
<http://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondesp-65-industria-e-energia/1>. Acessado em julho de 2019.
- EPE. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2027*. 2018. <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE>. Acessado em julho de 2019.
- FANUCCHI, R. Z. *A Detecção e a Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- FIELDING, R. T.; TAYLOR, R. N. Principled design of the modern web architecture. *ACM Trans. Internet Technol.*, ACM, New York, NY, USA, v. 2, n. 2, p. 115–150, maio 2002. ISSN 1533-5399.
 <<http://doi.acm.org/10.1145/514183.514185>>.
- FOROUZAN, B. *Comunicação de Dados e Redes de Computadores*. [S.l.]: McGraw Hill, 2008. ISBN 9788586804885.
- GARCIA, P.; KLEINSCHMIDT, J. Tecnologias emergentes de conectividade na iot: Estudo de redes lpwan. In: . [S.l.: s.n.], 2017.

- GOMEZ, C. et al. A sigfox energy consumption model. *Sensors (Basel, Switzerland)* - *MDPI*, v. 19, p. 681, 2019.
- IKPEHAI, A. et al. Low-power wide area network technologies for internet-of-things: A comparative review. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 6, n. 2, p. 2225–2240, Abril 2019.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. d.; ROBBA, E. J. *Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica*. 2. ed. [S.l.]: Edgard Blucher, 2010.
- LAVRIC, A.; PETRARIU, A. I.; POPA, V. Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions. *IEEE Access*, v. 7, p. 35816–35825, 2019.
- LAVRIC, A.; POPA, V. Internet of things and loraTM low-power wide-area networks: A survey. In: *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- LORA ALLIANCE. *A technical overview of LoRa® and LoRaWANTM*. 2015. <https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>. Acessado em setembro de 2019.
- MATIN, M.; ISLAM, M. Overview of wireless sensor network. In: _____. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–22. ISBN 978-953-51-0735-4.
- MEIER, A. von. *Electric Power Systems: A Conceptual Introduction*. [S.l.]: Wiley, 2006. (Wiley Survival Guides in Engineering and Science). ISBN 9780470036402.
- MEKKI, K. et al. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, v. 5, n. 1, p. 1 – 7, 2019. ISSN 2405-9595. <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>>.
- NOLAN, K. E.; GUIBENE, W.; KELLY, M. Y. An evaluation of low power wide area network technologies for the internet of things. In: *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 439–444.
- OSMAN, N. I.; ABBAS, E. B. Simulation and modelling of lora and sigfox low power wide area network technologies. In: *2018 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.

PIMENTEL, V.; NICKERSON, B. G. Communicating and displaying real-time data with websocket. *IEEE Internet Computing*, v. 16, n. 4, p. 45–53, Julho 2012.

QUINT, A. Scalable vector graphics. *IEEE MultiMedia*, v. 10, n. 3, p. 99–102, July 2003.

RAMOS, C. C. O. *Caracterização de Perdas Comerciais em Sistemas de Energia Através de Técnicas Inteligentes*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

REYNDERS, B.; POLLIN, S. Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. In: *2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–5.

SAU, R. F. G. *Alocação otimizada de indicadores de falta em redes de distribuição de energia elétrica considerando a presença de geradores distribuídos*. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, 2016.

SIGFOX. *Antenna design for Sigfox Ready devices - Recommendation guide*. 2016. <https://support.sigfox.com/docs/official-antenna-design-for-sigfox-ready-devices>. Acessado em julho de 2019.

SIGFOX. *Sigfox Technical Overview*. 2017. <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>. Acessado em setembro de 2019.

SKVORC, D.; HORVAT, M.; SRBLJIC, S. Performance evaluation of websocket protocol for implementation of full-duplex web streams. In: *2014 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1003–1008.

SOUZA, F. A. de. *Detecção de falhas em sistema de distribuição de energia elétrica usando dispositivos programáveis*. Dissertação (Mestrado) — UNESP, São Paulo, set. 2008.

STEVENSON, W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. 2 ed.. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Ltda, 1986.

uDEV. *Multi-Sensor Sigfox Embedded Development Kit (EDK)*. 2016. <https://github.com/udev-br/SIGFOX-EDK/tree/master/Manual>. Acessado em setembro de 2019.

ZHOU, Q. et al. Design and implementation of open lora for iot. *IEEE Access*, v. 7, 2019.