UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROSVANDO MARQUES GONZAGA JUNIOR

**PLATAFORMA EMBARCADA PARA
MONITORAMENTO DESCENTRALIZADO DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
CONCEITOS DE INTERNET DAS COISAS**

SÃO CARLOS

2020

ROSVANDO MARQUES GONZAGA JUNIOR

**PLATAFORMA EMBARCADA PARA
MONITORAMENTO DESCENTRALIZADO DE
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO
CONCEITOS DE INTERNET DAS COISAS**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências, programa em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Jr.

Trata-se da versão corrigida dessa dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

São Carlos

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M642p Marques Gonzaga Junior, Rosvando
 Plataforma Embarcada Para Monitoramento
 Descentralizado de Sistemas de Distribuição Utilizando
 Conceitos de Internet das Coisas / Rosvando Marques
 Gonzaga Junior; orientador João Bosco Augusto London
 Junior. São Carlos, 2020.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
 Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de
 Concentração em Sistemas Elétricos de Potência --
 Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
 São Paulo, 2020.

 1. Sistemas de Distribuição de Energia. 2.
 Estimação de Estado. 3. Internet das Coisas. 4.
 Infraestrutura de Medição Avançada. 5. Medidores
 Eletrônicos. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ROSVANDO MARQUES GONZAGA JUNIOR.**

Título da dissertação: "Plataforma embarcada para monitoramento descentralizado de sistemas de distribuição utilizando conceitos de Internet das Coisas".

Data da defesa: 20/10/2020

Comissão Julgadora:

Resultado

Prof. Associado **João Bosco Augusto London Junior**
(Orientador)

Aprovado

(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

Prof. Dr. **Madson Cortes de Almeida**

Aprovado

(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. **Edson da Costa Bortoni**

Aprovado

(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:

Prof. Titular **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

*Aos meus pais e minha
família, com amor.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por permitir que coisas extraordinárias ocorram em minha vida, pela minha família e amigos de longa data.

Aos meus pais, e irmãs pela compreensão e ajuda durante a realização deste trabalho.

À minha namorada pelo suporte, amor e carinho em todas as horas de dificuldade.

Ao Professor Dr. João Bosco Augusto London Junior, pela orientação, confiança no meu trabalho, muitas das vezes realizado a distância, atenção e incentivo na elaboração deste trabalho.

Ao Professor Dr. Rodrigo Maximiano Antunes de Almeida, do IESTI da Universidade Federal de Itajubá, pelo apoio durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Professor Dr. Juan Manoel Corchado Rodríguez do *Departamento de Informática y Automática* da *Universidad de Salamanca*, pela orientação durante o período de estadia na Espanha.

Aos professores e amigos do Laboratório de Análise Computacional em Sistemas Elétricos de Potência – LACOSEP, pela recepção, contribuição com meu desenvolvimento pessoal, ensinamentos e amizade durante todo este período.

A todos os amigos da pós-graduação pelas conversas, risadas, cafés da Vera, cafés do ICMC e inúmeros almoços e jantares no restaurante universitário da USP.

Aos amigos do Futebol CAASO pela recepção, amizade, jogos, campeonatos, viagens e churrascos que ajudaram e muito na adaptação a cidade de São Carlos -SP.

Aos amigos da *Universidad de Salamanca*, em especial aos do BISITE, pelo apoio e amizade no período em que estive na Espanha.

A todos os integrantes do Projeto de P&D (ANEEL 2866-0504/2018) da Companhia Paranaense de Energia – COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

À FUNAPE pelo apoio financeiro.

*“Quando algo é importante o suficiente, você realiza mesmo que
as chances não estejam a seu favor”*

(Elon Musk)

Sumário

Sumário.....	i
Resumo.....	iv
Abstract.....	vi
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
Capítulo 1 - Introdução	12
1.1. Motivação	12
1.2. Proposição.....	14
1.3. Estrutura do Trabalho	15
Capítulo 2 - Monitoramento em Tempo Real de Sistemas de Distribuição.....	17
2.1. Introdução.....	17
2.2. Sistemas de Distribuição.....	19
2.2.1. Rede de Distribuição Primária	19
2.2.2. Rede de Distribuição Secundária	20
2.2.3. Equipamentos em SDs.....	20
2.3. Redes Inteligentes de Energia	22
2.3.1. Projetos Piloto	23
2.4. Estimação de Estado	24
2.5. Revisão Bibliográfica.....	26
2.6. Considerações Finais.....	35
Capítulo 3 - Redes e Protocolos de Comunicação	37
3.1. Introdução.....	37
3.2. Tecnologias de Comunicação por Rádio Frequência	37
3.2.1. Long Range	38
3.2.2. Sigfox.....	39

3.2.3.	Zigbee.....	39
3.3.	Tecnologias de Comunicação Celular	40
3.3.1.	Long Term Evolution	41
3.3.2.	Narrow Band IoT	42
3.4.	Comunicação pela rede elétrica	42
3.5.	Protocolos de Rede e de Comunicação Para Aplicações de Internet das Coisas	43
3.5.1.	LoRaWAN.....	43
3.5.2.	SigFox.....	44
3.5.3.	Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	45
3.5.4.	Rest HTTP	45
3.5.5.	6LowPAN	46
3.6.	Faixas de Frequência e Possibilidade de Interferência.....	46
3.7.	Considerações Finais.....	47
Capítulo 4 -	Plataforma Embarcada Para Monitoramento Descentralizado de Redes Inteligentes de Energia	49
4.1.	Introdução	49
4.2.	Arquiteturas Descentralizadas para Alocação de Módulos Eletrônicos para Monitoramento de SDs.....	49
4.3.	Comparando as Arquiteturas Descentralizadas Propostas Com Uma Centralizada em Um SD Real.....	52
4.3.1.	Rede de Distribuição da Cidade de Londrina-PR	52
4.3.2.	Requerimentos Computacionais do EEE Proposto	53
4.3.3.	Avaliação dos Requisitos de Volume de Dados	55
4.3.4.	Redução do Volume de Dados Utilizando o Estimado de Estado Embarcado	55
4.4.	Metodologia de Implementação da Plataforma Embarcada.....	57
4.4.1.	Rede Teste Utilizada	57
4.4.2.	Requerimentos de Hardwares.....	59
4.4.3.	Requerimentos de Softwares	61

4.5. Considerações Finais.....	63
Capítulo 5 - Testes e Análises dos Resultados	65
5.1. Introdução	65
5.2. Detalhamento da Implementação da Plataforma Embarcada.....	65
5.3. Sistemática de Avaliação do EEE	72
5.4. Considerações Finais.....	77
Capítulo 6 - Conclusões e Perspectivas Futuras.....	79
6.1. Considerações Finais.....	79
6.2. Perspectivas Futuras	81
6.3. Publicações.....	82
Referências Bibliográficas	84
Apêndice A – Resultados do processo de estimação para a rede completa.....	89
Apêndice B – Resultados do processo de estimação para a rede do transformador 1370.	106
Apêndice C – Resultados do processo de estimação para a rede primária com os valores de P e Q de cada transformador recebidos da plataforma embarcada.	110

Resumo

GONZAGA JUNIOR, R. M. **Plataforma Embarcada Para Monitoramento Descentralizado de Sistemas de Distribuição Utilizando Conceitos de Internet das Coisas**. 2020. Pg. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é demonstrar as vantagens e viabilidade do monitoramento descentralizado de Sistemas de Distribuição (SDs). Para isso propõe: (i) Arquiteturas descentralizadas para alocação de módulos eletrônicos de processamento para monitoramento de SDs; (ii) Comparação dessas arquiteturas com uma estratégia centralizada para monitoramento de SDs; (iii) Desenvolvimento e implantação, em bancada, de uma Infraestrutura de Medição Avançada (IMA), fazendo uso de módulos de comunicação que permitem o desenvolvimento de redes wireless para o envio e recebimento de mensagens em tempo real, utilizando conceitos de Internet das Coisas e *Edge Computing*. Essa infraestrutura possibilita a simulação de uma rede inteligente de energia, no que se refere ao tráfego de informações existentes entre os medidores eletrônicos inteligentes e os centros de operação de sistemas de distribuição; e (iv) desenvolvimento e implantação de um estimador de estado por mínimos quadrados ponderados em um módulo eletrônico (embarcado), a partir da utilização de placas de desenvolvimento eletrônico dotadas de processadores de alta performance, com sistema operacional Linux para possibilitar análises matriciais referentes ao processo de estimação de estado. Os estudos referentes às propostas (i) e (ii) foram desenvolvidos com base no SD real da Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Os desenvolvimentos eletrônicos (propostas (iii) e (iv)) foram realizados com apoio do Laboratório de Eletrônica do *Grupo de Investigación en Bioinformática, Sistemas Informáticos Inteligentes y Tecnología Educativa (BISITE)* da *Universidad de Salamanca*, na Espanha. Para validação do estimador de estado embarcado em módulos eletrônicos fez-se uso de um sistema de distribuição de energia real, com 114 barras de média tensão, 5 transformadores de distribuição conectados às suas respectivas unidades consumidoras, totalizando 208 barras. Os resultados obtidos têm demonstrado que o uso da arquitetura descentralizada proposta para monitoramento de SDs, que considera a instalação de módulos eletrônicos no secundário dos transformadores de distribuição com estimadores de estado embarcados, reduz consideravelmente a quantidade de dados que transitam pela rede de comunicação sem perda de precisão, assim como os requisitos computacionais para executar o monitoramento em tempo real de SDs.

Palavras-chave – Sistemas de Distribuição de Energia, Internet das Coisas, Infraestrutura de Medição Avançada, Estimação de Estado, Medidores Eletrônicos.

Abstract

GONZAGA JUNIOR, R. M. **Embedded Platform for Decentralized Monitoring of Distribution Systems Using Internet of Things Concepts**. 2020. Pg. MsC Degree Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

The main objective of this master's thesis is to demonstrate the advantages and feasibility of decentralized monitoring of Distribution Systems (DSs). For this, it proposes: (i) Decentralized architectures for the allocation of electronic processing modules for DS monitoring; (ii) Comparison of these architectures with a centralized strategy for monitoring of DSs; (iii) Development and implementation, in the bench, of an Advanced Measurement Infrastructure (AMI), making use of communication modules that allow the development of wireless networks for sending and receiving messages in real time, using concepts of Internet of Things (IoT) and Edge Computing. This infrastructure enables the simulation of a smart grid, with regard to the information traffic existing between smart meters and distribution operation centers; and (iv) development and implementation of a state estimator by Weighted Least Squares (WLS) in an electronic module (embedded), from the use of electronic development boards equipped with high performance processors, with Linux operating system to enable matrix analysis related to the state estimation process. The studies related to the proposals (i) and (ii) were developed based on the real DS of *Companhia Paranaense de Energia* (COPEL). The electronic developments (proposals (iii) and (iv)) were carried out with the support of the Electronics Laboratory of the Research Group in Bioinformatics, Intelligent Systems and Educational Technology (BISITE) of the *Universidad de Salamanca* in Spain. To validate the estimator and embedded state in electronic modules, a real energy DS was used, with 114 medium voltage bars, 5 distribution transformers connected to their respective consumer units, totaling 208 bars. The results obtained have shown that the use of the decentralized architecture proposed for monitoring DSs, which considers the installation of electronic modules in the secondary of distribution transformers with embedded state estimators, considerably reduces the amount of data that transits through the communication network without loss of precision, as well as the computational requirements to perform real-time monitoring of DSs.

Keywords – Distribution Systems, Smart Meters, Advanced Measurement Infrastructure, State Estimation, Embedded Systems, Internet of Things.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Componentes de um sistema elétrico de potência.....	19
Figura 2.2: Abordagem da penetração de novas tecnologias nas rede de distribuição.	22
Figura 2.3: Projeto de implementação de redes inteligentes na cidade de Jaguariúna – SP.....	24
Figura 2.4: Metodologia de estimação de estado sequencial por WLS (do inglês – Weighted Least Squares) proposta em (SOUSA et al., 2018).....	30
Figura 3.1: Taxa de dados vs alcance da tecnologia.	44
Figura 4.1: Parâmetros de entrada e saída do estimador embarcado.....	50
Figura 4.2: Ilustração da implementação da primeira arquitetura proposta.....	51
Figura 4.3: Sistema de distribuição em larga escala da cidade de Londrina-PR	52
Figura 4.4: Quantidade de dados processados pelo EEE em cada transformador de distribuição no período de um dia.	56
Figura 4.5: Rede teste utilizada para implementação.	58
Figura 4.6: Especificações Técnicas Jetson Nano.....	61
Figura 4.7: Esquemático de desenvolvimento.	63
Figura 5.1: Conexão entre a Raspberry PI e o módulo LoRa Ra-01.	65
Figura 5.2: Conexão física do gateway de processamento.....	66
Figura 5.3: <i>Dashboard</i> desenvolvido na plataforma Things Board.....	67
Figura 5.4: Plataforma completa em funcionamento.....	68
Figura 5.5: Estrutura de funcionamento da rede de comunicação.	69
Figura 5.6: Implementação da arquitetura proposta.....	70
Figura 5.7 Rede de baixa tensão do transformador 1370.	71
Figura 5.8: <i>Dashboard</i> da rede do trafo 1370 parte 1.	74
Figura 5.9: Dashboard da rede do trafo 1370 parte 2.	74
Figura 5.10: <i>Dashboard</i> da rede do trafo 1370 parte 3.	75
Figura 5.11: <i>Dashboard</i> da rede do trafo 1370 parte 4.	75

Lista de Tabelas

Tabela 3.1- Requisitos de comunicação de diferentes tipos de redes.....	37
Tabela 3.2: Dados utilizados pela rede Sigfox (OSMAN; ABBAS, 2018).	39
Tabela 4.1- Quantidade de EEEs e média de UCs por EEE de cada uma das Arquiteturas Descentralizadas Propostas – Com base no SD Real da COPEL.....	53
Tabela 4.2: Custo e tempo computacional para executar a estimação de estados para as arquiteturas definidas.	54
Tabela 4.3: Quantização de dados processados por cada estimador embarcado nas arquiteturas descentralizadas propostas.	56
Tabela 4.4: Quantidade de UCs por transformador.	59
Tabela 5.1: Valores utilizados para a inserção de ruídos.....	73
Tabela 5.2: Comparativo entre os resultados dos EE executados para a rede completa e para rede primária.....	76
Tabela 5.3: Tempo de execução do EE para as redes definidas.	77

Lista de Abreviaturas e Siglas

BT – Baixa Tensão

BPSK – *Binary Phase Shift Keying*

BLE – *Bluetooth Low Energy*

BAN - *Building Area Network*

COD – Centro de Operação dos sistemas de Distribuição

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

CPU – *Central Processing Unit* (Unidade de Processamento Central)

EE – Estimador de Estado

EEE – Estimador de Estado Embarcado

FLOPS - *Floating-Point Operations per Second*

GPRS – *General Packet Radio Service*

GPU – *Grafic Processing Unit* (Unidade de Processamento Gráfico)

GSM – *Global System for Mobile*

HAN – *Home Area Network*

HTTP – *Hypertext Transfer Protocol*

IMA – Infraestrutura de Medição Avançada

IoT- *Internet of Things* (Internet das Coisas)

LPWAN – *Low Power Wide Area Network*

LTE – *Long Term Evolution*

LoRa – *Long Range*

MT – Média Tensão

MQP – Mínimos Quadrados Ponderados

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

M2M – *Machine-to-Machine* (Máquina a Máquina)

NAN - *Neighborhood Area Network*

NB – *Narrow Band*

OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple*

PSO – *Particle Swarm Optimization* (Otimização por Enxame de Partículas)

PMU – *Phasor Measurement Units* (Unidade de Medição Fasorial)

PLC – *Power Line Communication*

QoS – *Quality of Service* (Qualidade de Serviço)

REST – *Representational State Transfer*

RF – Rádio Frequência

RNA – Redes Neurais Artificiais

SD – Sistema de Distribuição

SE – Subestação de Distribuição

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SCADA – *Supervisory Control and Data Acquisition* (Sistema Supervisório de Controle e Aquisição de Dados)

SG – *Smart Grids*

SoC - *System on a Chip*

UNB – *Ultra Narrow Band*

UC – Unidades Consumidoras

WAN – *Wide Area Network*

3Gpp - *3rd Generation Partnership Project*

6LowPAN - *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks*

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Motivação

Diversos fatores relacionados ao conceito de redes inteligentes (do inglês, *Smart Grids*) têm contribuído para aumentar a complexidade da operação dos Sistemas de Distribuição (SDs), tais como: novas arquiteturas de redes elétricas com capacidade de operar autonomamente; penetração de novas fontes de energia renováveis (nas redes de distribuição primária e secundária); o advento dos Veículos Elétricos; armazenamento de energia; etc. Dessa forma, nos últimos anos vem aumentando o interesse pelo desenvolvimento e implantação de ferramentas para monitoramento em tempo real de SDs. Ou seja, de ferramentas que possibilitem a aferição, em tempo real, da condição operacional dos SDs, pois a partir dessa informação ações de controle podem ser tomadas para corrigir falhas e garantir um estado operativo seguro.

A ferramenta fundamental para monitoramento em tempo real de redes elétricas é o Estimador de Estado (EE), que tem a função de determinar, em tempo real, as variáveis de estado da rede (usualmente as tensões complexas nodais), através do processamento de um conjunto redundante de medidas com ruído. Mediante a análise dessas variáveis de estado verifica-se a condição operacional da rede elétrica. Porém, historicamente, a quantidade limitada de medidas existentes nos SDs inviabilizou a implantação de EEs nessas redes. Entretanto, acontecimentos recentes, também relacionados ao conceito de redes inteligentes, vêm propiciando um aumento significativo na quantidade de medidas disponíveis nos SDs, motivando o desenvolvimento e implantação de EEs específicos para esses sistemas. Dentre esses acontecimentos destacam-se a instalação de Medidores Eletrônicos Inteligentes (MEI) na rede secundária e o desenvolvimento das chamadas micro PMUs (do inglês, *Phasor Measurement Units*) (PRIMADIANTO; LU, 2017), que permitem a medição de grandezas fasoriais nos SDs.

O aumento da quantidade de informações disponíveis nos SDs contribui para o desenvolvimento e implantação de EEs nesses sistemas, mas, por outro lado, traz à tona algumas questões que devem ser analisadas no desenvolvimento desses EEs. Isto em razão do aumento da quantidade de dados que passarão a ser transmitidos para os Centros de Operação dos sistemas de Distribuição (CODs) e da dimensão da rede elétrica que terá que ser considerada pelo EE (RAFAEL S. SILVA, FELIPE M. LABURU, 2017). Pois as redes primárias de distribuição já acarretam em redes de larga escala, geralmente compostas por dezenas de milhares de barras, e a adição dos modelos das redes secundárias de distribuição,

onde os MEIs estão sendo instalados, deve elevar essa escala para centenas de milhares de barras. Dessa forma, duas características se sobressaem como necessárias para a estimação de estado em SDs: capacidade de lidar com sistemas de larga escala e desempenho computacional para tratar as peculiaridades das redes de distribuição.

Face ao exposto, devido à dimensão e subdivisão dos SDs em diversos alimentadores, uma alternativa que se apresenta como interessante para a operação dos SDs, é a utilização de uma abordagem multiáreas (M.V.; H.A.; ANANTHAPADMANABHA, 2015). Desde o início do desenvolvimento dos EEs, considerou-se a ideia de operar os sistemas elétricos através de subdivisões em áreas e de maneira descentralizada (VAN CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1983), isto em função de o setor elétrico ser dividido em regiões e possuírem operadores distintos, e também de forma a melhorar a eficiência computacional e confiabilidade dos EEs. Desse modo, ao longo dos anos diversos EEs foram propostos, para sistemas de transmissão, utilizando o conceitos de decomposição em multiáreas e abordagens descentralizadas (GÓMEZ-EXPOSITO et al., 2011).

Com o advento da eletrônica e das redes de telecomunicações, cada vez mais é possível realizar o monitoramento em tempo real de dispositivos conectados à rede de energia. Assim, utilizando conceitos e tecnologias criados para atender demandas oriundas dessas novas aplicações, destacam-se as novas redes de comunicação desenvolvidas para o ecossistema de Internet das Coisas (do inglês – IoT - *Internet of Things*), são elas: Sigfox, Narrow Band IoT, LoRa, entre outras, que permitem a conexão de vários dispositivos com longo alcance e baixo consumo de energia. Da mesma forma, os avanços da capacidade de processamento dos dispositivos eletrônicos embarcados permitem que operações, antes confiadas aos CODs, sejam prontamente executadas de forma independente por módulos embarcados fazendo o uso do conceito de computação na borda (do inglês – *Edge Computing*). As redes inteligentes visam modificar a rede de energia para um poderoso sistema confiável incorporando vários modos de controle e funções automatizadas. A implantação das Infraestruturas de Medição Avançadas (IMA) é um fator chave para o desenvolvimento das redes inteligentes (KHEAKSONG; LEE, 2014). A IMA é uma infraestrutura conectada que inclui MEI, redes de comunicação em diferentes níveis hierárquicos, como sistemas de gerenciamento de dados provenientes dos MEIs, e os próprios CODs das concessionárias para integralizar os dados (ELAKSHUMI; PONRAJ, 2017).

Nesse contexto, aparecem como promissoras as propostas vislumbrando a realização da estimação de estado descentralizada em SDs, diferentemente dos EEs convencionais centralizados usualmente proposto para essas redes elétricas.

1.2. Proposição

Devido às incessantes atualizações tecnológicas ocorridas nos últimos tempos, sejam no campo das telecomunicações ou da eletrônica, esta dissertação de mestrado visa demonstrar as vantagens e viabilidade do monitoramento descentralizado de SDs. Importa recordar, mais uma vez, que tradicionalmente os CODs fazem uso de estratégias centralizadas para monitoramento de SDs.

Para atingir o objetivo em mira, propõe-se:

1. Arquiteturas descentralizadas para alocação de módulos eletrônicos de processamento para monitoramento de SDs, cada um deles contando com um estimador de estado (embarcado) por mínimos quadrados ponderados;
2. Comparação das arquiteturas descentralizadas propostas com uma estratégia centralizada para monitoramento de SDs;
3. Desenvolvimento e implantação, em bancada, de uma IMA, fazendo uso de módulos de comunicação que permitem o desenvolvimento de redes wireless para o envio e recebimento de mensagens em tempo real, utilizando conceitos de Internet das Coisas e *Edge Computing*. Essa infraestrutura deverá possibilitar a simulação de uma rede inteligente de energia, no que se refere ao tráfego de informações existente entre os MEIs e os CODs;
4. Desenvolvimento e implantação de um estimador de estado por mínimos quadrados ponderados em um módulo eletrônico (embarcado), a partir da utilização de placas de desenvolvimento eletrônico dotadas de processadores de alta performance, com sistema operacional Linux para possibilitar análises matriciais referentes ao processo de estimação de estado.

Para desenvolvimento das propostas (i) e (ii) será utilizado como referência um SD real da COPEL. Importa destacar que os desenvolvimentos eletrônicos (propostas (iii) e (iv)) foram realizados com apoio do Laboratório de Eletrônica do *Grupo de Investigación en Bioinformática, Sistemas Informáticos Inteligentes y Tecnología Educativa (BISITE)* da *Universidad de Salamanca* na Espanha¹. Para validação do EE embarcado em cada módulo eletrônico, utilizar-se-á um sistema de distribuição de energia real, com 114 barras de média tensão, 5 transformadores de distribuição conectados às suas respectivas unidades consumidoras, totalizando 208 barras.

¹ Convênio de Mobilidade Internacional firmado entre a Universidade de São Paulo e a *Universidad de Salamanca* para alunos e docentes dos programas de pós-graduação.

Vale ressaltar que este trabalho não tem como objetivo o estudo de EEs descentralizados, como apresentado nos trabalhos de (M.V.; H.A.; ANANTHAPADMANABHA, 2015) e (VAN CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA, 1983). Destaca-se que esse estudo está sendo realizado em uma pesquisa de doutorado em desenvolvimento no Laboratório de Análises Computacionais em Sistemas Elétricos de Potência, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (LACOSEP EESC/USP), grupo de pesquisa em que este trabalho de mestrado foi realizado. Destaca-se também que para este trabalho não foi realizada a análise econômica de implementação dos módulos em um sistema real, devido ao curto prazo para o desenvolvimento do trabalho proposto.

Os resultados obtidos de simulações computacionais e da utilização da plataforma desenvolvida têm demonstrado as vantagens e viabilidade de arquiteturas descentralizadas para monitoramento de SDs, em especial, da arquitetura considerando a instalação de módulos eletrônicos no secundário dos transformares de distribuição, com estimadores de estado embarcados. Isto em razão de essa arquitetura ter possibilitado uma redução considerável da quantidade de dados que transitam pela rede de comunicação, assim como os requisitos computacionais para executar o monitoramento em tempo real de SDs.

1.3. Estrutura do Trabalho

Este documento encontra-se dividido em 6 capítulos, onde a introdução corresponde ao primeiro. Todos possuem Introdução e Considerações Finais para manter a coesão entre as ideias apresentadas em cada capítulo.

O capítulo 2, intitulado “Monitoramento em tempo real de SDs”, traz a definição do processo de estimação de estado em SDs e apresenta uma revisão bibliográfica, destacando diversos trabalhos relevantes apresentados na literatura especializada.

No capítulo 3 apresentam-se tecnologias de comunicação sem fio utilizadas em aplicações para redes inteligentes, assim como protocolos de comunicação empregados em projetos de Internet das Coisas.

No capítulo 4 encontra-se o estudo sobre a quantidade de dados que passarão a ser trocados entre o COD e os MEIs, com base em uma rede real de distribuição de energia situada na cidade de Londrina- PR, pertencente a Companhia Paranaense de Energia (COPEL). Em seguida, é apresentada a metodologia de implementação da plataforma embarcada desenvolvida.

No capítulo 5 apresentam-se os testes e análises dos resultados obtidos a partir da metodologia proposta.

As considerações finais deste trabalho de dissertação de mestrado, bem como as perspectivas futuras, são apresentadas no capítulo 6.

Capítulo 2 - Monitoramento em Tempo Real de Sistemas de Distribuição

2.1. Introdução

Nos últimos anos, os SDs foram afetados por muitas mudanças significativas. Entre elas as novas regulamentarizações do mercado de energia, que permitem e auxiliam o aumento da penetração de geração distribuída, principalmente fontes renováveis de energia, e novos recursos energéticos distribuídos, como veículos elétricos, que transformaram a rede passiva em uma rede ativa altamente complexa. Em função desses aspectos, bem como dos requisitos sempre mais rigorosos para qualidade de energia e confiabilidade do sistema, faz-se necessário um melhor gerenciamento e controle efetivo da rede. Para atender a essa necessidade, uma nova filosofia para rede de distribuição foi criada, conhecida como redes inteligentes (DELLA GIUSTINA et al., 2014).

Com o avanço das tecnologias de medição e de comunicação de dados, cada vez mais é possível se ter dispositivos telecomandados onde seja factível a repartição da rede de energia em pequenas redes independentes dentro do SD, sendo essas pequenas redes chamadas de micro-redes.

Tais micro-redes estarão a maior parte do tempo operando sincronizadas com a rede elétrica ao redor, mas também serão capazes de se separar durante os períodos de contingência devido à tempestades ou perturbações temporárias, como falhas da rede local (JOOS et al., 2017). Porém, ainda com esses avanços as iniciativas para implementação e utilização de redes equipadas com dispositivos que permitam tal operação, tem pouca aderência ao mercado de energia elétrica nacional.

A operação em tempo real é de fundamental importância para automatização dos SDs. A estipulação da condição operacional dos alimentadores de distribuição de energia elétrica com precisão aceitável é o primeiro passo para o desenvolvimento de inúmeras funções automatizadas, como, por exemplo, o restabelecimento de energia das redes de distribuição após a ocorrência de faltas permanentes.

A gestão e operação de redes de baixa tensão (BT) podem ser bastante desafiadoras, considerando sua extensão e o número de ativos a serem controlados, quando comparados a níveis de tensão mais altos. Além disso, algumas dessas redes podem ter várias décadas de tempo de vida e, portanto, os recursos de monitoramento na rede de BT são tipicamente reduzidos (CAMPOS et al., 2017).

Conforme já mencionado neste texto, para realizar a operação em tempo real de redes elétricas o primeiro passo é a determinação do estado operativo corrente. Para isso, o estimador de estado desempenha um papel fundamental, pois através do estimador as medidas obtidas em tempo real (que estão sujeitas à ruídos inerentes do processo de tele medição) são processadas para obtenção das variáveis de estado (usualmente tensões complexas nodais), através das quais determina-se o estado de operação.

No entanto, diversos fatores característicos de redes de distribuição não contribuem de forma positiva para a estimação de estado em SDs, são eles (DELLA GIUSTINA et al., 2014):

- Usualmente os SDs são compostos por alimentadores radiais, com ramais que podem ser monofásicos, bifásicos (cargas residenciais) ou trifásicos (cargas comerciais e industriais);
- Os SDs são compostos por redes não-transpostas, desbalanceadas por natureza (em virtude da impossibilidade de distribuir uniformemente as cargas nos alimentadores) e com alta relação resistência/reatância;
- São diversas as possibilidades de conexão dos transformadores e das cargas dos SDs;
- A dimensão do problema é elevada, pois, mesmo para uma cidade de pequeno porte (de até 50 mil habitantes), o SD pode conter milhares de barras bifásicas e trifásicas;
- A maioria dos alimentadores possuem medidas de magnitude de corrente ao invés de medidas de potência, que representam um problema para utilização de estimadores convencionais (problemas de ordem numérica);
- Normalmente os status de dispositivos seccionadores e de banco de capacitores, bem como a posição de *taps* de transformadores, não são monitorados de forma direta;
- Reduzido número de medidas, em relação aos sistemas de transmissão. Dessa forma, para possibilitar a execução de EEs em SDs torna-se necessário a utilização de pseudo-medidas de carga, obtidas usualmente a partir dos chamados estimadores de demanda (AUGUSTO et al., 2018).

Nas próximas seções deste capítulo serão abordados temas sobre as redes de distribuição, equipamentos que fazem parte de um SD e as atualizações tecnológicas que vem adentrando os sistemas primários e secundários de distribuição de energia. Da mesma maneira, tem como objetivo apresentar o desenvolvimento tecnológico a respeito de

estimação de estado em SDs, assim como a revisão bibliográfica desta linha de pesquisa. Com isto revela-se a importância do monitoramento em tempo real dos SDs e da necessidade de métodos de análises específicos para as informações provenientes das redes de distribuição de energia.

2.2. Sistemas de Distribuição

2.2.1. Rede de Distribuição Primária

O SD normalmente começa com a subestação de distribuição (SE) que é alimentada por uma ou mais linhas de sub transmissão. Em alguns casos, a SE é alimentada diretamente a partir de uma linha de transmissão de alta tensão, caso em que, muito provavelmente, não há um sistema de sub transmissão. No entanto, isso varia de empresa para empresa. Cada SE servirá um ou mais alimentadores primários. Com raras exceções, os alimentadores são radiais, o que significa que existe apenas um caminho para a energia fluir da SE para o usuário (KERSTING, 2011).

Os níveis de tensão geralmente utilizados na rede de distribuição primária variam de 11 a 23 kV, dependendo da localidade e das empresas responsáveis pela operação do SD, sendo a tensão de distribuição em 13.8 kV a mais utilizada no Brasil. Os principais componentes e etapas que a energia elétrica percorre em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) podem ser observados na Figura 2.1.

Figura 2.1: Componentes de um sistema elétrico de potência.

Fonte : Adaptado de (KERSTING, 2011).

Os SDs, sejam eles aéreos ou subterrâneos, são configurados para operar de maneira radial em sua enorme maioria, de forma a favorecer fatores inerentes à proteção, tendo como exemplo: coordenação e atenuação de correntes de curto-circuito pretendendo diminuir custos com equipamentos. Via de regra, esses sistemas apresentam possibilidades de alteração da topologia, através de controle de abertura e fechamento das chaves

seccionadoras presentes em pontos de interconexões (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000).

2.2.2. Rede de Distribuição Secundária

A rede de distribuição secundária tem seu ponto de início a partir dos transformadores de distribuição. Tais equipamentos fazem a conexão da rede de distribuição primária com a rede de distribuição secundária. O nível de tensão proveniente dos alimentadores de Média Tensão (MT), ou do sistema (ou rede) de distribuição primária, passa por uma regulação nos transformadores de distribuição e a partir de então se tornam adequados para os sistemas (ou redes) de distribuição secundários, ou também conhecidos como BT. No Brasil geralmente os circuitos secundários operam com tensões de 220/127V ou 380/220V. Assim como as redes primárias, as redes secundárias também podem ser aéreas ou subterrâneas, predominando no Brasil as redes aéreas, com topologias de redes radiais ou em malha (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

Como exposto anteriormente, as redes de distribuição acarretam sistemas de grande ordem e com relevante complexidade na sua operação, necessitando dessa forma de equipamentos que permitam o funcionamento do SD de forma contínua e segura. Além disso, são de fundamental importância, para a operação de um SD, informações sobre o estado operativo corrente da rede de distribuição, sendo este obtido através dos medidores de grandezas elétricas instalados ao longo do SD.

2.2.3. Equipamentos em SDs

Os principais equipamentos para compor uma rede de distribuição, seja ela primária ou secundária, quando se trata de uma análise estática, seja pelo fluxo de potência ou mesmo no contexto de estimação de estado de monitoramento em tempo real, são:

(i) **Transformadores de Distribuição:** tem a função de conectar a MT com a BT;

(ii) **Ramal de Ligação:** trata-se do conjunto de condutores que ligam a rede de distribuição secundária até as unidades consumidoras (UCs). Os cabos dos alimentadores secundários geralmente possuem bitolas maiores, pois devem suportar correntes altas;

(iii) **Medidores de Energia:** geralmente são instalados dentro das caixas de medição e tem como principal função medir e registrar o consumo de energia elétrica ativa ou reativa do consumidor em questão;

(iv) **Chaves Seccionadoras ou Chaves Faca:** são dispositivos que fazem parte do SD, e que tem como principal objetivo propiciar manobras na rede, para eventuais

manutenções, reformas, ou falhas em geral. Geralmente estas manobras se dão através do fechamento ou abertura de um componente similar a uma barra metálica;

(v) **Chaves Fusíveis:** são dispositivos que procuram proteger o alimentador secundário, isolando eletricamente e automaticamente a parte da rede faltosa do sistema no menor tempo possível. Seu princípio de funcionamento é baseado na temperatura, através do sobreaquecimento de um elo condutor fusível quando o limite é atingido;

(vi) **Unidades Consumidoras:** são também chamados de clientes. É o destino final da energia elétrica, ou seja, é caracterizado pela entrega de energia elétrica em um ponto com o equipamento de medição individualizado.

As novas redes de distribuição de energia se apresentam desafiadoras nos quesitos de monitoramento e gestão das novas tecnologias como os MEIs, geração distribuída, veículos elétricos, armazenadores de energia, entre outras. Desse modo, as novas funcionalidades oriundas destas tecnologias, que vem adentrando rapidamente o panorama das distribuidoras no Brasil e no mundo, aumentam a complexidade do gerenciamento e operação de um SD. A Figura 2.2 traz uma abordagem onde estas novas tecnologias estão presentes nas redes secundárias.

Figura 2.2: Abordagem da penetração de novas tecnologias nas rede de distribuição.

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3. Redes Inteligentes de Energia

Uma rede inteligente de energia envolve aplicativos baseados em informações disponibilizadas pelo aumento da automação e da infra-estrutura de comunicação. Entre os componentes presentes nas futuras redes de energia estão MEIs, dispositivos de armazenamento de energia e aparelhos inteligentes e infra-estrutura de software tais como padrões de interoperabilidade e protocolos de segurança cibernética. As motivações para o desenvolvimento dessas aplicações são a resiliência da rede, o desempenho e as eficiências operacionais geradas com a automatização dos SDs (LEFEBVRE; PREVOST; LENOIR, 2014).

As redes inteligentes visam modificar a rede de energia para um poderoso sistema confiável incorporando vários modos de controle e funções automatizadas. A implantação das AMIs é um fator chave para o desenvolvimento das redes inteligentes (KHEAKSONG; LEE, 2014). A IMA é uma infraestrutura conectada que inclui MEIs, redes de comunicação em diferentes níveis hierárquicos, como sistemas de gerenciamento de dados provenientes dos MEIs, e os próprios CODs das concessionárias para integralizar os dados (ELAKSHUMI; PONRAJ, 2017).

Os MEIs são usados para registrar o consumo de energia e outras informações relacionadas, como indicadores de qualidade de energia. Os medidores enviam mensagens a montante em resposta a solicitações. Também pode receber sinais de preços ou mesmo algum nível de controle pode ser incorporado aos MEIs. Além disso, eles podem também estabelecer um caminho de comunicação com os medidores mais próximos (SHIOBARA; PALENSKY; NISHI, 2015).

2.3.1. Projetos Piloto

A Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) com sede na cidade de Campinas – SP, pretende transformar a rede distribuição da cidade de Jaguariúna – SP em uma rede inteligente, substituindo a tradicional leitura manual de consumo de energia por um sistema eletrônico, conectado e mais inteligente. Dessa forma os clientes, residenciais, rurais e comerciais de pequeno porte, receberão os novos MEIs. Essa tecnologia permite detectar falhas, armazenar energia, acionar mecanismos para evitar interrupções e, ainda, a gestão do consumo de energia. Segundo a CPFL, a digitalização das redes elétricas é o futuro do setor e modernizar cada vez mais as redes de energia, traz uma grande melhora na eficiência operacional e na qualidade do serviço (ENERGIA, 2017).

O projeto visa a instalação de mais de 20 mil MEIs na rede de distribuição de BT da cidade de Jaguariúna –SP. Com um investimento de R\$ 26 milhões, serão testados MEIs com diferentes tecnologias de comunicação, afim de averiguar o melhor comportamento de cada tecnologia (CPFL ENERGIA, 2019). A Figura 2.3 apresenta mais detalhes sobre o projeto da CPFL.

Figura 2.3: Projeto de implementação de redes inteligentes na cidade de Jaguariúna –SP.

11

Fonte: Retirado de (CPFL ENERGIA, 2019) .

Outra companhia de energia a investir em projetos de cidades inteligentes é a LIGHT Serviços de Eletricidade S.A na cidade do Rio de Janeiro – RJ. O projeto busca a criação de uma IMA para mais de 400 mil UCs, 100 SEs e 2200 alimentadores na cidade. O plano visa automatizar cortes e religamentos, câmaras de transformadores e além da troca da leitura de consumo, antes realizada de forma manual, para um sistema com MEIs, onde a medição é realizada de forma eletrônica enviando os dados via redes de comunicação. As tecnologias de transferência de dados, por Rádio Frequência (RF), *General Packet Radio Service* (GPRS) e *Power Line Communication* (PLC), tecnologias essas que serão discutidas no Capítulo 3 deste trabalho. Em um plano de 5 anos, o projeto visa a expansão da IMA criada para atender mais de 1.4 milhão de UCs (CRUZ, 2017).

Diversas outras concessionárias de energia elétrica no Brasil e no mundo, investem em projetos relacionados a redes inteligentes de energia. Trazendo dessa forma, atualizações tecnológicas para as antigas redes de distribuição de energia, fazendo uso de sistemas eletrônicos para medição de energia, e de novas tecnologias de comunicação para o envio de informações.

2.4. Estimação de Estado

Na formulação tradicional do processo de estimação de estado em sistemas elétricos de potência (SEP), as tensões complexas nodais são tomadas como as variáveis de estado do sistema, pois, através das mesmas é possível determinar o estado operativo corrente de

um SEP (ABUR; EXPÓSITO, 2004). Tal formulação se baseia nas relações entre as medidas analógicas e as variáveis de estado expressas através de funções não lineares.

O problema de estimação de estado para um sistema com m medidas e n variáveis de estado é formulado usando o seguinte modelo de medição (PRIMADIANTO; LU, 2017):

$$z = h(x) + e \quad (2.1)$$

Onde “ z ” é o vetor de medição ($m \times 1$); “ x ” é o vetor de variáveis de estado ($n \times 1$); “ $h(x)$ ” é o ($m \times 1$) conjunto de equações não lineares que relaciona as medições com as variáveis de estado; e “ e ” é o vetor de ruído de medição ($m \times 1$) tipicamente assumido como variáveis aleatórias independentes normalmente distribuídas, com média zero e matriz de covariância conhecida. Tipicamente, o vetor de estado x de um SEP é composto pela magnitude de tensão e ângulo de fase em todos nós da rede elétrica. O modelo de medição $h(x)$ é composto por medições de potência ativa e reativa (fluxo e injeções) e medidas de magnitude de tensão, e a relação com as variáveis de estado é obtida através de equações de fluxo de potência (PRIMADIANTO; LU, 2017).

Diversos métodos foram desenvolvidos para melhorar o processo de estimação de estado em SDs, desde o método clássico de Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) até métodos específicos para SDs, como o estimador de estado Branch-Current (PRIMADIANTO; LU, 2017). Através da abordagem por MQP convencional, o objetivo é encontrar o vetor n que minimiza o índice $J(x)$, definido da seguinte maneira:

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)], \quad (2.2)$$

Onde o vetor de estado x , é estimado formando recursivamente a matriz Jacobiana $H(x) = \partial h(x) / \partial x$, e resolvendo as equações normais:

$$G(x) \Delta x = H^T(x) \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x)], \quad (2.3)$$

Com $G(x) = H^T(x) \cdot R^{-1} \cdot H(x)$, sendo a matriz de ganho do sistema.

O algoritmo acoplado de um EE MQP é formulado da seguinte maneira (SCHWEPPE; WILDES, 1970).

- i) Fazer $v = 0$ e escolher uma solução inicial $x^v = x^0$;
- ii) Calcular $G(x)$ no ponto $x = x^v$;
- iii) Obter a correção nas variáveis de estado:

$$\begin{cases} \Delta x^v = [G(x^v)]^{-1} \cdot H^T(x^v) \cdot W^{-1} \cdot [z - h(x^v)] \\ x^{v+1} = x^v + \Delta x^v \end{cases} \quad (2.4)$$

iv) Testar a convergência: se $|\Delta x_i^v|_{Max} \leq \varepsilon$, sendo ε a tolerância pré-especificada, o processo convergiu e $\hat{x} = x^{k+1}$. Caso contrário, faça $v = v + 1$ e volta ao passo (ii).

A seguir são apresentados alguns dos principais EEs desenvolvidos para monitoramento em tempo real de SDs. São apresentados também desenvolvimentos recentes no contexto de redes inteligentes e uso de novas tecnologias no apoio ao gerenciamento dos dados oriundos da rede de distribuição. Espera-se assim contextualizar o problema de estimação de estado em SDs assim como apresentar as diferentes estratégias adotadas para viabilizar a implementação de EEs nas novas redes de distribuição.

2.5. Revisão Bibliográfica

Como exposto anteriormente, o monitoramento em tempo real de SDs tem características específicas necessitando de um tratamento apropriado para que se possa garantir a confiabilidade e a precisão das abordagens já consagradas em sistemas de transmissão. Nesta seção são apresentados alguns dos principais EEs desenvolvidos para monitoramento em tempo real de SDs, destacando as estratégias utilizadas para estimação de estado em SDs radiais.

Em (BARAN; KELLEY, 1995) é apresentado um estimador por MQP trifásico para SDs radiais, ou pouco malhados, que considera as correntes nos ramos como variáveis de estado, ao invés das tensões nodais. De acordo com os autores, dentre as vantagens desta abordagem, o processo de estimação pode ser desacoplado entre as fases e não apresenta problemas de condicionamento numérico (BARAN; MCDERMOTT, 2009). Este EE exige a conversão de medidas de potência ativa e reativa e das pseudo-medidas em medidas equivalentes de corrente na forma retangular. As medidas de amplitude de corrente são também decompostas em parte real e imaginária, a partir de uma estimativa do ângulo de fator de potência. Nesta versão inicial deste estimador não foram consideradas medidas de magnitude de tensão. Utiliza-se, ainda, uma regra para reduzir o tamanho do alimentador, para melhorar a eficiência computacional do algoritmo. Para isso, os ramais são reduzidos concentrando suas cargas no tronco do alimentador. Tal procedimento não é adequado quando se deseja estimar a carga de transformadores de distribuição, ou de consumidores da rede primária conectados nesses ramais. As tensões nodais são então atualizadas através de uma execução de varredura direta no alimentador a partir da tensão medida na subestação com as correntes estimadas. O critério de convergência é dado pela diferença da atualização

do valor das correntes entre duas iterações sucessivas. Caso não haja convergência, as medidas de corrente equivalentes são novamente calculadas, com os novos valores de tensão nodais, e o processo é executado novamente. Em (LIN; TENG; CHEN, 2001) foram propostas melhorias na formulação deste EE para obter melhor performance numérica e computacional.

O monitoramento em tempo real de SDs com EEs utilizando Redes Neurais Artificiais (RNA) foi proposto em (BERNIERI et al., 1996). Nesta abordagem, a RNA é utilizada para estimar tanto as tensões nodais como as demandas de potência de transformadores de distribuição (injeções de potência ativa e reativa nas barras) a partir de um número pequeno de medidas em tempo real. Os autores apresentam resultados com precisão similar às metodologias tradicionais baseada no estimador por MQP, com erros na estimação relacionados principalmente com a incerteza das pseudo-medidas. Os autores também reconhecem o custo computacional oneroso do treinamento das redes neurais, mas afirmam que após o treinamento a rede neural apresenta desempenho computacional suficiente para aplicações *on-line*.

Na abordagem proposta por (BARAN, 2012), o método *Branch-Current* apresentado anteriormente em (BARAN; KELLEY, 1995), baseado no MQP, é utilizado para realizar a estimação de estado em tempo real em um SD de 34 barras. Além da utilização das recentes IMAs desenvolvidas para os novos SDs, o autor faz uso de dados históricos como pseudo-medidas para ilustrar o efeito dos dados adicionais oriundos da IMA no processo de estimação de estado, considerando dois casos bases. No primeiro, a medição em tempo real é disponível apenas na SE e as cargas são representadas por pseudo-medidas com precisão de 30%. Já no segundo caso existem medições em tempo real no alimentador bem como medições de carga através da IMA.

A pesquisa realizada por (RAMESH et al., 2012) propõe a alocação de MEIs e um EE híbrido para alcançar uma operação confiável e o controle do sistema de gerenciamento de distribuição de energia. O algoritmo para posicionamento dos MEIs é formulado usando Otimização de Enxame de Partículas (PSO – do inglês *Particle Swarm Optimization*) e o algoritmo para a estimativa de tensão nas barras é formulado usando metodologias de RNA. Os algoritmos formulados são verificados com sistemas testes do IEEE e do Conselho de Eletricidade de Tamil Nadu (TNEB – do inglês *Tamil Nadu Electricity Board*).

Em (HAUGHTON et al., 2013) é apresentado um algoritmo de estimação de estado trifásico linearizado para aplicação em SDs inteligentes. Casos trifásicos desequilibrados e equilibrados são apresentados na abordagem em que são incorporados, aos dados tradicionais, informações provenientes de medidores fasoriais sincronizados. Para isso é utilizado o conhecido MQP em um EE estático para sistemas lineares e não iterativos. Com a

utilização do método e de medidas fasoriais sincronizadas para aumentar a precisão, são alcançadas melhorias nas estimativas de magnitude e ângulo das tensões, e da mesma forma também reduz o erro da magnitude de corrente calculada em aproximadamente 10%.

O trabalho de (SHEN; LIANG, 2013) propõe um modelo de estimação de estado considerando gerações fotovoltaicas medidas e não monitoradas com base em algoritmos melhorados dos métodos de *Branch-Current* e *Branch-Power*. Para validação são utilizados exemplos numéricos na análise do impacto da localização e penetração da GD em uma rede de distribuição de 69 barras. Três abordagens são propostas para avaliar o impacto gerado, na primeira adicionam-se conjuntos de painéis fotovoltaicos com capacidade de 800 kW e com medição, para todos os nós, exceto o nó raiz (no da subestação). Na segunda é averiguado em qual nó da abordagem anterior exibe menor erro, e então é modificado o valor da potência injetada neste nó e analisada a relação entre o erro e capacidade de penetração dada pela equação:

$$k = \frac{P_{pv}}{P_l}, \quad (2.5)$$

Onde, P_{pv} é a saída de potência ativa dos painéis fotovoltaicos, P_l é a carga total do SD, e k o índice de penetração. Já na terceira abordagem é adicionada a potência gerada pelos painéis fotovoltaicos, não monitorada, de 120 kW somente na barra 50. Os autores concluíram que a inserção de energia fotovoltaica na rede de distribuição, longe da subestação, tem pouco efeito sobre a estimativa de estado. Já os nós mais carregados têm forte capacidade de aceitação de painéis fotovoltaicos e influenciam mais na estimativa de estado do que os nós menos carregados.

Os autores de (CHEN et al., 2014) consideraram o uso de dados dos MEIs para estimação de estado em SDs, coletados uma vez por dia. A eficácia dessa estratégia foi então comparada com uma segunda estratégia baseada na coleta de dados a cada 30 minutos. Primeiramente foi avaliada a adequação do uso dos dados para previsão de carga em transformadores e, em seguida, utiliza essa previsão como pseudo-medidas para o EE. As saídas do EE indicam o estado em tempo real de todo o sistema que pode ser usado para tomar decisões eficazes para controle e otimização do SD. Os resultados apresentados mostram que a aquisição de dados a cada 30 minutos melhoram significativamente a previsão de carga. No entanto, os resultados do EE mostram que nem a estratégia de coleta é suficiente para estimar o estado de um sistema com precisão, exigindo assim medições adicionais em tempo real.

O trabalho de (YUEHAO et al., 2016) apresenta um método de estimação de estado para rede de distribuição com base nos dados oriundos dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Os dados são tratados para complementar as medidas SCADA (do inglês – *Supervisory Control and Data Acquisition*) com intuito de atingir a observabilidade² do sistema e aumentar a precisão do processo de estimação de estado. Tal método utiliza dados de monitoramento de cargas existentes, como tensão, corrente, potência ativa e reativa dos transformadores no lado da rede secundária, para adquirir informações de alimentadores especificados e informações de cada barra por meio do EE baseado em MQP. Os autores estabelecem um modelo de estimativa de MQP com restrição de igualdade, considerando a equação de injeção de corrente assimétrica, equação de medição virtual de ponto neutro, equação de amplitude de tensão de fase do nó e equação de restrição de igualdade de injeção zero do nó terra e no neutro, que baseia-se no modelo de fluxo de potência de distribuição.

A pesquisa realizada por (WAERESCH et al., 2017) propõe um conceito de EE para rede secundária baseado em dados oriundos de MEIs instalados ao longo do SD. O algoritmo de um EE por MQP é utilizado, de modo que o SD não é propenso a problemas de convergência. As medidas processadas são magnitudes de tensão e corrente, bem como potências ativa e reativa. O processo de detecção de erros grosseiros baseia-se na análise dos resíduos normalizados. Para garantir que as topologias da rede também sejam atualizadas corretamente em redes em malha, um novo algoritmo para detecção de falhas de topologia também é proposto no trabalho. Os resultados apresentados são obtidos a partir de simulações. Os resultados de testes em campo são promissores, apresentando precisões adequadas e probabilidades de detecção de dados ruins, especialmente para magnitude de tensão e de corrente.

Em (RADHOUSH; LIN, 2018) são empregados dois métodos disseminados de compressão de dados, a decomposição do valor singular e o algoritmo de análise de componentes principais. Estes métodos são utilizados para compactar os dados da rede de distribuição antes de enviá-los aos CODs, possibilitando que tais dados sejam descompactados nos CODs com a mínima perda possível. Dessa forma, estes dados serão utilizados no processo de estimação de estado para avaliação do desempenho da rede de distribuição considerando também a inserção de geração distribuída.

O trabalho de (ROSENBERG; BHATTACHARYA, 2018) apresenta um EE para SDs radiais baseado em um conjunto de filtros de Kalman, onde a estimativa no tempo (t) depende das estimativas ($t-1$). Esse modelo, ao contrário do MQP tradicional, não incorpora as

² A observabilidade consiste em verificar se é possível estimar todas as variáveis de estado do SEP através do conjunto de medidas disponíveis.

equações do fluxo de potência para o estimador, tornando-se uma técnica versátil. Em vez disso, o EE depende de um solucionador de fluxo de potência externo. Dessa forma, os autores buscam superar os desafios relacionados à estimação de estado filtrada utilizando filtros de Kalman em cascata, para verificar se abordagem é vantajosa e traz benefícios ao processo de estimação de estado.

O estudo realizado em (SOUSA et al., 2018) expõe uma metodologia para estimação de estado em SDs baseada em um estimador sequencial MQP. Estimações sucessivas são realizadas substituindo as medições com menor precisão, em função da hierarquia dos erros dos respectivos equipamentos, por valores previamente estimados. Para validação é utilizado um modelo monofásico não linear para rede de distribuição e um sistema teste da literatura para avaliação de eficiência computacional de metodologias para o mesmo fim. As medidas classificadas como de baixa qualidade são aquelas que introduzem um erro maior que 15 % nos valores de referência das medidas. Devido ao método MQP requerer baixo custo computacional, cerca de 0,15 s por iteração, permite que os requisitos de operação em quase tempo real sejam atingidos mesmo com a aplicação de um modelo sequencial iterativo. A Figura 2.4 exibe o fluxograma da metodologia proposta.

Figura 2.4: Metodologia de estimação de estado sequencial por WLS (do inglês – Weighted Least Squares) proposta em (SOUSA et al., 2018).

Fonte: Retirado de (SOUSA et al., 2018).

O trabalho de (SILVA et al., 2018) concentra-se na análise do impacto das medições remotas na estimação de estado em SDs utilizando diferentes configurações e arranjos de MEIs ao longo de uma rede de distribuição, utilizando um EE tradicional por MQP e um índice de aumento na precisão da estimativa, que avalia a qualidade da estimação. O software DlgSILENT PowerFactory, que tem suas aplicações voltadas para geração, transmissão, distribuição e sistemas que contenham GD, é empregado para avaliar o impacto das medidas remotas na estimação de estado. Os autores concluem que o arranjo e a quantidade de MEIs instalados no SD analisado interferem na precisão do processo de estimação de estado. Isto, devido a altos desvios nas medições, distância dos centros de carga ou proximidades de grandes cargas com medidas com erros grosseiros, medidores mal alocados, baixo número de informações disponíveis na rede, erro de precisão dos próprios medidores, entre outros.

Devido aos estimadores tradicionais desenvolvidos para SDs possuírem limitações no tratamento redes com tamanhos elevados, e ao fato de cada parte do SD apresentar medidas com taxas de amostragem distintas, diversos pesquisadores propõem metodologias a fim de tratar tais déficits. Nesse contexto, destaca-se os estimadores descentralizados desenvolvidos para utilização em SDs de larga escala. Já para tratar medidas com taxas de amostragem diferentes, como medidas PMU (do inglês - *Phasor Measurement Units*), SCADA e, agora com o avanço das redes inteligentes de energia, oriundas dos MEIs, são propostos alguns estimadores híbridos. A seguir serão apresentados alguns trabalhos que propõem o tratamento de medidas com taxas de amostragens distintas e também estimadores descentralizados.

Em (SANTOS; ORILLAZA, 2018) é proposto um EE híbrido também baseado em MQP que utiliza medidas provenientes dos sistema SCADA e medidas oriundas de micro PMUs. Um EE Simultâneo Híbrido é uma configuração capaz de processar tantos dados do sistema SCADA quanto das micro PMUs, processando ambas as medições e modificando internamente o estimador existente para utilizar medições de micro PMUs. Entretanto esse método não produz resultados satisfatórios na presença de erros grosseiros³, particularmente quando encontrados em medidas fasoriais. Simulações são realizadas em um sistema teste de 37 barras e os resultados mostram que a inclusão de dados fasoriais em 20 % das barras da rede apresentam melhora na precisão e na variância da estimativa obtida, provando também ser um EE mais robusto quanto comparado ao EE MQP tradicional. Destaca-se, ainda, que nesse trabalho não foi considerado o fato de as medidas SCADA e de micro PMUs terem tempos de varredura distintos.

³ Uma medida é portadora de erro grosseiro se desvia de seu valor verdadeiro de 3 vezes o valor de seu desvio padrão (ABUR; EXPÓSITO, 2004).

Os autores de (GHOLAMI et al., 2018) estenderam o algoritmo do EE MQP baseado em tensão nodal tradicionalmente utilizado para a inclusão de medidas de PMUs para obter, assim como em (SANTOS; ORILLAZA, 2018), estimativas mais precisas nos SDs. Uma rede de distribuição do Reino Unido foi simulada no software OpenDSS e seus resultados do fluxo de potência alimentam o software MATLAB. Neste trabalho, a parte real e a imaginária das tensões nodais foram selecionadas como variáveis de estados, produzindo assim equações de medição linearizadas e isto pode ser traduzido para uma menor complexidade do processo de estimação em SDs quando utilizadas apenas medidas fasoriais sincronizadas. A metodologia proposta mostrou que as tensões nodais foram estimadas com precisão, além disso foi realizada uma comparação entre o método estendido e o método tradicionalmente utilizado em projetos de estimação de estado.

Em (FARAJOLLAHI; SHAHSAVARI; MOHSENIAN-RAD, 2018) é proposto um novo método de estimação de estado monitorando a configuração da rede, para se unir aos métodos já conhecidos de estimação em SDs, de modo que, faz uso das tensões nodais e de medidas fasoriais sincronizadas para atualizar os estados do sistema após a mudança de status de um elemento do sistema sem a necessidade de reexecutar o EE. As trocas na configuração do sistema podem ser detectadas pelos fasores de tensão e corrente fornecidos por micro PMUs conectadas aos SDs. A essência da proposta baseia-se na análise do circuito equivalente de um SD, fazendo uso de teoremas de compressão de circuitos. Os eventos do SD são definidos como qualquer alteração nos parâmetros do sistema que não interrompa o funcionamento normal do sistema, tal como uma mudança de carga em determinado local. Tais eventos são detectados pelo monitoramento de medições de tensão e corrente oriundas do micro PMUs. Os estudos de casos realizados no trabalho confirmam que o método proposto pode atualizar o status da rede com precisão no sistema utilizado. A eficácia do método é examinada também sobre as incertezas dos parâmetros do sistema e também para um intervalo razoável de erros na admitância de linhas e precisão da medição.

Em (UDUPA et al., 2016) é apresentado um modelo de estimativas de estado em sistemas de energia elétrica chamada técnica de divisão vertical de estimação de estado. Nesta técnica, as medições são agrupadas em torno dos nós e processadas independentemente, enquanto no método convencional toda rede de energia é processada de forma centralizada sendo essa a razão de o tempo computacional necessário para sua execução ser consideravelmente grande. Para abordar esta questão várias técnicas são desenvolvidas, fornecendo estimativas da variável de estado em um curto intervalo de tempo, com a utilização de técnicas de inteligência artificial, multi-área, estimativas de estado em dois níveis, etc. Os autores propõem a aplicação da técnica de divisão vertical em nível da área do nó. Um nó junto com seus nós conectados e a combinação de duas áreas de nó é chamado

"Super Área de Nós". Aplicando essa metodologia, o número de processadores paralelos necessários pode ser reduzido drasticamente, mantendo o tempo computacional dentro do limite. Esse conceito é testado nos sistemas testes do IEEE de 13 e 30 barras. As conclusões apresentadas no texto trazem que o número de nós conectados não aumenta significativamente quando são agrupadas duas áreas de nós e o tempo de computação do EE não varia significativamente em comparação com a área do nó ou pela metodologia citada com múltiplos processadores. Deixando evidente que com o agrupamento dos nós da rede elétrica é possível reduzir pela metade o número de processadores necessários, tornando-se uma boa solução para sistemas com tamanho elevado, o que faz o processo de estimação de estado ser mais complexo.

Em (CHEN et al., 2018), um método para estimação de estado descentralizada é proposto para estimativa de consumo de carga em redes de distribuição com geração fotovoltaica. O objetivo é desenvolver um método para estimar com precisão o estado do SDs em tempo real com número limitado de sensores e de forma descentralizada. O primeiro passo é a divisão do SD em subáreas, de acordo com a localização das unidades geradoras e as informações mútuas entre os estados do sistema e as medições disponíveis. A proposta descentralizada depende apenas de informações locais e uma quantidade limitada de informações das áreas vizinhas. O conjunto mínimo de medidas a serem trocadas entre áreas vizinhas é selecionado utilizando os critérios de Redundância Mínima e Máxima Relevância – propostos em (DING; PENG, 2005). Em cada área, uma RNA é usada para calcular a potência ativa e reativa absorvida pelas cargas nessa área. A abordagem proposta é testada em um alimentador de teste IEEE modificado de 34 nós. A eficácia do método é avaliada usando uma plataforma de simulação *Hardware in Loop*.

O trabalho de (MUSCAS et al., 2017) propõe uma arquitetura multi-área, onde subáreas devem possivelmente ter um número semelhante de módulos, a fim de minimizar o tempo de execução geral para a estimação de estado em SD sem estar sujeito a nenhuma restrição particular na configuração do sistema de medição. Cada subárea deve possuir a quantidade de medidas necessárias para alcançar a observabilidade, mesmo considerando a possível presença de pseudo-medidas. Um nó sobreposto é assumido para ser compartilhado entre subáreas adjacentes; isso permite uma conversão fácil das quantidades elétricas trocadas entre subáreas quando eles se referem a diferentes referências de ângulo de fase, como geralmente acontece quando as medidas convencionais são consideradas. Segundo os autores, os resultados dos testes mostram que tal abordagem pode ser rentável se aplicada a estimativa do perfil de tensão, independentemente da configurações de medição escolhida, embora seja particularmente útil também para estimativas que utilizam as medidas de

corrente, isso quando o sistema de medição é projetado com medições compartilhadas nos módulos sobrepostos.

Em (CHEN et al., 2018), uma estimativa de estado descentralizada é proposta para estimar o consumo de carga em redes de distribuição com geração fotovoltaica. O objetivo é definir um método para estimar com precisão o status da distribuição redes em tempo real com número limitado de sensores de maneira totalmente descentralizada. Em primeiro lugar, a rede é dividida em subáreas, de acordo com a localização das unidades de geração e das medidas disponíveis. A proposta descentralizada de estimativa do estado depende apenas de informações locais e de uma quantidade limitada de informações de áreas vizinhas. O conjunto mínimo das medidas a serem trocadas com medidores vizinhos são selecionados usando um Critério de Relevância Máxima e Redundância Mínima. Em cada área, uma RNA é utilizada para calcular a potência ativo e reativa absorvida pelas as cargas nessa área. A abordagem proposta é testada com um alimentador de teste IEEE 34 barras modificado. Para avaliar a precisão e eficiência da abordagem proposta, os autores comparam os resultados obtidos a uma abordagem local centralizada. Em comparação com a estimativa de estado baseada em modelo clássico, a estimativa baseada em RNA requer menos medições em tempo real e enquanto a configuração do sistema permanecer a mesma, o custo computacional do EE é baixo. De modo que para estimar os estados de cada subárea, apenas medidas locais e troca limitada de informações de subáreas vizinhas são necessárias a comparação dos resultados da estimativa centralizada e descentralizado mostra que com o incremento das medidas, o desempenho do EE é significativamente melhorado sem um grande aumento dos requerimentos computacionais.

Um dos pontos principais para a implementação de estimadores de estado descentralizados, é a existência de uma infraestrutura de comunicação robusta, para a que a troca informações seja feita de forma segura e eficiente. Alguns aspectos técnicos sobre redes e tecnologias comunicação mais utilizadas para projetos dessa natureza, serão tratados no próximo capítulo.

No atual cenário em que se encontra os SDs, fazem-se necessárias melhorias no monitoramento em tempo real para que novas tecnologias que adentram o contexto de distribuição de energia possam ser incorporadas aos métodos de análise propostos para os novos SDs. Esta linha de pesquisa encontra-se alinhada com o contexto de *Smart Grids* e com diversas aplicações para automatização dos SDs. Assim, o desenvolvimento de pesquisa e inovação a respeito de melhorias na estimação de estado em SD é algo de extrema importância para se obter melhores resultados na determinação da condição operacional e tomada de decisões em SDs.

2.6. Considerações Finais

Os EEs direcionados para SDs têm como objetivo estimar, com certa precisão, o estado da rede de distribuição a partir de um número reduzido de medidas disponíveis em tempo real. Conforme relatado neste capítulo, de uma forma geral os trabalhos desenvolvidos no contexto de monitoramento em tempo real de SDs, em especial os mais recentes, preocupam-se com o tratamento de dados provenientes de unidades de medição fasorial, utilização de pseudo-medidas, instalação de MEIs nas redes secundárias, entre outras abordagens conexas às novas redes inteligentes de energia.

Face ao exposto, verifica-se que a proposta desta dissertação de mestrado é atual e pode contribuir de forma significativa com o estado da arte da área em pauta.

Capítulo 3 - Redes e Protocolos de Comunicação

3.1. Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar as tecnologias de comunicação mais usadas para monitoramento em tempo real de SDs, assim como os protocolos de comunicação que se fazem necessários quando estas tecnologias são empregadas. Com isto revela-se a importância deste tema no âmbito de redes inteligentes de energia e da necessidade de metodologias apropriadas para tratamento de dados oriundos dos SDs.

3.2. Tecnologias de Comunicação por Rádio Frequência

As aplicações que utilizam o método de comunicação por Rádio Frequência (RF) operam em frequências entre 3KHz e 3GHz. Cada aplicação terá restrições diferentes em termos de topologia, largura de banda, latência, custo, privacidade de dados e confidencialidade. É por isso que várias tecnologias e protocolos já foram propostos para atender a requisitos de comunicação para as atuais e futuras aplicações. ZigBee, 6LoWPAN, Bluetooth, RF-Mesh, RFID, Longe Range (LoRa) Wireless HART são apenas algumas das soluções atualmente implementadas (MALANDRA, 2017).

O tamanho da rede de cobertura pode ser classificado em três áreas: *Wide Area Network* (WAN), *Neighborhood Area Network* (NAN) e *Home Area Network* (HAN) ou *Building Area Network* (BAN). HAN ou BAN tem um pequeno alcance para a cobertura da rede, enquanto as outras redes oferecem um alcance maior para seus usuários. A Tabela 3.1 mostra o alcance, os requerimentos de taxa de dados e as tecnologias potenciais dos diferentes tipos de rede (KHEAKSONG; LEE, 2014).

Tabela 3.1- Requisitos de comunicação de diferentes tipos de redes

<i>Tipos de Redes</i>	<i>Alcance</i>	<i>Requerimentos de Taxa de Dados</i>	<i>Tecnologias Potenciais</i>
HAN or BAN	10m - 100m	Aplicação utilizando dispositivo de baixa taxa de dados ⁴ para comunicação	ZigBee, Wi-Fi, Ethernet, PLC

⁴ Taxas de dados menores que 250 kbit/s.

<i>Tipos de Redes</i>	<i>Alcance</i>	<i>Requerimentos de Taxa de Dados</i>	<i>Tecnologias Potenciais</i>
NAN	100m-10km	Dependente da densidade dos nós da rede de comunicação	ZigBee,Wi-Fi, PLC,Tecnologia Celular
WAN	>10km	Roteador ou dispositivo de chaveamento de alta velocidade de tráfego de dados (100 Mbps a Gbps)	Links de Fibra Optica, 3G/LTE, Ethernet, WiMAX.

A seguir são apresentadas algumas das principais redes que utilizam o método de comunicação por RF desenvolvidos para aplicações de IoT e *Smart Cities* e amplamente utilizadas em projetos de monitoramentos de ativos.

3.2.1.Long Range

Aplicações em projetos com comunicação Máquina a Máquina (do inglês – *Machine to Machine* - M2M) e IoT tornaram-se o principal alvo da implantação do LoRa devido à sua especificação de longo alcance e baixa potência para comunicação entre dispositivos eletrônicos. Além disso, o algoritmo de taxa de dados adaptativo de A tecnologia LoRa ajuda a maximizar a vida útil da bateria do nó e a capacidade de rede de transmitir dados (ZOURMAND, 2019).

O LoRa é um sistema de comunicação LPWAN (do inglês – Low Power Wide Area Network) que têm capacidades de transmissão de longa distância, e recebe apoio de empresas como a IBM, Semtech e Actility, que são membros da Aliança LoRa, para o desenvolvimento da rede de comunicação. O objetivo de desenvolvimento do LoRa é criar uma rede de baixa potência para transmissão de dados oriundos de dispositivos finais que transmitiram determinada quantidade pacotes de dados em determinado tempo. A rede LoRa especificamente desenvolvido pela Semtech, é projetada para trabalhar em faixas de frequência de 433, 868 e 915 MHz (dependendo da localidade) e com taxa de transmissão entre 0,25kbps-50kbps (ERIDANI et al., 2020).

A rede de comunicação típica baseada em LoRa, conforme definido no padrão LoRaWAN pela Aliança LoRa, é baseado em uma topologia em estrela em que gateways retransmitem as mensagens entre dispositivos finais e a rede principal (AMADOU; FOUBERT; MITTON, 2019)

No geral, o LoRa é tratado com um benefício para o sistema de IoT, fazendo-se necessário para comunicações que necessitam ser realizadas a longas distâncias e que

quando comparado com protocolos de curto alcance como Wi-Fi e Bluetooth mostra-se bastante vantajoso, embora haja algumas desvantagens na velocidade de transmissão e limitação do tamanho do *payload* (ZOURMAND, 2019).

3.2.2. Sigfox

O SigFox é uma rede que opera de forma proprietária. Nesta situação, o usuário paga um pequeno soma de dinheiro que permite o acesso à rede e dependendo do número de pacotes a serem enviados, as taxas referentes ao pacotes contratados, podem sofrer acréscimos (LAVRIC; PETRARIU; POPA, 2019).

A rede SigFox propõe uma nova estratégia quando se trata de lidar com o conceito de IoT, tornando-se um modelo de negócio que tem características de um operador de rede. As aplicações que utilizam esta tecnologia são as que necessitam uma pequena transferência de dados, fazendo uso de uma rede de Banda Ultra Estreita (do inglês – Ultra Narrow Band – UNB) (LAVRIC; PETRARIU; POPA, 2019).

Assim como outras tecnologias LPWAN, o Sigfox utiliza bandas não licenciadas e realiza um uso eficientemente da largura de banda com um baixo nível de ruído, baixo consumo de energia, e um design de antena de baixo custo utilizando modulação BPSK em UNB (100 Hz) sub-GHz. Os dispositivos finais são conectados em estações rádio base enviando os dados oriundos da medição de processos físicos, monitoramento de ativos, e diversas outras aplicações a serem processados (OSMAN; ABBAS, 2018).

A Tabela 3.2 ilustra os principais dados utilizados pela tecnologia Sigfox.

Tabela 3.2: Dados utilizados pela rede Sigfox (OSMAN; ABBAS, 2018).

<i>Número de mensagens ao longo do uplink</i>	140 mensagens
<i>Máximo payload para cada uplink</i>	12 bytes
<i>Máximo payload para cada downlink</i>	8 bytes
<i>Taxa de transferência</i>	100 bps

3.2.3. Zigbee

O ZigBee é uma tecnologia sem fio desenvolvida pela aliança ZigBee para permitir comunicações M2M de baixo custo, de baixa potência e com pequena taxa de dados visando aplicações IoT. Para desenvolvimentos utilizando Zigbee espera-se que os dispositivos sem fio transmitam em uma faixa de 10 a 75 metros, dependendo do ambiente em que estão

inseridos e da potência dos módulos utilizados. O ZigBee opera nas bandas de frequências Industrial Scientific and Medical (ISM) não licenciadas, como 2.4 GHz, 915 MHz e 868 MHz (ALI et al., 2019)

ZigBee é uma comunicação de alto nível que utiliza rádios pequenos, de baixa potência e de baixo custo. É baseado no protocolo IEEE 802.15.4 que descreve apenas as camadas física e MAC. O Zigbee utiliza taxa de transmissão de dados por volta de 250 Kbps e operam basicamente em três bandas de frequências: 868 MHz na Europa, 915 MHz na América e 2,4 GHz em todo o mundo (ELARABI, 2020).

A tecnologia ZigBee permite o desenvolvimento de diferentes topologias de rede, sendo elas: estrela, malha, pares e grupo de árvores. Existem três tipos de nós que são utilizados para o design de topologias, são eles (OSORIO et al., 2019) :

- Coordenador ZigBee: Responsável pela gestão da rede, assim como o endereçamento e o envio de mensagens e definir um identificador de rede. O nó deve estar sempre conectado à rede e só é permitido a existência de um em toda a rede.
- Roteador ZigBee: É o nó que determina as interfaces entre os módulos e o nó coordenador. Dessa forma, permite expansão da rede em termos de escopo e cobertura.
- ZigBee End Device: São nós que permitem realizar a comunicação com o nó coordenador diretamente ou através de um nó roteador.

3.3. Tecnologias de Comunicação Celular

A indústria de comunicação sem fio tem sido uma das que mais cresceu nos últimos anos, com diversas aplicações, como serviços de comunicação pessoal, comunicações celulares, comunicações por satélite, radiodifusão, TV de alta definição (HDTV), redes sem fio, Bluetooth entre outras tecnologias de comunicação.

O *Global System for Mobile* (GSM), sistema utilizado para comunicações móveis, é uma segunda geração do sistema celular, sendo o primeiro a especificar arquiteturas de modulação digital e requisitos de rede (GU; PENG; OVERVIEW, 2010).

A tecnologia *General Packet Radio Service* (GPRS) é um serviço de dados móveis que, da mesma forma que o GSM, é utilizado para troca de dados em aplicações móveis. As principais características de um sistema GPRS são: operação com baixa latência, reconhecimento de *log in* rápido, transmissões de alta velocidade, comutações livres, etc. Do mesmo modo, possui vários modelos de interfaces, uma delas sendo a interface aérea do GSM, interfaces de protocolos de comunicação com cinco camadas, *bottom up* para camadas

físicas, camada MAC entre outras e taxa de transmissão pode variar de 56 até 114 Kbps (LIU et al., 2011).

Duas das principais tecnologias celulares, recentemente desenvolvidas para aplicações móveis e que necessitam de alta taxa de transferência de dados são apresentadas a seguir.

3.3.1. Long Term Evolution

Long Term Evolution (LTE) é uma arquitetura de comunicação móvel que foi previamente projetada para a comunicação de dispositivos sem fio e para operar nas bandas licenciadas. Possui alta proficiência espectral, excelentes taxas de dados, baixa latência na troca de mensagens e flexibilidade de utilização da faixa de frequência. É um padrão que foi projetado pela *3rd Generation Partnership Project* (3Gpp). A camada física de um sistema LTE possui recursos de downlink e uplink e requer altas taxas de transmissão de pico. O método de acesso que o LTE usa é baseado em *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) com uma mistura de maior modulação de largura de banda (MEKONNEN et al., 2018).

Devido à sua ampla cobertura, suporte as aplicações e a garantia de Qualidade de Serviço (do inglês – *Quality of Services* - QoS), redes LTE são consideradas uma escolha adequada para aplicações que de M2M que utilizam comunicação sem fio. As redes LTE são as redes celulares mais adequadas que podem ser utilizadas para aplicações wireless devido à sua escalabilidade, longevidade, baixa latência e eficiência espectral (ALTHUMALI, 2018).

O sistema LTE é baseado em *multicarrier* modulações – FDMA *single carrier* para uplink e OFDMA para downlink – que proporcionam robustez, flexibilidade e adaptável gerenciamento de recursos de rádio. Por essa razão, é mais adequado para suportar altas taxas de dados do que *single carrier* convencionais soluções ou soluções CDMA. Além disso, o múltiplo o gerenciamento de acesso, é mais eficiente do que o CSMA/CA do IEEE 802.11a e b, e permite facilmente diferenciar a qualidade do serviço do rádio em vários terminais envolvidos na troca de dados (SACCHI, 2019).

O LTE é atualmente o padrão dominante em comunicações terrestres, sendo utilizados em diversas aplicações onde se faz necessária a comunicação com o mundo externo, como em veículos não tripulados, projetos aeroespaciais, sistemas voltados para a agricultura inteligente entre outros diversos modos de utilização da tecnologia LTE. O sistema é comumente chamado de 4G pela indústria.

O Futuro 5G considerará o LTE como linha de base (pelo menos para o que diz respeito ao design de forma de onda (SACCHI, 2019).

3.3.2. Narrow Band IoT

O consórcio internacional 3GPP desenvolveu, em 2016, um novo padrão de comunicação chamado Narrow Band IoT (Nb-IoT) que opera em uma frequência canal de largura de 200 kHz. O NB-IoT é uma comunicação wireless da família LPWAN desenvolvida também para aplicações M2M, que são tecnologias que permitem que sensores e outros dispositivos eletrônicos se comuniquem entre si (ALEXEY S. PETRENKO, SERGEI A. PETRENKO, KRYSTINA A. MAKOVEICHUK, 2018).

A NB-IoT, em comparação com outras tecnologias LPWANs, oferecem recursos necessários a comunicação de sistemas eletrônicos a baixo custo que permite a troca de dados em locais de difícil acesso e com condições desafiadas para outras redes de comunicação como locais subterrâneos ou porões. Utiliza mecanismos aprimorados de economia de energia para melhorar a vida útil da bateria e para suportar pequena transferência de dados. Para facilitar a utilização das redes NB-IoT, os procedimentos de rede foram projetados para simplificar a complexidade de acesso (POPLI; JHA; JAIN, 2020).

A arquitetura NB-IoT utiliza 6 protocolos de camada diferentes, onde são oferecidos vários controles de acesso e recursos relacionados ao sistema, o que melhora a segurança, como na utilização da camada de protocolo de convergência de dados de pacotes (do inglês - *Packet Data Convergence Protocol* - PDCP) e da Camada de Acesso ao Meio (do inglês - *Media Access Protocol* - MAC). Já a camada de controle do link de rádio (do inglês - *Radio Link Contoler* - RLC) é responsável pela mobilidade e também fornece segurança, que está condizente com as redes LTE (NAIR; ABU-MAHFOUZ; LEFOPHANE, 2019).

3.4. Comunicação pela rede elétrica

A rede de BT é uma nova candidata ao mercado de comunicações fornecendo acesso a transmissão de dados com alta velocidade, concretizando o conceito de banda larga com a tecnologia de *Power Line Communication* (PLC), tornando possível construir internamente uma rede de comunicação ou para acessar a Internet utilizando o cabeamento já existente da rede elétrica. No entanto, ao contrário das outras comunicações a partir de fios como o par trançado, ou cabos coaxiais, o poder de alcance da estrutura de cabo foi otimizada principalmente para 50 ou 60 Hz, pois não foi projetado para transmissão de dados e sim para transmissão de energia elétrica (MINGYUE, 2006).

PLC, também conhecido como *Power Line Carrier*, é uma tecnologia que utiliza o sistema elétrico como rede de comunicação. O PLC permite que os consumidores usem seu sistema de fiação para conectar eletrodomésticos a outros pela rede interna ou utilizando a

internet. Existem também aplicações que enviam dados através da rede de corrente alternada (ELAKSHUMI; PONRAJ, 2017).

Nos últimos anos, os estudos sobre comunicação em sistemas de energia tem sido intensificados. Além do PLC, outras tecnologias de alta velocidade de transmissão, modulação e demodulação de dados, tecnologias de acoplamento e protocolos de rede, vem sendo estudas e implementadas em sistemas reais. Do mesmo modo, algumas pesquisas são desenvolvidas na área das teorias básicas da comunicação por linha de energia, como tecnologias incluindo multi canais, modelos de propagação, teste e análise do canal e ruídos característicos (MINGYUE, 2006).

3.5. Protocolos de Rede e de Comunicação Para Aplicações de Internet das Coisas

Os dias atuais vem se tornando a era dos objetos conectados. A IoT está ganhando muita importância em quase todos os campos, como negócios, indústria, eletrônicos de consumo, automotivo e muito mais. Todos os objetos no mundo de hoje estão bem conectados uns aos outros de uma forma ou de outra. Nós podemos controlar as luzes e equipamentos em nossas casas sentados em nosso escritório. Nas indústrias e outras atividades do campo equipamentos podem ser controlados de um lugar remoto, como as lampadas de iluminação publica (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018).

Atualmente tem sido desenvolvido diversos protocolos para a utilização em aplicações que envolvam os temas de *IoT* e *Smart Grids*. Cada um deles dentro de suas peculiaridades, visam atender vertentes relacionadas à redução do consumo de energia, velocidade de troca de dados, capacidade de processamento, dentre outros parâmetros.

Esta seção tem como objetivo apresentar alguns dos protocolos de redes e de comunicação mais utilizados no meio industrial, no que diz respeito à projetos, pesquisas e aplicações que necessitam de redes de comunicação sem fio para transmissão de dados.

3.5.1.LoRaWAN

Long Range (LoRaWAN) é uma nova conexão wireless da família IoT que recentemente evoluiu e está ganhando popularidade em sistemas embarcados alimentados por bateria de baixa potência. Dessa forma, opera transferindo pequenas quantidades de dados em intervalos curtos e a longo alcance (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018).

Existem muitas opções de tecnologia de comunicação para implementação dos MEIs, como GSM / GPRS, PLC, Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, malha de rádio e LoRaWAN. A tecnologia de acesso GSM / GPRS é usada para medidores trifásicos, porque eles serão usados para

transferir muitos dados como perfil de carga, faturamento final, possíveis violações e eventos que ocorram nos medidores. LoRaWAN é a melhor escolha para ser implementada em *Smart Grids*, por ter alcance a longa distância, baixa potência, ser *open source* e custo menor do que GSM / GPRS. A faixa de frequência alocada para utilização da comunicação pelo LoRaWAN varia de 902 a 928 MHz (WIBISONO et al., 2017).

A Figura 3.1 apresenta um comparativo entre algumas das diversas tecnologias presentes no mercado.

Figura 3.1: Taxa de dados vs alcance da tecnologia.

Fonte: Adaptado de (MEKKI et al., 2018).

3.5.2. SigFox

A rede e tecnologia Sigfox é voltada para o baixo custo de máquina em áreas de aplicação onde ampla cobertura é necessária. O Sigfox usa um UNB (*Ultra-Narrow Band*) baseada em tecnologia de rádio para conectar dispositivos a sua rede. O uso da UNB é fundamental para fornecer uma alta capacidade escalável e enorme economia de energia. A rede opera no mercado mundial de bandas de frequência livres de licença e coexiste nestas frequências com outras tecnologias de rádio, mas sem qualquer risco de colisões ou problemas de capacidade utilizando a faixa de 915 MHz na América do Norte e 868 MHz na Europa. A sigfox criou um sistema de comunicação UNB IoT projetado para suporte a implantações de IoT com distâncias a cerca de 20 km entre um dispositivo escravo e a central de processamento (CHUNG; AHN; HUH, 2018).

Os dispositivos escravos se conectam às centrais de processamento usando modulação *Binary Phase Shift keying* (BPSK) em uma UNB de 100 Hz a uma taxa de dados máxima de 100 bps. O Sigfox utiliza eficientemente a banda de frequência e tem níveis de

ruído muito baixos, levando a um consumo de energia muito pequeno, alta sensibilidade do receptor e design de antena de baixo custo (MEKKI et al., 2018).

3.5.3. Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

A chegada do IoT permitiu que a maioria dos dispositivos eletrônicos colete, processe e monitore os dados de “tudo no mundo” em tempo real. Para compartilhar esses dados via internet, o protocolo MQTT é o mais popular dos protocolos. É por causa disso é um protocolo leve e de fácil implementação. O MQTT adequa-se ao sistema que precisa compartilhar muitos dados em tempo real. Existem dois elementos da mensagem enviada via Protocolo MQTT, eles incluem tópico e mensagem. Os dados são enviados de um editor para os assinantes que se inscreverem no tópico que é publicado pelo editor (TANTITHARANUKUL et al., 2017).

O controlador central que distribuiu a mensagem é chamado *broker* MQTT. O *broker* MQTT encaminha, filtra e prioriza a publicação de solicitações dos editores para os inscritos. Para se comunicar via protocolo MQTT, o editor (ou gerador de dados, por exemplo, sensor ou sistema incorporado) deve definir os dois elementos supracitados (mensagem e tópico) para o *broker* MQTT. O conteúdo da mensagem são os dados da string que o editor deseja compartilhar com os assinantes por meio do *broker* MQTT. Enquanto isso, o tópico é uma string usada pelo *broker* para filtrar e decidir quais assinantes devem receber quais mensagens (TANTITHARANUKUL et al., 2017).

3.5.4. Rest HTTP

Devido aos grandes volumes de dados que serão gerados e trafegados com os novos dispositivos eletrônicos que utilizam o conceito de IoT, é necessário construir sistemas de comunicação e arquiteturas que suportem diversas comunicações em diferentes ambientes de rede. Um dos protocolos de comunicação mais populares em sistemas de computação é o REST HTTP (do inglês – *Representational State Transfer* – REST e *Hypertext Transfer Protocol* – HTTP). Com sua popularidade entre os projetos de desenvolvedores de software devido a seu bom desempenho computacional, testado em sistemas tradicionais de computação em nuvem (PHUNG; DIZDAREVIC; JUKAN, 2020)

O REST HTTP segue-se o modelo de interação cliente-servidor, o que implica que cada pedido é independente. REST usa diferentes verbos GET, POST, PUT, etc. para abordar recursos e as representações podem ser transmitidas em diferentes formatos como HTML, XML ou JSON. O protocolo HTTP, seguindo a arquitetura definida pelo REST, é amplamente usado como um protocolo de comunicação para serviços web e também para a criação de APIs REST para distribuições do sistema (IGLESIAS-URKIA et al., 2018).

A facilidade de uso e compatibilidade com os sistemas já existentes fizeram sua adoção como uma comunicação protocolo mais rápido do que com qualquer outro protocolo, mesmo com as limitações conhecidas que este protocolo tem em alguns cenários. Implementações do REST HTTP, em aplicações que utiliza sensores wireless, com condições de redes instáveis são muito desafiadoras, devido a necessidade de enviar solicitações de comunicação durante o processo de conexão, e utilizando redes instáveis o número de retransmissão aumenta consideravelmente (PHUNG et al., 2019) (PHUNG; DIZDAREVIC; JUKAN, 2020).

3.5.5.6LowPAN

Como um protocolo de baixa potência, o IEEE 802.15.4 atraiu a atenção da academia e da indústria no campo das redes de sensores sem fio. O IPv6 *over Low-Power Wireless Personal Area Networks* (6LoWPAN) é proposto pelo grupo IETF 6LoWPAN e realiza a transmissão de pacotes IPv6 em redes de sensores sem fio baseados no protocolo IEEE 802.15.4. Existem muitas pesquisas atuais que são focadas no design do gateway 6LoWPAN, a fim de realizar a interconexão entre as redes 6LoWPAN e Internet e, eventualmente, melhorar o conceito atrelado ao IoT (HONGGANG; CHEN, 2018).

O 6LoWPAN através da introdução de camada de adaptação entre a camada de rede e a camada de enlace de dados fornece um protocolo de rede de confiança para aplicações em larga escala de IoT. Usualmente há muitos dispositivos que utilizam o 6LoWPAN que têm uma capacidade limitada de armazenamento de tabelas de roteamento e endereço para armazenar. Portanto, foi criado um mecanismo hierárquico conhecido como HiLow, baseado no endereço curto atribuído dinamicamente em 6LoWPAN que não necessita de tabela de roteamento e realiza a descoberta de nós vizinhos de forma simples, o que aumenta as vantagens da utilização do protocolo em projetos com um número elevado de elementos escravos (XUE; ZHIXIN, 2015).

3.6. Faixas de Frequência e Possibilidade de Interferência

Dentro do espectro de frequência disponível para os serviços de comunicação no Brasil, existem diferentes faixas de frequência, em que algumas delas são regulamentadas pelo governo (3G, 4G e NB-IoT) e algumas não são (LoraWAN, Wifi, etc). Isso faz com que as frequências regulamentadas possuam uma baixa possibilidade de interferência, com tanto que tenham autorização do governo para operar através de cessão de direitos (do mesmo modo em que operam as redes de televisão) (AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, 2018). Nesse modelo de operação, geralmente uma empresa de telecomunicações ganha a cessão e realiza o serviço de transmissão de dados. Com todo esse trâmite, o custo operacional do sistema aumenta, porém mantém uma maior

confiabilidade para a operação do sistema. Já as redes que não precisam de autorização do governo para operar (faixas de frequência livres como 2.4GHz do Wifi ou 900MHz do LoraWAN) apresentam um custo de operação menor, pois não precisa pagar para uma empresa de telecomunicações pela utilização, contudo pode haver interferência de outras antenas (é o caso do Wifi residencial em um apartamento), diminuindo a confiabilidade de operação.

3.7. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada uma sucinta revisão bibliográfica destacando pesquisas recentes a respeito das redes e protocolos de comunicação mais utilizados no que se refere a projetos com aplicações de IoT. Da mesma forma, algumas dessas redes e protocolos também têm grande empregabilidade nas aplicações de redes inteligentes de energia, sejam elas realizadas pelas próprias concessionárias de energia ou empresas qualificadas no ramo das telecomunicações.

Capítulo 4 - Plataforma Embarcada Para Monitoramento Descentralizado de Redes Inteligentes de Energia

4.1. Introdução

Inicialmente este capítulo propõe arquiteturas descentralizadas para alocação de módulos eletrônicos de processamento para monitoramento de SDs, cada um deles contando com um estimador de estado (embarcado) por mínimos quadrados ponderados.

Em seguida, apresenta, de forma detalhada, um estudo comparando as arquiteturas descentralizadas propostas com a estrutura centralizada usualmente utilizada para monitoramento de SDs. Essa comparação será realizada em termos de quantidade de dados transitando pela rede de comunicação e requisitos computacionais para execução do monitoramento em tempo real de SDs desde a rede secundária, passando pela primária até as subestações.

Posteriormente, propõe o desenvolvimento e implantação de um estimador de estado por mínimos quadrados ponderados em um módulo eletrônico (embarcado), a partir da utilização de placas de desenvolvimento eletrônicos dotadas de processadores de alta performance, com sistema operacional Linux para possibilitar análises matriciais referentes ao processo de estimação de estado.

O capítulo termina apresentando a metodologia de desenvolvimento e implantação, em bancada, de uma IMA para validação da arquitetura descentralizada proposta neste projeto que obteve os melhores resultados nos estudos comparativos realizados.

4.2. Arquiteturas Descentralizadas para Alocação de Módulos Eletrônicos para Monitoramento de SDs

Conforme apresentado no capítulo 2, no contexto da estimação do estado em SD, três aspectos devem ser levados em conta para projetos de IMAs: volume de dados, requisitos de comunicação e capacidades de processamento. Estes três aspectos podem impor sérias limitações às IMAs e para implementação automática de funções para as redes inteligentes. Para lidar com estes três aspectos, este trabalho propõe arquiteturas descentralizadas para monitoramento em tempo real de SDs. De forma mais específica, para realização de estimação de estado. O cerne dessas arquiteturas é a proposição de um módulo eletrônico

(plataforma) no qual é implementado (embarcado) um EE por mínimos quadrados ponderados.

A Figura 4.1 ilustra o módulo eletrônico que está sendo proposto, destacando a troca de dados do módulo, com os demais equipamentos presentes na rede de energia elétrica, para realização de estimação de estado.

Figura 4.1: Parâmetros de entrada e saída do estimador embarcado.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da distribuição do módulo eletrônico proposto (que passaremos a chamar simplesmente de Estimador de Estado Embarcado (EEE), ao longo de um SD, cinco arquiteturas descentralizadas são propostas:

- 1º) Contendo EEEs instalados no secundário de todos os transformadores de distribuição de um SD. Nessa configuração os EEEs realizarão o processo de estimação de estado para rede de BT. Ou seja, cada EEE fica responsável pelo processamento das informações dos MEIs instalados nas UCs alimentadas por um determinado transformador de distribuição. Após a execução desses processos de estimação de estado, cada EEE envia, para o COD, as estimativas de demanda (estimativas de injeção líquida de potência ativa e reativa) de cada transformador. A partir dessas estimativas executa-se, no COD, um estimador de estado para todos os alimentadores (rede de MT) e subestações do SD em análise. Essa arquitetura é ilustrada na Figura 4.2. Observe que as estruturas de medição e comunicação necessárias para implantação dessa arquitetura são dotadas de um MEI para cada UC e módulos de comunicação *wireless*, instalado em cada transformador de distribuição, que será responsável pelo processamento de dados de todas as UCs

conectadas e alimentadas por aquele transformador e o envio dos dados processados para o COD.

Figura 4.2: Ilustração da implementação da primeira arquitetura proposta.

Fonte: Elaborada pelo autor.

- 2º) Contendo EEs necessários para cobrir toda a rede de distribuição em análise, considerando que o alcance de cada EE seja de 500 m. Nessa configuração cada EE ficará responsável pelo processamento de informações de todos os medidores (seja medidores SCADA na rede MT ou MEIs na rede de BT) dentro de um raio de 500 m e do envio, para o COD, das estimativas obtidas para essa porção da rede. A partir dessas estimativas executa-se, no COD, um estimador de estado para todos os alimentadores e subestações do SD em análise (rede de MT);
- 3º) Contendo EEs necessários para cobrir toda a rede de distribuição em análise, considerando que o alcance de cada EE seja de 750 m. Arquitetura similar à segunda, porém cada EE ficará responsável pelo processamento de informações de todos os medidores (seja medidores SCADA na rede MT ou MEIs na rede de BT) dentro de um raio de 750 m e do envio, para o COD, das estimativas obtidas para essa porção da rede;
- 4º) Contendo EEs necessários para cobrir toda a rede de distribuição em análise, considerando que o alcance de cada EE seja de 1.000 m. Estrutura similar à terceira arquitetura, porém cada EE terá uma área de cobertura com raio de 1.000 m;

5º) Contendo EEEs instalados na saída de cada alimentador. Nessa configuração cada EEE ficará responsável pelo processamento de informações de todos os medidores (seja medidores SCADA na rede MT ou MEIs na rede de BT) de cada alimentador do SD em análise e de envio, para o COD, das estimativas obtidas para cada alimentador. A partir dessas estimativas executa-se, no COD, um estimador de estado para todo o SD.

4.3. Comparando as Arquiteturas Descentralizadas Propostas Com Uma Centralizada em Um SD Real

4.3.1. Rede de Distribuição da Cidade de Londrina-PR

Um estudo de caso foi adotado neste trabalho usando um SD real de larga escala da COPEL, localizada no Estado do Paraná, ilustrada na Figura 4.3. Este SD atualmente não está equipado com uma AMI e é usado apenas para fornecer um cenário de SD brasileiro. É o SD da cidade de Londrina-PR, com tensão de 13,8 kV, 36.851 barras, 3.289 chaves normalmente fechadas, 391 chaves normalmente abertas, 7 subestações, 73 alimentadores e mais de 274.000 clientes conectados em 7.755 transformadores de distribuição (AUGUSTO et al., 2018).

O SD da COPEL foi utilizado neste estudo em função de o autor ter acesso às informações desse sistema tem razão de ter participado, como pesquisador bolsista, do desenvolvimento de um P&D com essa empresa (Projeto P&D ANEEL 2866-0504/2018 intitulado “Plataforma Integrada de Autorrecuperação Considerando Geração Distribuída, Estimação de Demanda e Mudanças Topológicas Visando Redes Inteligentes”).

Figura 4.3: Sistema de distribuição em larga escala da cidade de Londrina-PR .

Fonte: Retirado de (AUGUSTO et al., 2018).

Os dados elétricos necessários para execução do estudo foram disponibilizados por engenheiros da COPEL (número de alimentadores, de transformadores por alimentador, de UCs por transformador, etc.). A área total da cidade de Londrina/PR utilizada neste estudo de caso é 1.651 km². O número de EEEs para cada arquitetura descentralizada proposta, conforme descritas na seção anterior, é apresentado na Tabela 4.1, bem como o número médio de UCs para cada EEE.

Tabela 4.1- Quantidade de EEEs e média de UCs por EEE de cada uma das Arquiteturas Descentralizadas Propostas – Com base no SD Real da COPEL.

<i>Alcance do estimador embarcado</i>	<i>Número de EEEs</i>	<i>Média de UCs por EEE</i>
1 por transformador	7755	35
500 m	2013	130
750 m	935	293
1000 m	526	522
1 por alimentador	73	3759

Como referência para os dados enviados e recebidos por MEIs, foram adotados valores disponíveis na literatura. A quantidade de dados enviados e recebidos pelos medidores são apresentados em (LUAN; SHARP, 2013) e utilizados para realizar a extrapolação do tráfego de informações exigido pela IMA neste estudo de caso. Conforme proposto por (LUAN; SHARP, 2013), os MEIs enviam pacotes da ordem de 3.185 bytes convencionais por dia, enquanto a quantidade de informação recebida soma 272 bytes no mesmo período de tempo.

4.3.2.Requerimentos Computacionais do EEE Proposto

O tempo de processamento computacional exigido por um EE por MQP para estimação de estado em SEP está diretamente relacionado à abordagem utilizada para solução das equações normais, descritas pela Equação (2.3). Ou seja, está diretamente associado ao método utilizado para fatoração triangular da matriz Ganho (definida no capítulo 2), processo que se realiza iterativamente para solução do sistema de equações não lineares representado pela equação (2.4). Desta forma, a eficiência computacional de um EE por MQP pode ser avaliada em função da complexidade da técnica utilizada para realização daquela fatoração. Tomando como base a fatoração LU clássica, o número de operações de ponto flutuante $T(n)$ de tal técnica é dado por (4.1) (GENE H. GOLUB, 1996) e está relacionado à dimensão da matriz que será fatorada, neste caso a matriz ganho com dimensão $n \times n$ (sendo n o número de variáveis de estado a serem estimadas).

$$T(n) = \frac{2}{3}n^3 + 2n^2 \quad (4.1)$$

Isso é usado para avaliar a carga computacional e os requisitos de processamento para executar o processo de estimação de estado através do método dos MQP, dividindo o número de operações pela capacidade de processamento do hardware em *floating-point operations per second* (FLOPS).

O primeiro aspecto avaliado foi o requisito computacional de processamento para executar a estimação de estado. A Tabela 4.2 resume a análise baseada no custo computacional avaliado para o EEE nas cinco arquiteturas descentralizadas propostas, e na arquitetura centralizada usualmente utilizada nos SDs, contendo apenas um EE no COD processando a estimação para todo o sistema em análise. O número de variáveis de estado no problema de estimação de estado (magnitude e ângulo de fase de tensão em todos os nós da rede) foi calculado considerando um número de nós como três vezes o número de UCs para cada transformador de distribuição. O tempo computacional da estimação de estado foi calculado considerando um número típico de cinco iterações e o desempenho computacional de uma RaspBerry PI 3 (que será considerada para implantação de EEE), através de uma operação single-threads (0,4 GFLOPS) e operação multi-threads (1,6 GFLOPS). Destaca-se que na realidade o tempo de execução deve ser maior por causa dos *overheads* não contabilizados como o sistema operacional, sistemas de comunicação, armazenamento de dados, leitura de I/Os entre outros.

Tabela 4.2: Custo e tempo computacional para executar a estimação de estados para as arquiteturas definidas.

Desempenho Computacional Estimado Necessário				
Alcance dos estimadores de estados	Número das variáveis de estado (n) por EEE	Número de operações com ponto flutuante por iteração	Tempo de processamento teórico (s) – Single Thread	Tempo de processamento teórico (s) – Multi Thread (4 cores)
1 por transformador	210	6.263E+06	7.829E-02	1.044E-02
500 m	780	3.176E+08	3.970E+00	5.294E-01
750 m	1.758	3.629E+09	4.536E+01	6.048E+00
1,000 m	3.132	2.050E+10	2.563E+02	3.417E+01
1 por alimentador	22.524	7.651E+12	9.563E+04	1.275E+04
1 por SD	1.644,074	2.963E+18	3.703E+10	4.938E+09

À medida que à porção da rede, para realização da estimação de estado cresce, também cresce a quantidade de variáveis de estado e os requisitos computacionais necessários. É importante notar que nas últimas abordagens, que representam arquiteturas mais centralizadas (1 estimador por alimentador ou 1 por SD) e a abordagem integrada de 1

km, apresentam tempo de processamento computacional indesejado para requisitos de monitoramento em tempo real (mais de minutos). Esta é uma vantagem importante das arquiteturas mais descentralizadas, como, em especial, da primeira proposta neste trabalho. Vale ressaltar que este tempo de processamento pode ser ainda reduzido através da escolha de melhores algoritmos para resolver as equações normais, como solucionadores esparsos ou implementações paralelas para explorar arquiteturas multi-threads mais rápidas, como unidades de processamento gráfico. Destaca-se, ainda, que quanto mais descentralizada a arquitetura de monitoramento, maior é a quantidade de processos passíveis de paralelização.

4.3.3. Avaliação dos Requisitos de Volume de Dados

A partir da quantização dos dados dos MEIs é possível ter uma noção de volume de dados e requisitos de comunicação para realizar o monitoramento em tempo real de um SD no contexto de redes inteligentes. Utilizando o número total de UCs e a quantidade de dados enviados e recebidos por cada MEI, o volume de dados para a arquitetura centralizada foi calculado. Lembrando que essa arquitetura considera que toda a cidade de Londrina está conectada à IMA, e todos os MEIs enviam informações diretamente para o COD. Para esse cenário seria necessário encaminhar, mensalmente, um montante de aproximadamente 28 Gbytes. Pelo período de uma semana esse montante seria de aproximadamente 6,5 Gbytes. A quantidade de dados recebidos e processados diariamente, pelo COD, seria de aproximadamente 0,93 Gbytes.

A quantização dos dados foi realizada considerando a comunicação dos pacotes de dados dos MEIs uma vez ao dia. Porém existem abordagens que utilizam outras taxas de transmissão para os dados dos MEIs, mais próximas da taxa de amostragem do MEI, uma vez a cada 15 minutos. Como resultado, o aumento no número de informações trafegando na rede pode aumentar dezenas de vezes, o que causa problemas não apenas para o processamento e armazenamento dos dados, mas também para a transmissão de tais informações devido a taxa de transferência e a largura de banda necessária para a aplicação, conforme mostrado na Tabela 4.2. O volume de dados mais alto pode indicar um custo operacional adicional para as concessionárias se elas não utilizarem redes dedicadas, como redes RF e PLC, e optarem por usar redes de banda larga.

4.3.4. Redução do Volume de Dados Utilizando o Estimado de Estado Embarcado

Ao processar dados em uma arquitetura descentralizada, ao menos para realizar aplicações de redes inteligentes em tempo real, o EEE proposto visa reduzir a quantidade de dados a serem transmitidos. O conceito do EEE foi avaliado de acordo com as diferentes

arquiteturas de implantação. A Tabela 4.3 apresenta a quantização dos dados de acordo com a arquiteturas descentralizadas propostas.

Tabela 4.3: Quantização de dados processados por cada estimador embarcado nas arquiteturas descentralizadas propostas.

Quantidade de dados em kbytes por arquitetura descentralizada			
<i>Alcance do estimador de estado</i>	<i>Mensal (kb)</i>	<i>Semanal (kb)</i>	<i>Diário (kb)</i>
1 por transformador	3.584,1	836,3	119,4
500 m	13.215,8	3.083,6	440,5
750 m	29.735,6	6.938,3	991,2
1000 m	52.863,2	12.334,7	1.762,1
1 por alimentador	380.757,4	88.843,4	12.691,9

Portanto, fica clara a redução significativa de processamento, memória e largura de banda necessária para a operação em tempo real de SDs devido ao uso de sistemas embarcados distribuídos na rede de BT. A Figura 4.4 mostra a quantidade de dados do cenário em que cada transformador de distribuição possui seu próprio EEE, responsável pelo gerenciamento de todas as UCs conectadas à sua rede secundária. Os montantes foram calculados para os 7.755 transformadores de distribuição do SD e representam o tráfego diário em Kbytes para cada transformador.

Figura 4.4: Quantidade de dados processados pelo EEE em cada transformador de distribuição no período de um dia.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser visto, não apenas o número médio de volume de dados deve ser considerado ao definir os requisitos de comunicação para a AMI, mas também as individualidades das redes que estão sendo monitoradas. Além de poder apresentar as vantagens e benefícios do EEE proposto, a implementação de sistemas descentralizados também permite diferentes aplicações de redes inteligentes para redes de distribuição de BT, tais como localização de faltas, gerenciamento de recursos de energia distribuída, operação ótima de sistemas de armazenamento, etc.

4.4. Metodologia de Implementação da Plataforma Embarcada

Tendo em vista que a primeira arquitetura descentralizada proposta foi a que se mostrou mais eficiente nas análises realizadas, ela foi a escolhida para implantação em bancada. Para isso foi desenvolvido e implantado, em bancada, uma IMA, em que fosse possível emular o comportamento de uma rede real de distribuição de energia elétrica, com MEIs acoplados aos seus consumidores finais.

Descreve-se, a seguir, todo o processo de desenvolvimento dessa IMA e do EEE proposto.

4.4.1. Rede Teste Utilizada

Para a execução dos testes para validação da plataforma embarcada para monitoramento descentralizado de SDs foi utilizado o sistema real de distribuição de energia apresentado em (ROLIM; TRINDADE, 2019), onde a MT opera em 13.8 kV e a BT em 220 V, com extensão total do sistema de MT de 4.71 km. O sistema completo modelado em (ROLIM; TRINDADE, 2019) conta com 536 barras de média e 1659 consumidores em BT. Afim de demonstrar a proposta dessa dissertação de mestrado, foi utilizada uma fração desse sistema que conta com 114 barras de MT e 5 transformadores de distribuição, sendo cada um deles conectados com suas respectivas UCs, representando assim as redes de BT presentes no sistema, totalizando 208 barras. A Figura 4.5 apresenta o esquema das conexões da fração da rede utilizada para a realização dos testes.

Figura 4.5: Rede teste utilizada para implementação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4.4 traz a quantidade de UCs conectadas a cada transformador presente no SD utilizado como sistema teste.

Tabela 4.4: Quantidade de UCs por transformador.

Quantidade de UCs por transformador de distribuição	
<i>Identificação do Transformador</i>	<i>Quantidade de UCs</i>
2960	5
1370	27
1371	13
1372	25
1373	24

Os transformadores de distribuição 2960, 1370, 1371, 1372 e 1373 fazem a conexão da rede de BT com a rede de MT. Tais transformadores estão conectados respectivamente às barras 94,114,97,103 e 110 da rede primária do SD teste.

4.4.2.Requerimentos de Hardwares

Para emular uma IMA em laboratório submetemos a proposta do EEE para o Programa de Parcerias em IoT da empresa *Qualcomm Wireless Technology & Innovation* em 2018, onde foram selecionados projetos brasileiros para receber kits de desenvolvimento com tecnologias de comunicação embarcada. O Módulo TELIT ME910C1-WW recebido para prototipagem do projeto suporta as redes de comunicação GPRS, EDGE, CAT M1 e CAT NB-IoT, e possui os seguintes periféricos (TELIT COMMUNICATIONS, 2017):

- Conector para SIM Card;
- Dois conectores de antenas e circuito de RF, com conectores SMA para as antenas GPS e de sinal celular;
- Conector mini-USB, que permite conexão com a porta USB do modem;
- Alguns jumpers que aceleram o desenvolvimento e permite reconfiguração rápida da placa;
- *Level translators* de 1,8 V do modem para 2,8 V expostos na interface inferior da placa;
- 2 conectores 100 mil / 2.54 mm na parte inferior, que permitem acesso a todas as funções do modem;

Tal módulo é responsável por executar a conexão e envio de dados, após o processamento do EEE, para um servidor utilizando redes de comunicação 3G e 4G LTE.

A plataforma embarcada de desenvolvimento escolhida para emulação dos dados gerados por um MEI foi a Raspberry PI 3, por sua alta capacidade de processamento capaz

de executar programas com ótima eficiência computacional em pequenos períodos de tempo, além de seu baixo custo de aquisição.

A Raspberry PI 3 é uma placa eletrônica embarcada com um processador Broadcom BCM2837 64 bits ARMv8 Cortex-A53 Quad-Core com clock de 1.2 GHz que possibilita alta performance em cálculos computacionais e baixo consumo de energia, representa uma ótima solução para aplicações que necessitam de resoluções de cálculos numéricos (LECCESE et al., 2016).

A placa Raspberry PI 3 conta ainda com diversos periféricos que podem ser utilizados na aplicação, como o adaptador Wifi 802.11n integrado, bluetooth 4.1 Bluetooth Low Energy (BLE) integrado, conector de vídeo HDMI, 4 portas USB 2.0, conector Ethernet, interface para câmera, interface para display, slot para cartão microSD e conector de áudio e vídeo (PI, 2016).

O modulo Ra-01 foi utilizado para o envio de dados provenientes da emulação de um MEI utilizando a rede comunicação LoRa, apresentada no capítulo 3. O modulo conta com o chip SX1278 amplamente empregado em projetos que fazem uso de comunicação LoRa e possui comunicação serial SPI (AI-THINKER, 2017).

Para a recepção e conversão dos dados oriundos do modulo Ra-01 foi utilizado a ESP32 LoRa, fazendo uso do chip SX127X, com sensibilidade de recepção de -139 dbm. Alcance máximo do LoRa (utilizando a antena do módulo) é de 3km em áreas abertas e não muito populosas. Com a utilização ESP32 LoRa é possível operar nas frequências de 868-915, 923 MHz, quando empregado o chip SX1276, e de 433 a 510 MHz para o chip SX1278. O Range de temperatura para operação é de -40°C até 80°C (AUTOMATION, 2020)

Para a execução do processo matricial de estimação de estado, foi utilizada a placa Jetson Nano, recentemente lançada pela NVIDIA para execução de projetos voltados para Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina (do inglês – *Machine Learning*). A Jetson Nano apresenta uma performance computacional apontada pela NVIDIA de 472 GFLOPS. Ela possui um processador quad-core ARM A57 de 1,43 GHz e uma Unidade de Processamento Gráfico (do inglês – *Grafic Processing Unit* – GPU) de 128 cores NVIDIA Maxwell. Vem também com 4 GB de memória RAM LPDDR4 e opera a baixo consumo, para aplicações que utilizam a GPU (NVIDIA CORPORATION, 2020).

Abordando o conceito de *System on a Chip* (SoC) a Unidade Central de Processamento (do inglês – *Central Processing Unit* – CPU) da Jetson Nano apresenta as seguintes características técnicas, descritas na Figura 4.6 (NVIDIA EMBEDDED, 2020).

Figura 4.6: Especificações Técnicas Jetson Nano.

GPU	Arquitetura NVIDIA Maxwell™ com 128 NVIDIA CUDA® cores
CPU	Processador Quad-core ARM® Cortex®-A57 MPCore
Memória	4 GB 64-bit LPDDR4
Armazenamento	16 GB eMMC 5.1 Flash
Video Encode	4K @ 30 (H.264/H.265)
Video Decode	4K @ 60 (H.264/H.265)
Câmera	12 lanes (3x4 or 4x2) MIPI CSI-2 DPHY 1.1 (18 Gbps)
Conectividade	Gigabit Ethernet
Visor	HDMI 2.0 ou DP1.2 eDP 1.4 2 DSI simultâneos (1 x2)
UPHY	1 x1/2/4 PCIe, 1x USB 3.0, 3x USB 2.0
I/O	1x SDIO / 2x SPI / 4x I2C / 2x I2S / GPIOs -> I²C, I²S
Dimensões	69.6 mm x 45 mm
Mecânico	Conector de ponta com 260 pinos

Fonte: Retirado de (NVIDIA EMBEDDED, 2020).

A placa base de desenvolvimento conta ainda com os seguintes periféricos (NVIDIA CORPORATION, 2020) :

- Conector de 260 pinos SO-DIMM para placa CPU Jetson Nano;
- Saída de video – HDMI 2.0 e eDP 1.4;
- Conectividade – Gigabit Ethernet mais o conector PoE de 4 pinos;
- USB – 4 portas USB 3.0, 1 portas USB 2.0;
- Câmera I/F – 1x MIPI CSI-2 DPHY compatível com o módulo de câmera Leopard Imaging LI-IMX219-MIPI-FF-NANO;
- Socket M.2 Key E (PCIe x1, USB 2.0, UART, I2S e I2C) para cartões de rede sem fio;
- 40 pinos de GPIOs, I2C, I2S, SPI, UART;
- 8 Pinos com resets e liga-desliga;
- Misc – LED que indica que está alimentada, Header para ventoinha de 4 pinos;
- Power Supply – 5V/4A ou 5V/2A por micro USB;
- Suporte opcional a Power over Ethernet.

4.4.3. Requerimentos de Softwares

Em função dos hardwares escolhidos para a utilização no projeto, alguns softwares se tornaram essenciais para a implementação, entre eles, o já disseminado na área de

prototipagem eletrônica, o ambiente de programação da plataforma Arduino utilizado para acesso e configuração do ESP32 LoRa.

Com relação à configuração de acesso ao módulo TELIT ME910C1-WW, é disponibilizado o software de interface TELIT AT Controller onde a comunicação é feita através de comandos AT, sendo possível a conexão física ser realizada de duas maneiras, através da porta USB ou pela conexão dos pinos RX TX em 1,8 V.

Para a implementação do algoritmo de emulação das medidas provenientes dos MEIs na RB, foi empregado o Rasphian, um ambiente de desenvolvimento planejado para aplicações de Linux Embarcado, e a linguagem de programação escolhida foi o Python. A mesma foi utilizada para gerenciamento do módulo RA-01 e o envio das medidas emuladas.

A imagem em Linux desenvolvida pela NVIDIA para a Jetson Nano, empregada juntamente com a IDE Visual Studio, permitiu implementação do processo de Estimação de Estado e o controle do Módulo Telit para o envio do resultado do processamento dos dados para o servidor da Plataforma Things Board.

A plataforma Things Board é uma plataforma amplamente utilizada por empresas e usuários no gerenciamento de projetos que envolvem conceitos de internet das coisas, apresentando recursos que permitem desde o processamento de configuração de alarmes até visualização dos dados em *dashboards* totalmente customizáveis. A plataforma vem sendo utilizada em projetos de *smart metering*, *smart energy*, Internet das Coisas e de indústria 4.0 (THINGSBOARD INC., 2020)

O Python é uma linguagem que vem ganhando destaque entre os programadores, além de apresentar bastante relevância no meio acadêmico por ser uma linguagem de alto nível interpretada, imperativa e orientada objetos. Uma das principais características é a facilidade de leitura do código e o tamanho reduzido. No quesito linhas de código, em relação a outras linguagens de programação, assim como outras vantagens como ser multiplataforma, possui bibliotecas abertas e sintaxe intuitiva (BELOTSKY; MAJOR,). A Figura 4.7 apresenta o esquemático do protótipo de desenvolvimento proposto.

Figura 4.7: Esquemático de desenvolvimento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5. Considerações Finais

Com uma abordagem de monitoramento centralizado, onde todas as informações precisam ser enviadas e processadas pelos CODs, a potência de processamento e a largura de banda da rede de comunicação precisam ser muito altas para manter um desempenho confiável de aplicações em tempo real. Uma redução considerável é observada para todas as arquiteturas descentralizadas propostas com base no EEE proposto do ponto de vista de quantidade de dados a serem transmitidos e processados para executar a estimação de estado. Assim, além de permitir a redução do tráfego de informações, a utilização do EEE proposto, de forma descentralizada, também permite uma redução nos custos operacionais relacionados aos serviços de comunicação exigidos pelas redes de energia elétrica monitoradas por MEIs.

No próximo capítulo são apresentados resultados das simulações realizadas para validação da arquitetura descentralizada proposta e implementada em bancada.

Capítulo 5 - Testes e Análises dos Resultados

5.1. Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas para validação da arquitetura descentralizada proposta e implementada em bancada, conforme apresentada no Capítulo 4. Vale ressaltar que a implantação foi realizada utilizando módulos industriais e redes de comunicação empregadas em aplicações reais de projetos de *smart grids*. Para validação foi utilizado um SD real para validação do EEE proposto.

5.2. Detalhamento da Implementação da Plataforma Embarcada

Para realizar a emulação do comportamento de um MEI, foi utilizada uma Raspberry PI em conjunto com um módulo LoRa Ra-01 fazendo o envio dos dados referentes às medições de energia nas UCs a cada 0,5 s. O código para o gerenciamento das módulos LoRa Ra-01, as configurações da placa embarcada e o envio das medidas para o gateway de processamento foram realizados utilizando a linguagem Python. A Figura 5.1 apresenta a conexão entre a Raspberry PI e o módulo LoRa.

Figura 5.1: Conexão entre a Raspberry PI e o módulo LoRa Ra-01.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o desenvolvimento do *gateway* de processamento, foram empregados os módulos ESP32 LoRa e 4G LTE, e como central de processamento a placa NVIDIA Jetson

Nano. O módulo ESP32 LoRa foi utilizado como receptor dos dados enviados pelo Ra-01 e após recebidos, os dados são pré processados e convertidos para serem enviados ao processador central via interface UART. Uma vez que os dados, oriundos da emulação dos MEI, estão disponíveis no processador Jetson, estes constituem parte dos parâmetros de entrada juntamente com a matriz de conexão das barras da rede e os parâmetros da linha, para o EEE programado na linguagem Python. Dessa forma executa-se o processo de estimação de estado para a rede secundária que se está gerenciando no momento.

Com o resultado do processo de estimação de estado, inicia-se a conexão com o módulo 4G LTE da empresa TELIT. O módulo é acessado via comunicação serial UART, onde são enviados comandos AT por esse canal de comunicação, que estabelece o registro do módulo da rede celular da operadora e permite requisição de um endereço IP para acesso à rede de internet. Ao final de toda a configuração inicial é possível realizar uma *request* HTTP e abertura de *sockets* de comunicação diretamente para o servidor escolhido e assim encaminhar os dados referentes ao resultado do EEE que podem ser acessados pelos CODs das concessionárias, sendo de alta importância para o conhecimento do estado operativo corrente da rede elétrica. A Figura 5.2 mostra a configuração física das conexões realizadas entre as placas utilizadas no *gateway* de processamento.

Figura 5.2: Conexão física do gateway de processamento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A plataforma para projetos de internet das coisas Things Board foi utilizada para receber os dados do resultado do processo de estimação de estado realizado na Jetson Nano.

Os dados são enviados em formato JSON e armazenado no servidor para serem exibidos no *dashboard* desenvolvido. O servidor Things board foi desenvolvido em parceria com o Laboratório de Eletrônica da Faculdade de Ciências da *Universidade de Salamanca*, na cidade de Salamanca na Espanha, devido ao autor ter realizado um período de mobilidade internacional na instituição.

As informações sobre o estado de operação do SD em análise são apresentadas em um *dashboard* desenvolvido na plataforma Things Board para visualização e monitoramento da rede secundária analisada. A Figura 5.3 mostra o *dashboard* desenvolvido apresentando dados de uma das redes de BT presentes no SD utilizado.

Figura 5.3: Dashboard desenvolvido na plataforma Things Board.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 5.4 apresenta a plataforma completa, conectada e em funcionamento.

Figura 5.4: Plataforma completa em funcionamento.

Fonte: Elaborada pelo autor.

As informações provenientes dos EEEs são customizáveis, atendendo às requisições dos operadores quanto a quais parâmetros adquirir. Podendo, assim, enviar informações somente da barra onde o EEE foi instalado, na hipótese de instalação de um estimador por transformador de distribuição, como também informações específicas de uma UC.

De uma maneira geral, saindo um pouco do escopo deste trabalho, essas informações podem ser: o estado dos dispositivos seccionadores telecomandados que estejam presentes em uma micro rede, avisos sobre faltas e desconexões locais, informações sobre a utilização de geração distribuída, armazenamento de energia em banco de baterias e conexão de veículos elétricos à rede de distribuição de energia. Todas essas tecnologias possuem alta penetração no mercado de energia elétrica.

A Figura 5.5 apresenta a estrutura de funcionamento da rede de comunicação proposta neste trabalho.

Figura 5.5: Estrutura de funcionamento da rede de comunicação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme mencionado no Capítulo 4, em função de a arquitetura descentralizada proposta possuindo um EEE por transformador de distribuição ter se mostrado a mais eficiente nas análises realizadas naquele capítulo, foi ela a escolhida para ser implantada e testada em bancada. A Figura 5.6 ilustra essa arquitetura. Para essa arquitetura o *gateway* de processamento fica responsável por gerenciar todas as UCs conectadas a cada transformador, realizando a aquisição dos dados oriundos dos medidores eletrônicos e a execução do processo de estimação de estado para correspondente rede secundária. Logo após a execução da estimação de estado, o resultado é enviado para um servidor web, de forma a ser visualizado e utilizado para o gerenciamento da rede distribuição.

Figura 5.6: Implementação da arquitetura proposta.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O SD utilizado como sistema teste possui 5 transformadores de distribuição e suas respectivas UCs como descrito na Tabela 4.4. Sendo assim, cada EEE será responsável por gerir as informações das UCs. A Figura 5.7 apresenta as conexões das UCs conectadas a saída de baixa tensão do transformador 1370.

Figura 5.7 Rede de baixa tensão do transformador 1370.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A metodologia de análise da implementação de uma plataforma embarcada para monitoramento descentralizado de SDs baseia-se no tratamento de dados oriundos dos medidores inteligentes instalados nas UCs e que fazem uso das atuais redes de comunicação desenvolvidas para projetos de Internet das Coisas e *Smart Grids*. Com a utilização desses dados e novas tecnologias relacionadas à computação e a eletrônica permite-se realizar o processamento de informações de forma descentralizada e mais próxima as UCs.

A partir da arquitetura descentralizada implantada em bancada realizar-se-á uma comparação, das estimativas obtidas por essa arquitetura, com as resultantes do processo de monitoramento centralizado usualmente empregado atualmente nos SDs. Ou seja, com as estimativas obtidas por um estimador de estado por mínimos quadrados ponderados considerando ao mesmo tempo as redes de MT e BT.

Face ao exposto, para a abordagem centralizada o EE será executado para o sistema completo, ou seja, considerando a rede primária e secundária juntas, totalizando 208 barras.

O SD teste utilizado possui 5 transformadores e consequentemente 5 redes de BT conectadas ao secundário de cada transformador. Na arquitetura descentralizada proposta os EEE realizam a estimação de estado para cada uma das 5 redes de BT, fazendo uso da plataforma embarcada desenvolvida. Em seguida enviam, para o servidor (que seria o COD), o resultado dos processos de estimação, geralmente tensões complexas nodais, e a Potência

Ativa (P) e Reativa (Q) de cada transformador da rede primária. Dessa forma, busca-se demonstrar a viabilidade de execução de EEE de forma descentralizada e o gerenciamento das redes de BT sendo realizado por placas instaladas nos SD. Com os dados de P e Q de cada transformador será possível executar o EE para rede primária, sem ter a necessidade de enviar todos os dados diretamente para o COD e permitindo o gerenciamento do SD completo.

5.3. Sistemática de Avaliação do EEE

O primeiro passo para validação do EEE proposto foi a emulação de valores de referência para as medidas e variáveis de estado. Para isso foi executado um fluxo de potência para rede teste completa (rede primária e secundária), totalizado 208 barras, para obter os valores de tensão complexa e injeção de P e Q em todas as barras dos sistemas e valores de fluxo de potência ativa e reativa em todos os ramos da rede. A partir desses valores foram obtidos os valores de referência para o vetor de medidas ($\underline{Z}^{ref}$) e de variáveis de estado da rede ($\underline{x}^{ref}$).

Para emular medidas obtida e tempo real ($\underline{Z}$), é necessário inserir ruído no vetor $\underline{Z}^{ref}$. O ruído é obtido através da amostragem aleatória em uma quantidade total de simulações de Monte Carlo (foi utilizado uma amostra de 100). As amostras de ruído são geradas individualmente, para cada medida, a partir de um gerador de números aleatórios e do desvio padrão da respectiva medida, conforme as equações (5.1) e (5.2) (SINGH; PAL; VINTER, 2009)(CASTILLO et al., 2011)(FERNANDES; ALMEIDA, 2018).

$$z_i = z_i^{ref} + u_i \cdot \sigma_i \quad (5.1)$$

$$\sigma_i = \frac{|z_i^{ref}| \cdot p_{ri}}{3} \quad (5.2)$$

Onde, z_i é o valor da medida i com a inserção de ruído que será utilizado como dado de entrada para os estudos (isto é, como valores medidos para execução do EE), z_i^{ref} é o respectivo valor da grandeza elétrica obtida no caso de referência, p_{ri} é a respectiva precisão do medidor em percentual obtido de sua classe de precisão dos dados de placa, e u_i é uma variável aleatória com distribuição normal padronizada, de média zero e desvio unitário, ou seja, $u_i \sim N(0,1)$, cujo valor é obtido através de um gerador de números aleatórios. A metodologia utilizada neste trabalho se baseia na inserção de ruído com distribuição Gaussiana conforme as hipóteses assumidas no modelo de medição clássico do problema de estimação de estado. Os valores de p_{ri} utilizados para a inserção de ruídos, em função dos tipos de medidas, são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores utilizados para a inserção de ruídos.

Valores de precisão dos medidores	
<i>Tipo de Medida</i>	<i>Valor</i>
Medidor Inteligente	0,05
Medidor SCADA	0,02
Medidas Virtuais	0,01

Após a obtenção do vetor de medidas $\underline{Z}$, o próximo passo consiste em executar o EE MQP para a rede completa, e o resultado do processo é armazenado. Os resultados dessa etapa são apresentados no Apêndice A.

Para a validação da proposta inicia-se a execução dos EEEs descentralizados para cada rede de distribuição de baixa tensão presente no sistema, totalizando 5. Dessa forma, faz-se uso da plataforma embarcada desenvolvida para emulação de uma cidade inteligente. Considera-se que estejam disponíveis medidores inteligentes, nos consumidores finais, com infraestrutura de comunicação disponibilizando as medidas para os EEEs alocados nos respectivos transformadores de distribuição, responsáveis pela conexão dos consumidores finais com a rede primária de distribuição de energia. Para cada uma das 5 redes de baixa tensão foram enviadas as medidas referentes a cada consumidor até o EEE que executará o processo de estimação para a respectiva rede, obtendo o $\hat{x}$ e os valores de P e Q para a barra da rede primária representando o correspondente transformador de distribuição. Os resultados dessa etapa para a rede de distribuição de baixa tensão do transformador 1370 estão apresentados no Apêndice B.

Após a execução dos EEEs, o resultado do processo, $\hat{x}$ e os valores de P e Q, são enviados para o servidor web da Plataforma Things Board e apresentados no *dashboard* emulando o funcionamento de um COD. O processo é executado para todas as redes de baixa presentes no sistema e os resultados enviados para o servidor web onde é possível realizar o monitoramento dos dados recebidos e a visualização gráfica. As figuras Figura 5.8, Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11 apresentam o *dashboard* com os resultados do processo estimação de estado da rede BT do transformador 1370 em cada instante de tempo.

Figura 5.8: *Dashboard* da rede do trafo 1370 parte 1.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.9: *Dashboard* da rede do trafo 1370 parte 2.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.10: *Dashboard* da rede do trafo 1370 parte 3.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.11: *Dashboard* da rede do trafo 1370 parte 4.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os valores de P e Q recebidos dos EEEs executa-se um EE para a rede primária afim de que se possa comprovar a possibilidade de execução do processo de estimação de estado de forma descentralizada e sem prejuízo para a qualidade e confiabilidade do processo. O resultado do EE para a rede primária está disponibilizado no Apêndice C.

Afim de demonstrar a confiabilidade da proposta deste trabalho foram geradas 30 amostras de medidas para obter o Erro Médio Relativo (EMR_{30}) e o Desvio Padrão (σ_{EMR}) do processo de estimação de estado como dado nas equações 5.3 e 5.4.

$$EMR_{30} = \frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} \left| \frac{\hat{E}_k - E_k^{ref}}{P_k^{ref}} \right| * 100 \quad (5.3)$$

$$\sigma_{EMR} = \sqrt{\frac{1}{(n_p)} \sum_{k=1}^{n_p} \left(\left| \frac{\hat{E}_k - E_k^{ref}}{E_k^{ref}} \right| * 100 - EMR_p \right)^2} \quad (5.4)$$

Onde, K denota o número de barras, $\hat{E}_k$ o resultado do processo estimação de uma das 30 amostras e E_k^{ref} é o resultado do processo de estimação utilizado como referência e armazenado anteriormente.

A Tabela 5.2 apresenta o comparativo entre o resultado do EE executado de forma centralizada e para o EE utilizando dados de P e Q dos transformadores presentes no SD enviados pela plataforma embarcada.

Tabela 5.2: Comparativo entre os resultados dos EE executados para a rede completa e para rede primária.

Resultado do processo de estimação de estado para a rede completa			
EMR rede Completa	Desvio Padrão rede completa	EMR rede primária	Desvio Padrão rede primária
0,0255	0,0072939	0,0297	0,008119

O tempo de execução médio, para as 30 execuções do algoritmo de estimação de estado utilizando como CPU a NVIDIA Jetson Nano, foi armazenado para cada rede de BT presente no sistema teste e é apresentado na Tabela 5.3. Destaca-se que na forma descentralizada é possível realizar o processamento dos EEs instalados nos transformadores de forma paralela, ou seja, no mesmo período de tempo. Da mesma forma, apresenta o tempo de execução do algoritmo também para abordagem centralizada, onde todas as barras do sistema são processadas em uma única máquina e para a proposta em que somente a rede primária é executada no COD fazendo uso dos dados de P e Q de cada transformador do SD. Para a arquitetura centralizada foi utilizado um computador com as seguintes especificações técnicas: processador Intel Core i3 180GHz e memória RAM de 4GB.

Tabela 5.3: Tempo de execução do EE para as redes definidas.

Tempo de execução do processo de estimação de estado	
REDE ELÉTRICA UTILIZADA	TEMPO MÉDIO (S)
Completa (Barras de MT e BT)	46.4579
Primária (Somente as barras de MT)	35.7633
Barras de BT conectadas ao Trafo 2960	0.3380
Barras de BT conectadas ao Trafo 1370	1.409
Barras de BT conectadas ao Trafo 1371	0.7472
Barras de BT conectadas ao Trafo 1372	1.3451
Barras de BT conectadas ao Trafo 1373	1.1043

5.4. Considerações Finais

O presente capítulo apresentou os testes realizados para validação da plataforma embarcada proposta com base no sistema teste criado a partir do apresentado em (ROLIM; TRINDADE, 2019). A plataforma embarcada proposta se baseia em: informações disponibilizadas pelos MEI instalados nas UCs, enviando dados para um módulo eletrônico instalado nos transformadores de distribuição para a execução do processo de estimação de estado; o algoritmo do EE embarcado desenvolvido em linguagem Python; e nas redes de comunicação desenvolvidas para aplicações de *smart grids* e IoT.

Considerando a instalação de medidores inteligentes nas UCs, a plataforma embarcada proposta e implantada em laboratório permite o processamento dos dados de forma descentralizada, utilizando módulos eletrônicos dotados de tecnologias de comunicação de baixo consumo, que seriam instalados nos transformadores de distribuição. Além disto, processando as medidas de P e Q oriundas de cada UCs no módulo embarcado, permite que não seja necessário o envio de todas as informações ao servidor web.

Os resultados apresentados utilizando o SD teste mostram o bom desempenho da plataforma embarcada, avaliando a viabilidade de implementação de sistemas embarcados em cada transformador de distribuição, permitindo que o processo de estimação de estado seja realizado fazendo o uso de uma arquitetura de processamento de dados descentralizada.

Capítulo 6 - Conclusões e Perspectivas Futuras

6.1. Considerações Finais

Dados os crescentes desafios tecnológicos exigidos pelas redes inteligentes de energia, é necessário melhorar a forma como as concessionárias gerenciam as informações das redes elétricas. Tais desafios têm contribuído para aumentar a complexidade da operação dos SDs, com a inserção de novas arquiteturas de redes elétricas que podem operar autonomamente, novas fontes de energia renováveis, armazenamento de energia em baterias e o aumento da utilização de veículos eletrizados trazem novos paradigmas para a operação dos SDs.

Com atualização tecnológica dos campos da eletrônica e computação, cada vez mais é possível realizar o monitoramento em tempo real de dispositivos conectados à rede de energia. Dessa forma, os módulos, redes e protocolos criados para atender demandas oriundas dessas novas tecnologias, podem ser empregadas em projetos que visam a automatização das novas redes de energia elétrica. Dentre os desenvolvimentos realizados recentemente, destacam-se as novas redes de comunicação desenvolvidas para o ecossistema de IoT, que permitem a conexão de vários dispositivos, com longo alcance e baixo consumo de energia e o aumento da capacidade de processamento para módulos eletrônicos embarcado, permitindo a realização de atividades antes confiadas a supercomputadores.

Este trabalho propôs arquiteturas descentralizadas baseadas na inserção de módulos eletrônicos de processamento, para realizar monitoramento em tempo real de SDs, cada uma delas contando com um EEE por mínimos quadrados ponderados. O EEE proposto visa a utilização de hardwares e tecnologias atuais, que trazem inúmeras vantagens se comparadas com dispositivos desenvolvidos num passado recente.

A partir das arquiteturas descentralizada propostas foi realizada a comparação com uma estratégia centralizada para monitoramento de SDs. Abordagem essa, usualmente utilizada para monitoramento de SDs, onde todas as informações precisam ser enviadas e processadas pelo COD. Os resultados apontam que dessa maneira o poder de processamento e a largura de banda da rede de comunicação precisam ser muito altos para manter o bom desempenho e confiabilidade de um sistema de monitoramento em tempo real. Uma redução considerável é observada para todas as arquiteturas de implantação EEE do ponto de vista da quantidade de dados a serem transmitidos e processados para realizar a

estimativa de estado. Assim, além de permitir a redução do tráfego de informações, a utilização do EEE proposto de forma descentralizada também permite uma redução nos custos operacionais relacionados aos serviços de comunicação exigidos pelas redes de energia elétrica monitoradas por MEIs.

Em seguida, apresentou, de forma detalhada o desenvolvimento e implantação, em bancada, de uma IMA, fazendo uso de módulos de comunicação que permitem o desenvolvimento de redes wireless para o envio e recebimento de mensagens em tempo real, utilizando conceitos de Internet das Coisas e *Edge Computing*. Essa infraestrutura, utilizando módulos industriais e redes de comunicação empregadas em aplicações reais de projetos de *smart grids*, foi utilizada para validação de uma das arquiteturas descentralizadas proposta, a que propõe a instalação de módulos eletrônicos em cada transformador de distribuição de energia. A utilização da infraestrutura buscou possibilitar a simulação de uma rede inteligente de energia, no que se refere ao tráfego de informações existente entre os MEIs e os CODs e para isso foi empregado um sistema real brasileiro de distribuição de energia para avaliação da plataforma embarcada proposta.

Considerando a instalação de MEIs nas UCs, a plataforma embarcada proposta e implantada em bancada, permite o processamento dos dados de forma descentralizada, utilizando placas eletrônicas e módulos de comunicação com tecnologias desenvolvidas para serem de baixo consumo. Os módulos eletrônicos instalados nos transformadores de distribuição são responsáveis pela aquisição de dados e execução do processo de estimação de estado para todas as UCs que pertencem à rede de BT do transformador. Além disso, processando as medidas de P e Q oriundas de cada UCs no módulo embarcado e o recebimento do resultado do EE, permite que não seja necessário o envio de todas as informações ao servidor web para estimar o estado operativo corrente de todo o SD.

Os resultados obtidos, alguns dos quais apresentados neste documento, mostram o bom desempenho da plataforma embarcada, avaliando a viabilidade de implementação de sistemas embarcados em cada transformador de distribuição e a redução do tráfego de dados na rede de comunicação, quando não se faz necessário o envio de dados diretamente ao COD. Permitindo dessa forma, que o processo de estimação de estado seja realizado fazendo o uso de uma arquitetura de processamento de dados descentralizada.

6.2. Perspectivas Futuras

Como apresentado ao longo do texto, as novas redes de energia trazem desafios interessantes em diversas áreas relacionadas às Smart Grids. Entre os requisitos necessários para a implementação dessas redes, estão as redes de telecomunicações desenvolvidas para aplicações que necessitam de baixo consumo e alta troca de dados, os MEIs, e os processos realizados para a operação de uma rede.

Entretanto, a aplicação de novas tecnologias traz a tona inúmeros desafios inerentes a aplicação destas em SDs, abrindo os horizontes de pesquisa para benefícios oriundos das atualizações tecnológicas. A integração tecnológica, seja no campo das telecomunicações ou da computação, podem trazer benefícios para a área de tarifação, para o monitoramento em tempo real dos SDs, permitindo um rastreamento sobre as perdas técnicas e não técnicas, podendo ajudar a melhorar os indicadores de qualidade de energia das concessionárias.

Dessa forma, com as informações das redes secundárias sendo disponibilizadas em tempo real, a inserção cada vez mais massiva de geração distribuída, seja na forma solar ou eólica e a utilização de veículos elétricos, faz com que haja uma mudança de paradigmas no setor elétrico. O que permite que processos já consolidados em SEP possam ser revistos e atualizados, como o desenvolvimento de novas técnicas de estimação de estado, considerando o atual cenário de desenvolvimento das tecnologias de comunicação e processamento de dados.

Sendo assim, trabalhos futuros compreendem a avaliação da robustez numérica necessária para o processo de estimação de estado como fator limitante de cobertura pelo EEE. A utilização de uma tecnologia de comunicação inserida no mercado de energia recentemente, nos deixa margem para a realização de um estudo detalhado da capacidade de comunicação, frente aos problemas enfrentados em campo, nos quesitos de que a tecnologia utilizada nos testes se possa atender o maior número de UCs com os recursos alocados sem que se deixe de cumprir os parâmetros técnicos e de segurança para uma rede inteligente de energia opere em perfeitas condições, podendo também, serem avaliadas as diretrizes econômicas para implementação de um projeto, instalação e operação de uma Smart Grid junto às concessionárias. Além disso, existe a possibilidade de implementação de uma versão piloto desta proposta e futuras aplicações em redes BT reais aproveitando a criação de IMA pelas concessionárias podendo avaliar o desempenho em projetos reais.

Dentro do contexto da inserção de MEIs no SD, o desenvolvimento de um EEE trifásico a quatro fios para redes de BT se faz interessante considerando a presença de consumidores monitorados e não monitorados através de medidores inteligentes. Trazendo também

questionamentos relacionados a quais tecnologias utilizar, sejam elas voltadas para comunicação ou para o processamento de dados.

Finalmente, a validação do EEE trifásico embarcado pode ser desenvolvida a partir de simulações computacionais e implementações em laboratórios de pesquisa. Para isso, além da utilização de sistemas testes disponíveis na literatura, poderão ser utilizados e ainda sistemas elétricos reais, dotados de MEIs, pertencentes as concessionárias de energia.

6.3. Publicações

Destacam-se, a seguir as publicações realizadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho que concedeu a elaboração e publicação de um artigo diretamente relacionado com o tema desta dissertação, um relacionado a capacidade de acomodação de redes de distribuição e de outros 2 artigos (coautoria).

1. Título: *An Embedded State Estimator for Reducing Data Volume and Processing in Smart Grids Monitoring*

Autores: Rosvando M. Gonzaga Junior, Julio A. D. Massignan, Carlos D. Maciel, João Bosco A. London Junior, Rodrigo M. A. de Almeida e Marcos H. M. Camillo.

Congresso: IEEE 2018 *Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS)*

2. Título: *Analysis of the Hosting Capacity of Real Distribution Feeder With Wind Generation*

Autores: Rosvando M. Gonzaga Junior, Julio A. D. Massignan, João Bosco A. London Junior

Congresso: IEEE ISGT 2010 *Innovative Smart Grid Technologies Latin America*

3. Título: Estudo de Máxima Penetração de Painéis Fotovoltaicos em um Alimentador Primário de Distribuição de Energia Elétrica

Autores: Kaê Augusto, Julio A. D. Massignan, Rosvando M. Gonzaga Junior e João Bosco A. London Junior.

Congresso: XXII Congresso Brasileiro de Automática

4. Título: Estimador de Demanda Trifásico em Tempo Real com Tratamento para Transformadores Conectados em Δ - Y_N .

Autores: Luana L. Avelino, Julio A. D. Massignan, Rosvando M. Gonzaga Junior, João Bosco A. London Junior, José Paulo R. Fernandes.

Congresso: XII Congresso Brasileiro de Automática

Referências Bibliográficas⁵

- ABUR, A.; EXPÓSITO, A. G. **Power System State Estimation: Theory and Implementation**. Nova York: CRC Press, 2004.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, A. **Plano de Atribuição, Distribuição e Destinação de Radiofrequências**. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/setorregulado/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>>.
- AI-THINKER. **Datasheet Ra-01 LoRa Module** AI-Thinker, , 2017. .
- ALEXEY S. PETRENKO, SERGEI A. PETRENKO, KRYSTINA A. MAKOVEICHUK, P. V. C. The IIoT / IoT Device Control Model Based on. p. 2018–2021, 2018.
- ALI, A. I. et al. ZigBee and LoRa based Wireless Sensors for Smart Environment and IoT Applications. p. 19–23, 2019.
- ALTHUMALI, H. A Survey of Random Access Control Techniques for Machine-to-Machine Communications in LTE / LTE-A Networks. **IEEE Access**, v. 6, p. 74961–74983, 2018.
- AMADOU, I.; FOUBERT, B.; MITTON, N. LoRa in a haystack : a study of the L O R A signal behavior. p. 0–3, 2019.
- AUGUSTO, J. et al. In-Field Validation of a Real-Time Monitoring Tool for Distribution Feeders. v. 33, n. 4, p. 1798–1808, 2018.
- AUTOMATION, H. **WiFi LoRa 32**. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32/>>. Acesso em: 15 jul. 2020.
- BARAN, M. Branch Current Based State Estimation for Distribution System Monitoring. **2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting**, p. 1–4, 2012.
- BARAN, M. E.; KELLEY, a. W. A branch-current-based state estimation method for distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 1, p. 483–491, 1995.
- BARAN, M.; MCDERMOTT, T. E. Distribution system state estimation using AMI data. **2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition**, v. 15236, p. 1–3, 2009.
- BELOTSKY, G.; MAJOR, T. **Python Success Stories**. Disponível em: <<https://www.python.org/about/success/>>. Acesso em: 23 abr. 2018.
- BERNIERI, A. et al. Neural networks and pseudo-measurements for real-time monitoring of distribution systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 45, n. 2, p. 645–650, 1996.
- CAMPOS, F. et al. ADMS4LV – advanced distribution management system for active management of LV grids. **CIREN - Open Access Proceedings Journal**, v. 2017, n. 1, p. 920–923, 2017. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/oap-cired.2017.0663>>.
- CASTILLO, M. R. M. et al. Offline Detection , Identification , and Correction of Branch Parameter Errors Based on Several Measurement Snapshots. v. 26, n. 2, p. 870–877, 2011.
- CHEN, Q. et al. Reconsidering the Smart Metering Data Collection Frequency for Distribution State Estimation. **2014 IEEE International Conference on Smart Grid Communications**, n. Lv, p. 517–522, 2014.
- CHEN, Y. et al. Decentralized State Estimation for Distribution Systems using Artificial Neural Network. **2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology**

⁵ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023

Conference (I2MTC), p. 1–6, 2018.

CHUNG, Y.; AHN, J. Y.; HUH, J. Du. Experiments of A LPWAN Tracking (TR) Platform Based on Sigfox Test Network. **2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)**, p. 1373–1376, 2018.

CPFL ENERGIA. **Apresentação Institucional CPFL Energia**. Disponível em: <<https://cpfl.rweb.com.br/ShowApresentacao.aspx?IdApresentacao=x5pEK30eMwGeTg7QfApO8g==>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

CRUZ, E. **Smart Grid Light**. Disponível em: <<http://redesinteligentesbrasil.org.br/smart-grid-light.html>>. Acesso em: 12 ago. 2020.

DELLA GIUSTINA, D. et al. Electrical distribution system state estimation: measurement issues and challenges. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v. 17, n. 6, p. 36–42, dez. 2014.

DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. LoRa technology-an overview. **2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)**, n. Iceca, p. 284–290, 2018.

DING, C.; PENG, H. Minimum Redundancy Feature Selection From Microarray Gene Expression Data. **Journal of Bioinformatics and Computational Biology**, v. 03, n. 02, p. 185–205, 2005. Disponível em: <<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219720005001004>>.

ELAKSHUMI, S.; PONRAJ, A. A Server Based Load Analysis Of Smart. **2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)**, p. 141–144, 2017.

ELARABI, T. Design and Simulation of State-of-Art ZigBee Transmitter for IoT Wireless Devices. p. 297–300, 2020.

ENERGIA, C. **Energia Inteligente**. Disponível em: <<https://www.cpfl.com.br/atendimento-a-consumidores/energia-inteligente/paginas/default.aspx>>.

ERIDANI, D. et al. Monitoring System in Lora Network Architecture using Smart Gateway in Simple LoRa Protocol. p. 200–204, 2020.

FARAJOLLAHI, M.; SHAHSAVARI, A.; MOHSENIAN-RAD, H. Tracking State Estimation in Distribution Networks Using Distribution-level Synchrophasor Data. **2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)**, p. 1–5, 2018.

FERNANDES, T. R.; ALMEIDA, M. C. De. Specifying angular reference for three-phase distribution system state estimators. p. 1655–1663, 2018.

GENE H. GOLUB, C. F. V. L. **Matrix Computations-Golub G.H-Van Loan C.pdf**, 1996. .

GHOLAMI, M. et al. Linear Voltage Based State Estimator for Active Distribution System Including Phasor Measurement Unit (PMU). **2018 Electrical Power Distribution Conference (EPDC)**, p. 1–6, 2018.

GÓMEZ-EXPOSITO, A. et al. A taxonomy of multi-area state estimation methods. **Electric Power Systems Research**, v. 81, p. 1060–1069, 2011.

GU, G.; PENG, G.; OVERVIEW, A. A. The Survey of GSM Wireless Communication System. **2010 International Conference on Computer and Information Application**, p. 121–124, 2010.

HAUGHTON, D. A. et al. Smart Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 2, p. 1187–1195, 2013.

HONGGANG, Z.; CHEN, S. Design and Implementation of Lightweight 6LoWPAN Gateway Based on Contiki. **2018 IEEE International Conference on Signal Processing**,

Communications and Computing (ICSPCC), p. 1–5, 2018.

IGLESIAS-URKIA, M. et al. Validation of a CoAP to IEC 61850 Mapping and Benchmarking vs HTTP-REST and WS-SOAP. p. 1015–1022, 2018.

JOOS, G. et al. The Need for Standardization: The Benefits to the Core Functions of the Microgrid Control System. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 15, n. 4, p. 32–40, 2017.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Second ed. [s.l.: s.n.]

KHEAKSONG, A.; LEE, W. Packet Transfer of DLMS / COSEM Standards for Smart Grid. **The 20th Asia-Pacific Conference on Communication (APCC2014)**, p. 391–396, 2014.

LAVRIC, A.; PETRARIU, A. I.; POPA, V. SigFox Communication Protocol : The New Era of IoT ? p. 28–31, 2019.

LECCESE, F. et al. A New Power Quality Instrument Based on Raspberry-Pi. **Electronics**, v. 5, n. 4, p. 64, 2016. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2079-9292/5/4/64>>.

LEFEBVRE, S.; PREVOST, J.; LENOIR, L. Distribution state estimation: A necessary requirement for the smart grid. **IEEE Power and Energy Society General Meeting**, v. 2014–Octob, n. October, 2014.

LIN, W. M.; TENG, J. H.; CHEN, S. J. A highly efficient algorithm in treating current measurements for the branch-current-based distribution state estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 16, n. 3, p. 433–439, 2001.

LIU, W. et al. Research and Development of Communication Between PC and Mobile Base on Embedded System and GPRS. **2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)**, p. 4180–4183, 2011.

LUAN, W.; SHARP, D. Data Traffic Analysis of Utility Smart Metering Network. p. 1–4, 2013.

M.V., L. K.; H.A., M. P.; ANANTHAPADMANABHA, T. A Literature Review on Distribution System State Estimation. **Procedia Technology**, v. 21, p. 423–429, 2015.

MALANDRA, F. Performance Analysis of Large Scale RF-Mesh Networks for Smart Cities and IoT. n. October, p. 13–18, 2017.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO, R. A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Revista Brasileira de Controle & Automação - SBA**, v. 11, n. 03, p. 150–159, 2000.

MEKKI, K. et al. Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: **PerIoT'18 - Second International Workshop on Mobile and Pervasive Internet of Things Overview**, p. 197–202, 2018.

MEKONNEN, Y. et al. LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with Application to Smart Grid : A Review. 2018.

MINGYUE, Z. Measurements and Channel Characteristics of LV Power Line Communications Networks in China. **2006 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications**, n. 60402004, p. 212–216, 2006.

MUSCAS, C. et al. Fast Multi-area Approach for Distribution System State Estimation. 2017.

NAIR, K. K.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; LEFOPHANE, S. Analysis of the Narrow Band Internet of Things (NB-IoT) Technology. 2019.

NVIDIA CORPORATION. JETSON NANO User Guide. 2020.

NVIDIA EMBEDDED. **Máquinas Autônomas - Jetson Nano**. Disponível em: <<https://www.nvidia.com/pt-br/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-nano/>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

OSMAN, N. I.; ABBAS, E. B. Simulation and Modelling of LoRa and Sigfox Low Power Wide Area Network Technologies. p. 1–5, 2018.

OSORIO, A. E. et al. Evaluation of Wireless Network Based on ZigBee Technology Using XBee Modules. 2019.

PHUNG, C. V. et al. Enhancing REST HTTP with Random Linear Network Coding in Dynamic Edge Computing Environments. p. 435–440, 2019.

PHUNG, C. V.; DIZDAREVIC, J.; JUKAN, A. An Experimental Study of Network Coded REST HTTP in Dynamic IoT Systems. 2020.

PI, R. DATASHEET Raspberry Pi Compute Module (CM1) Raspberry Pi Compute Module 3 (CM3) Raspberry Pi Compute Module 3 Lite (CM3L). v. 3, n. October, p. 0–21, 2016. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/computemodule/RPI-CM-DATASHEET-V1_0.pdf><<https://www.sparkfun.com/products/13825>>.

POPLI, S.; JHA, R. K.; JAIN, S. A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges. **IEEE Access**, v. 7, p. 16739–16776, 2020.

PRIMADIANTO, A.; LU, C. A Review on Distribution System State Estimation. v. 32, n. 5, p. 3875–3883, 2017.

RADHOUSH, S.; LIN, J. Distribution System State Estimation with Measurement Data Using Different Compression Methods. **2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)**, p. 1–6, 2018.

RAFAEL S. SILVA, FELIPE M. LABURU, M. C. de A. On the use of uPmu for State Estimation in Distribution Systems. In: 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), **Anais...**2017.

RAMESH, L. et al. Ring Main Distribution State Estimation through Optimal. 2012.

ROLIM, F. B. B.; TRINDADE, F. C. L. Fast screening approach to estimate the hosting capacity of rooftop PV generators in electric power distribution systems. n. January 2018, p. 1–15, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/etep.2740>>.

ROSENBERG, C.; BHATTACHARYA, K. State Estimation in Power Distribution Systems Based on Ensemble Kalman Filtering. v. 33, n. 6, p. 6600–6610, 2018.

SACCHI, C. From LTE-A to LTE-M: a Futuristic Convergence between Terrestrial and Martian Mobile Communications. p. 0–4, 2019.

SANTOS, R. Z. S.; ORILLAZA, J. R. C. Distribution System State Estimator Using SCADA and —PMU Measurements. **2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia)**, p. 558–562, 2018.

SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model. **Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, n. 1, p. 120–125, 1970.

SHEN, D.; LIANG, H. Research on Distribution System State Estimation with Photovoltaic Generation. **2013 IEEE International Conference of IEEE Region 10 (TENCON 2013)**, p. 1–5, 2013.

SHIOBARA, T.; PALENSKY, P.; NISHI, H. Effective Metering Data Aggregation for Smart Grid Communication Infrastructure. **IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**, p. 2136–2141, 2015.

SILVA, É. R. et al. Impact of the State Estimation in Different Scenarios and Topologies in a Power Distribution System. **2018 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, 2018.

SINGH, R.; PAL, B. C.; VINTER, R. B. System State Estimation. v. 24, n. 2, p. 668–675, 2009.

SOUSA, P. H. De et al. Sequential Method of State Estimation for Distribution Systems. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, p. 6–10, 2018.

TANTITHARANUKUL, N. et al. MQTT-Topics Management System for Sharing of Open Data. **2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT)**, p. 62–65, 2017.

TELIT COMMUNICATIONS. Hardware User Guide. p. 1–93, 2017.

THINGSBOARD INC. **ThingsBoard Open-source IoT Platform**. Disponível em: <<https://thingsboard.io/>>. Acesso em: 10 jul. 2020.

UDUPA, H. N. et al. Power System Vertical Division State Estimation (VDSE) Application To Super Node Area. **2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPEs)**, p. 1311–1316, 2016.

VAN CUTSEM, T.; RIBBENS-PAVELLA, M. Critical Survey of Hierarchical Methods for State Estimation of Electric Power Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-102, n. 10, p. 3415–3424, 1983.

WAERESCH, D. et al. Field test of a linear three-phase low- voltage state estimation system based on smart meter data. **24th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution (CIRED)**, v. 2017, n. June, p. 1773–1776, 2017.

WIBISONO, G. et al. Development of Advanced Metering Infrastructure Based on LoRa WAN in PLN Bali Toward Bali Eco Smart Grid. **2017 Saudi Arabia Smart Grid (SASG)**, p. 4–7, 2017.

XUE, L.; ZHIXIN, S. An Improved 6Lo WP AN Hierarchical Routing Protocol. **2015 11th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness (QSHINE)**, n. Qshine, p. 318–322, 2015.

YUEHAO, Y. et al. A Distribution Network State Estimation Method Based on Power User Electric Energy Data Acquisition System. **2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)**, v. 2, n. Ciced, p. 1–4, 2016.

ZOURMAND, A. Internet of Things (IoT) using LoRa technology. n. June, p. 324–330, 2019.

Apêndice A – Resultados do processo de estimação para a rede completa

RELATÓRIO DE SAÍDA

ESTIMADOR DE ESTADO SISTEMA TESTE

Número de Barras: 208

Número de Linhas: 207

Estimador de estado pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP)

RESULTADOS DO ESTIMADOR NA ITERAÇÃO 1

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)
-------	-------------	------------

1.0000000	1.0056469	0.0000000
2.0000000	1.0054995	-0.0075582
3.0000000	1.0054812	-0.0084454
4.0000000	1.0049994	-0.0330408
5.0000000	1.0049904	-0.0335333
6.0000000	1.0049721	-0.0344212
7.0000000	1.0048724	-0.0395480
8.0000000	1.0047348	-0.0465669
9.0000000	1.0047348	-0.0465670
10.0000000	1.0017539	-0.1997573
11.0000000	0.9978203	-0.4038992

12.0000000	0.9978202	-0.4039059
13.0000000	0.9978200	-0.4039179
14.0000000	0.9978141	-0.4039873
15.0000000	0.9977990	-0.4041660
16.0000000	0.9972343	-0.4345420
17.0000000	0.9962149	-0.4879577
18.0000000	0.9953560	-0.5330536
19.0000000	0.9946108	-0.5722441
20.0000000	0.9946108	-0.5722441
21.0000000	0.9946108	-0.5722441
22.0000000	0.9946108	-0.5722441
23.0000000	0.9941054	-0.5988649
24.0000000	0.9935885	-0.6261420
25.0000000	0.9935885	-0.6261422
26.0000000	0.9935885	-0.6261425
27.0000000	0.9935882	-0.6261461
28.0000000	0.9935880	-0.6261485
29.0000000	0.9929997	-0.6572364
30.0000000	0.9924741	-0.6851170
31.0000000	0.9919759	-0.7115718
32.0000000	0.9911914	-0.7532286
33.0000000	0.9911736	-0.7541291
34.0000000	0.9911685	-0.7544361
35.0000000	0.9908232	-0.7727852
36.0000000	0.9908232	-0.7727853
37.0000000	0.9908231	-0.7727853
38.0000000	0.9908222	-0.7727861
39.0000000	0.9908222	-0.7727862

40.0000000	0.9908222	-0.7727862
41.0000000	0.9908214	-0.7727868
42.0000000	0.9908205	-0.7727875
43.0000000	0.9908197	-0.7727882
44.0000000	0.9908191	-0.7727888
45.0000000	0.9908185	-0.7727893
46.0000000	0.9908179	-0.7727898
47.0000000	0.9908174	-0.7727902
48.0000000	0.9908173	-0.7727903
49.0000000	0.9908173	-0.7727903
50.0000000	0.9908173	-0.7727904
51.0000000	0.9908172	-0.7727904
52.0000000	0.9908172	-0.7727904
53.0000000	0.9908170	-0.7727906
54.0000000	0.9908169	-0.7727907
55.0000000	0.9908168	-0.7727907
56.0000000	0.9908167	-0.7727908
57.0000000	0.9908167	-0.7727909
58.0000000	0.9908166	-0.7727909
59.0000000	0.9908166	-0.7727910
60.0000000	0.9908166	-0.7727910
61.0000000	0.9908171	-0.7727905
62.0000000	0.9908171	-0.7727905
63.0000000	0.9908170	-0.7727906
64.0000000	0.9908170	-0.7727906
65.0000000	0.9908169	-0.7727906
66.0000000	0.9908169	-0.7727907
67.0000000	0.9905948	-0.7850155

68.0000000	0.9903664	-0.7972511
69.0000000	0.9903664	-0.7972511
70.0000000	0.9903664	-0.7972511
71.0000000	0.9903664	-0.7972511
72.0000000	0.9903664	-0.7972511
73.0000000	0.9899712	-0.8183377
74.0000000	0.9896151	-0.8373468
75.0000000	0.9892768	-0.8554658
76.0000000	0.9889386	-0.8735968
77.0000000	0.9889386	-0.8735968
78.0000000	0.9889386	-0.8735968
79.0000000	0.9889386	-0.8735968
80.0000000	0.9886036	-0.8916036
81.0000000	0.9882172	-0.9123181
82.0000000	0.9876105	-0.9204356
83.0000000	0.9875792	-0.9208938
84.0000000	0.9875618	-0.9211419
85.0000000	0.9872155	-0.9257965
86.0000000	0.9868262	-0.9310466
87.0000000	0.9866704	-0.9331284
88.0000000	0.9866704	-0.9331284
89.0000000	0.9864653	-0.9359600
90.0000000	0.9864551	-0.9360913
91.0000000	0.9864540	-0.9361069
92.0000000	0.9864529	-0.9361214
93.0000000	0.9864395	-0.9362945
94.0000000	0.9864224	-0.9365150
95.0000000	0.9861944	-0.9397289

96.0000000	0.9859253	-0.9434785
97.0000000	0.9856562	-0.9472301
98.0000000	0.9854344	-0.9503770
99.0000000	0.9852127	-0.9535254
100.0000000	0.9851219	-0.9548102
101.0000000	0.9850521	-0.9558384
102.0000000	0.9849645	-0.9571314
103.0000000	0.9848364	-0.9590172
104.0000000	0.9851219	-0.9548102
105.0000000	0.9850550	-0.9557057
106.0000000	0.9849487	-0.9571426
107.0000000	0.9848343	-0.9586918
108.0000000	0.9847188	-0.9602450
109.0000000	0.9846126	-0.9616828
110.0000000	0.9845274	-0.9628295
111.0000000	0.9864957	-0.9353962
112.0000000	0.9862771	-0.9382070
113.0000000	0.9860622	-0.9409799
114.0000000	0.9858466	-0.9437619
115.0000000	0.9864224	-0.9365154
116.0000000	0.9864220	-0.9365299
117.0000000	0.9864208	-0.9365728
118.0000000	0.9864213	-0.9365504
119.0000000	0.9864205	-0.9365809
120.0000000	0.9856561	-0.9472312
121.0000000	0.9856550	-0.9472818
122.0000000	0.9856459	-0.9475234
123.0000000	0.9856484	-0.9475141

124.0000000	0.9856376	-0.9477443
125.0000000	0.9856425	-0.9477179
126.0000000	0.9856298	-0.9479492
127.0000000	0.9856403	-0.9477953
128.0000000	0.9856298	-0.9479493
129.0000000	0.9856393	-0.9478049
130.0000000	0.9856392	-0.9478363
131.0000000	0.9856396	-0.9478220
132.0000000	0.9856387	-0.9478193
133.0000000	0.9848361	-0.9590212
134.0000000	0.9848327	-0.9591839
135.0000000	0.9848142	-0.9598467
136.0000000	0.9847889	-0.9608156
137.0000000	0.9848049	-0.9601768
138.0000000	0.9847476	-0.9615003
139.0000000	0.9847884	-0.9608308
140.0000000	0.9848045	-0.9601870
141.0000000	0.9847987	-0.9602664
142.0000000	0.9848005	-0.9602503
143.0000000	0.9847346	-0.9616844
144.0000000	0.9847885	-0.9604140
145.0000000	0.9847966	-0.9603137
146.0000000	0.9847220	-0.9618672
147.0000000	0.9847790	-0.9605522
148.0000000	0.9847181	-0.9619060
149.0000000	0.9847706	-0.9606704
150.0000000	0.9847150	-0.9619365
151.0000000	0.9847656	-0.9607336

152.0000000	0.9847131	-0.9619558
153.0000000	0.9847636	-0.9607568
154.0000000	0.9847120	-0.9619666
155.0000000	0.9847627	-0.9607655
156.0000000	0.9847629	-0.9607677
157.0000000	0.9847629	-0.9607677
158.0000000	0.9845272	-0.9628317
159.0000000	0.9845249	-0.9629336
160.0000000	0.9844987	-0.9638662
161.0000000	0.9845176	-0.9631418
162.0000000	0.9844839	-0.9643934
163.0000000	0.9845099	-0.9633549
164.0000000	0.9844811	-0.9644251
165.0000000	0.9844699	-0.9646195
166.0000000	0.9844815	-0.9644730
167.0000000	0.9845041	-0.9634824
168.0000000	0.9844771	-0.9644701
169.0000000	0.9844428	-0.9650365
170.0000000	0.9844761	-0.9645508
171.0000000	0.9845005	-0.9635566
172.0000000	0.9845016	-0.9635376
173.0000000	0.9844741	-0.9644994
174.0000000	0.9844719	-0.9646172
175.0000000	0.9844977	-0.9636121
176.0000000	0.9844999	-0.9635764
177.0000000	0.9844715	-0.9645259
178.0000000	0.9844707	-0.9646321
179.0000000	0.9844991	-0.9635958

180.0000000	0.9844704	-0.9645507
181.0000000	0.9844704	-0.9645510
182.0000000	0.9858461	-0.9437664
183.0000000	0.9840641	-1.0912576
184.0000000	0.9840257	-1.0926287
185.0000000	0.9840152	-1.0926337
186.0000000	0.9839904	-1.0938844
187.0000000	0.9839991	-1.0930915
188.0000000	0.9839440	-1.0946072
189.0000000	0.9839932	-1.0933306
190.0000000	0.9839836	-1.0934659
191.0000000	0.9839989	-1.0930978
192.0000000	0.9839127	-1.0951086
193.0000000	0.9839826	-1.0937558
194.0000000	0.9839540	-1.0938400
195.0000000	0.9839989	-1.0930978
196.0000000	0.9838974	-1.0953220
197.0000000	0.9839127	-1.0951083
198.0000000	0.9839127	-1.0951084
199.0000000	0.9839730	-1.0941441
200.0000000	0.9839989	-1.0930978
201.0000000	0.9838922	-1.0953755
202.0000000	0.9839699	-1.0942627
203.0000000	0.9839687	-1.0942519
204.0000000	0.9838900	-1.0953980
205.0000000	0.9839699	-1.0942630
206.0000000	0.9839637	-1.0943886
207.0000000	0.9839604	-1.0945009

208.0000000 0.9839603 -1.0945596

RELATÓRIO DE CONVERGÊNCIA

Tolerância de Convergência: 0.0010

Iteração	Mismatche
----------	-----------

0.0000000	1.0000000
-----------	-----------

1.0000000	0.0189186
-----------	-----------

2.0000000	0.0001997
-----------	-----------

DADOS DE FLUXO POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

De	Para	Pkm	Qkm
----	------	-----	-----

1	2	1.00869	0.70221
---	---	---------	---------

2	3	1.00860	0.70195
---	---	---------	---------

3	4	1.00857	0.70189
---	---	---------	---------

4	5	1.00836	0.70109
---	---	---------	---------

5	6	1.00833	0.70105
---	---	---------	---------

6	7	1.00829	0.70099
---	---	---------	---------

7	8	1.00823	0.70080
---	---	---------	---------

8	9	0.00003	0.00003
---	---	---------	---------

8	10	1.00812	0.70053
---	----	---------	---------

10	11	1.00697	0.69573
----	----	---------	---------

11	12	0.01353	0.00960
11	16	0.99191	0.67980
12	13	0.01350	0.00957
13	14	0.01348	0.00954
14	15	0.01345	0.00951
16	17	0.99167	0.67884
17	18	0.99126	0.67719
18	19	0.99090	0.67580
19	20	0.00008	0.00009
19	23	0.99051	0.67450
20	21	0.00006	0.00006
21	22	0.00003	0.00003
23	24	0.99029	0.67367
24	25	0.00039	0.00030
24	29	0.98967	0.67252
25	26	0.00037	0.00027
26	27	0.00034	0.00024
27	28	0.00031	0.00021
29	30	0.98942	0.67155
30	31	0.98920	0.67069
31	32	0.98898	0.66987
32	33	0.98866	0.66859
33	34	0.98862	0.66853
34	35	0.98859	0.66849
35	67	0.98755	0.66700
35	36	0.00088	0.00091

36	37	0.00085	0.00088
37	38	0.00082	0.00085
38	39	0.00079	0.00082
39	40	0.00077	0.00079
40	41	0.00074	0.00076
41	42	0.00071	0.00073
42	43	0.00068	0.00071
43	44	0.00065	0.00068
44	45	0.00062	0.00065
45	46	0.00060	0.00062
46	47	0.00057	0.00059
47	48	0.00054	0.00056
48	49	0.00051	0.00053
49	50	0.00048	0.00050
50	51	0.00045	0.00047
51	52	0.00043	0.00044
52	53	0.00023	0.00024
52	61	0.00017	0.00018
53	54	0.00020	0.00021
54	55	0.00017	0.00018
55	56	0.00014	0.00015
56	57	0.00011	0.00012
57	58	0.00009	0.00009
58	59	0.00006	0.00006
59	60	0.00003	0.00003
61	62	0.00014	0.00015

62	63	0.00011	0.00012
63	64	0.00009	0.00009
64	65	0.00006	0.00006
65	66	0.00003	0.00003
67	68	0.98744	0.66661
68	69	0.00011	0.00012
68	73	0.98721	0.66610
69	70	0.00009	0.00009
70	71	0.00006	0.00006
71	72	0.00003	0.00003
73	74	0.98704	0.66544
74	75	0.98687	0.66484
75	76	0.98672	0.66427
76	77	0.00009	0.00009
76	80	0.98647	0.66362
77	78	0.00006	0.00006
78	79	0.00003	0.00003
80	81	0.98632	0.66305
81	82	0.98615	0.66241
82	83	0.98561	0.66183
83	84	0.98556	0.66177
84	85	0.98552	0.66173
85	86	0.98519	0.66139
86	87	0.98484	0.66100
87	88	0.00003	0.00003
87	89	0.56505	0.37366

87	111	0.41960	0.28714
89	90	0.03340	0.02290
89	95	0.53152	0.35063
90	91	0.03337	0.02287
91	92	0.03335	0.02284
92	93	0.03332	0.02281
93	94	0.03329	0.02278
95	96	0.53137	0.35047
96	97	0.53122	0.35031
97	98	0.43926	0.28717
98	99	0.43915	0.28705
99	100	0.43904	0.28694
100	101	0.24761	0.15858
100	104	0.00003	0.00003
100	105	0.19134	0.12826
101	102	0.24757	0.15854
102	103	0.24752	0.15849
105	106	0.19130	0.12822
106	107	0.19125	0.12817
107	108	0.19121	0.12812
108	109	0.19116	0.12807
109	110	0.19111	0.12802
111	112	0.41951	0.28705
112	113	0.41940	0.28693
113	114	0.41929	0.28682
94	115	0.01826	0.01181

115	116	0.01824	0.01178
116	117	0.00331	0.00207
116	118	0.00181	0.00136
117	119	0.00074	0.00050
97	120	0.05992	0.04146
120	121	0.05781	0.04019
121	122	0.02177	0.01767
121	123	0.01832	0.01169
122	124	0.01997	0.01629
123	125	0.01611	0.01033
124	126	0.01816	0.01492
125	127	0.01343	0.00870
126	128	0.00003	0.00003
127	129	0.00360	0.00274
127	130	0.00553	0.00333
127	131	0.00427	0.00260
129	132	0.00180	0.00137
103	133	0.17515	0.10691
133	134	0.17512	0.10688
134	135	0.04731	0.02973
134	136	0.11781	0.07108
135	137	0.04108	0.02597
136	138	0.11405	0.06853
136	139	0.00181	0.00137
137	140	0.00182	0.00136
137	141	0.02220	0.01436

137	142	0.01703	0.01022
138	143	0.02564	0.01678
141	144	0.02104	0.01365
142	145	0.00863	0.00520
143	146	0.02384	0.01542
144	147	0.01879	0.01216
146	148	0.00720	0.00547
147	149	0.01576	0.01033
148	150	0.00541	0.00410
149	151	0.00978	0.00674
150	152	0.00361	0.00274
151	153	0.00517	0.00370
152	154	0.00181	0.00138
153	155	0.00180	0.00136
153	156	0.00158	0.00098
156	157	0.00003	0.00003
110	158	0.11227	0.07451
158	159	0.11224	0.07448
159	160	0.08372	0.05266
159	161	0.02245	0.01725
160	162	0.08191	0.05157
161	163	0.01873	0.01470
162	164	0.00869	0.00634
162	165	0.06228	0.03792
162	166	0.01091	0.00727
163	167	0.01483	0.01153

164	168	0.00688	0.00498
165	169	0.05865	0.03567
166	170	0.00910	0.00591
167	171	0.00761	0.00609
167	172	0.00542	0.00408
168	173	0.00542	0.00410
170	174	0.00730	0.00453
171	175	0.00580	0.00474
172	176	0.00361	0.00271
173	177	0.00363	0.00275
174	178	0.00202	0.00137
176	179	0.00180	0.00136
177	180	0.00182	0.00139
180	181	0.00003	0.00003
114	182	0.25313	0.17814
182	183	0.25310	0.17811
183	184	0.10674	0.06700
183	185	0.11773	0.09141
184	186	0.09853	0.06207
185	187	0.11172	0.08683
186	188	0.09246	0.05756
187	189	0.03354	0.01862
187	190	0.07728	0.06762
187	191	0.00087	0.00056
188	192	0.08642	0.05304
189	193	0.03222	0.01781

190	194	0.06563	0.05890
191	195	0.00006	0.00006
192	196	0.08633	0.05295
192	197	0.00003	0.00003
192	198	0.00003	0.00003
193	199	0.03029	0.01665
195	200	0.00003	0.00003
196	201	0.01206	0.00904
199	202	0.01054	0.00632
199	203	0.01441	0.00628
201	204	0.00600	0.00453
202	205	0.00003	0.00003
203	206	0.01182	0.00472
206	207	0.00804	0.00243
207	208	0.00181	-0.00133

=====

Apêndice B – Resultados do processo de estimação para a rede do transformador 1370.

RELATÓRIO DE SAÍDA

ESTIMADOR DE ESTADO SISTEMA TESTE

Número de Barras: 28

Número de Linhas: 27

Estimador de estado pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados

RESULTADOS DO ESTIMADOR NA ITERAÇÃO 1

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)
1.0000000	0.9858465	0.0000000
2.0000000	0.9858461	-0.0000044
3.0000000	0.9840642	-0.1474899
4.0000000	0.9840258	-0.1488610
5.0000000	0.9840153	-0.1488659
6.0000000	0.9839905	-0.1501166
7.0000000	0.9839992	-0.1493237
8.0000000	0.9839441	-0.1508395
9.0000000	0.9839933	-0.1495628
10.0000000	0.9839837	-0.1496981
11.0000000	0.9839990	-0.1493300

12.0000000	0.9839128	-0.1513409
13.0000000	0.9839827	-0.1499880
14.0000000	0.9839541	-0.1500722
15.0000000	0.9839990	-0.1493300
16.0000000	0.9838975	-0.1515543
17.0000000	0.9839128	-0.1513406
18.0000000	0.9839128	-0.1513407
19.0000000	0.9839731	-0.1503764
20.0000000	0.9839990	-0.1493301
21.0000000	0.9838923	-0.1516077
22.0000000	0.9839700	-0.1504949
23.0000000	0.9839688	-0.1504841
24.0000000	0.9838901	-0.1516302
25.0000000	0.9839700	-0.1504952
26.0000000	0.9839638	-0.1506208
27.0000000	0.9839605	-0.1507331
28.0000000	0.9839604	-0.1507919

=====

RELATÓRIO DE CONVERGÊNCIA

=====

Tolerância de Convergência: 0.0010

Iteração	Mismatche
0.0000000	1.0000000
1.0000000	0.0160984
2.0000000	0.0000794

=====

DADOS DE FLUXO POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

=====

De	Para	Pkm	Qkm
----	------	-----	-----

1	2	0.253116	0.178125
2	3	0.253087	0.178096
3	4	0.106739	0.066994
3	5	0.117723	0.091406
4	6	0.098531	0.062065
5	7	0.111712	0.086827
6	8	0.092459	0.057558
7	9	0.033535	0.018615
7	10	0.077281	0.067620
7	11	0.000867	0.000560
8	12	0.086419	0.053039
9	13	0.032220	0.017806
10	14	0.065632	0.058902
11	15	0.000057	0.000059
12	16	0.086331	0.052949
12	17	0.000029	0.000029
12	18	0.000029	0.000029
13	19	0.030289	0.016645
15	20	0.000029	0.000029
16	21	0.012063	0.009041
19	22	0.010535	0.006319
19	23	0.014408	0.006280

21	24	0.005996	0.004530
22	25	0.000029	0.000029
23	26	0.011816	0.004717
26	27	0.008044	0.002427
27	28	0.001805	-0.001335

=====

Apêndice C – Resultados do processo de estimação para a rede primária com os valores de P e Q de cada transformador recebidos da plataforma embarcada.

RELATÓRIO DE SAÍDA

ESTIMADOR DE ESTADO SISTEMA TESTE

Número de Barras: 119

Número de Linhas: 118

Estimador de estado pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados

RESULTADOS DO ESTIMADOR NA ITERAÇÃO 1

Barra	Tensão (pu)	Ângulo (°)
1.0000000	1.0056390	0.0000000
2.0000000	1.0054916	-0.0075563
3.0000000	1.0054733	-0.0084427
4.0000000	1.0049917	-0.0330055
5.0000000	1.0049827	-0.0334971
6.0000000	1.0049644	-0.0343829
7.0000000	1.0048648	-0.0394947
8.0000000	1.0047272	-0.0464891

9.0000000	1.0047272	-0.0464928
10.0000000	1.0017492	-0.1989824
11.0000000	0.9978198	-0.4020841
12.0000000	0.9978196	-0.4020918
13.0000000	0.9978194	-0.4021053
14.0000000	0.9978133	-0.4021885
15.0000000	0.9977979	-0.4023849
16.0000000	0.9972348	-0.4324849
17.0000000	0.9962171	-0.4854493
18.0000000	0.9953598	-0.5301395
19.0000000	0.9946161	-0.5689556
20.0000000	0.9946160	-0.5689576
21.0000000	0.9946160	-0.5689586
22.0000000	0.9946160	-0.5689604
23.0000000	0.9941119	-0.5952638
24.0000000	0.9935963	-0.6222055
25.0000000	0.9935963	-0.6222068
26.0000000	0.9935963	-0.6222086
27.0000000	0.9935955	-0.6222411
28.0000000	0.9935952	-0.6222533
29.0000000	0.9930094	-0.6528321
30.0000000	0.9924855	-0.6802785
31.0000000	0.9919891	-0.7063066
32.0000000	0.9912073	-0.7472678
33.0000000	0.9911895	-0.7481525
34.0000000	0.9911845	-0.7484543
35.0000000	0.9908405	-0.7664666
36.0000000	0.9908403	-0.7664798

37.0000000	0.9908399	-0.7665020
38.0000000	0.9908321	-0.7669210
39.0000000	0.9908318	-0.7669351
40.0000000	0.9908314	-0.7669558
41.0000000	0.9908246	-0.7673266
42.0000000	0.9908173	-0.7677169
43.0000000	0.9908104	-0.7680917
44.0000000	0.9908048	-0.7683905
45.0000000	0.9907995	-0.7686764
46.0000000	0.9907945	-0.7689487
47.0000000	0.9907896	-0.7692086
48.0000000	0.9907890	-0.7692433
49.0000000	0.9907889	-0.7692485
50.0000000	0.9907887	-0.7692575
51.0000000	0.9907884	-0.7692732
52.0000000	0.9907881	-0.7692926
53.0000000	0.9907868	-0.7693612
54.0000000	0.9907858	-0.7694159
55.0000000	0.9907849	-0.7694643
56.0000000	0.9907841	-0.7695059
57.0000000	0.9907835	-0.7695391
58.0000000	0.9907831	-0.7695625
59.0000000	0.9907828	-0.7695782
60.0000000	0.9907827	-0.7695813
61.0000000	0.9907877	-0.7693146
62.0000000	0.9907870	-0.7693496
63.0000000	0.9907865	-0.7693787
64.0000000	0.9907863	-0.7693877

65.0000000	0.9907859	-0.7694085
66.0000000	0.9907859	-0.7694111
67.0000000	0.9906139	-0.7782585
68.0000000	0.9903873	-0.7900488
69.0000000	0.9903873	-0.7900506
70.0000000	0.9903872	-0.7900522
71.0000000	0.9903872	-0.7900525
72.0000000	0.9903872	-0.7900541
73.0000000	0.9899955	-0.8103083
74.0000000	0.9896424	-0.8285608
75.0000000	0.9893071	-0.8459495
76.0000000	0.9889719	-0.8633395
77.0000000	0.9889718	-0.8633415
78.0000000	0.9889718	-0.8633426
79.0000000	0.9889717	-0.8633487
80.0000000	0.9886399	-0.8805712
81.0000000	0.9882572	-0.9003810
82.0000000	0.9876636	-0.9076834
83.0000000	0.9876329	-0.9080979
84.0000000	0.9876160	-0.9083217
85.0000000	0.9872774	-0.9124926
86.0000000	0.9868968	-0.9171916
87.0000000	0.9867446	-0.9190507
88.0000000	0.9867446	-0.9190535
89.0000000	0.9865485	-0.9213263
90.0000000	0.9865377	-0.9214873
91.0000000	0.9865366	-0.9215058
92.0000000	0.9865355	-0.9215222

93.0000000	0.9865218	-0.9217149
94.0000000	0.9865044	-0.9219520
95.0000000	0.9862910	-0.9242541
96.0000000	0.9860355	-0.9271590
97.0000000	0.9857801	-0.9300571
98.0000000	0.9855563	-0.9333287
99.0000000	0.9853326	-0.9365935
100.0000000	0.9852411	-0.9379226
101.0000000	0.9851710	-0.9389693
102.0000000	0.9850831	-0.9402797
103.0000000	0.9849547	-0.9421824
104.0000000	0.9852410	-0.9379266
105.0000000	0.9851736	-0.9388579
106.0000000	0.9850663	-0.9403492
107.0000000	0.9849511	-0.9419471
108.0000000	0.9848350	-0.9435395
109.0000000	0.9847283	-0.9450043
110.0000000	0.9846428	-0.9461653
111.0000000	0.9865694	-0.9213520
112.0000000	0.9863503	-0.9241962
113.0000000	0.9861349	-0.9269938
114.0000000	0.9859190	-0.9297921
115.0000000	0.9865044	-0.9219524
116.0000000	0.9857801	-0.9300550
117.0000000	0.9849544	-0.9421864
118.0000000	0.9846427	-0.9461675
119.0000000	0.9859186	-0.9297965

=====

RELATÓRIO DE CONVERGÊNCIA

=====

Tolerância de Convergência: 0.0010

Iteração	Mismatche
0.0000000	1.0000000
1.0000000	0.0163758
2.0000000	0.0001516

=====

DADOS DE FLUXO POTÊNCIA ATIVA E REATIVA

=====

De	Para	Pkm	Qkm
1	2	1.00846	0.70221
2	3	1.00792	0.70195
3	4	1.00744	0.70189
4	5	1.00678	0.70109
5	6	1.00629	0.70104
6	7	1.00581	0.70099
7	8	1.00529	0.70080
8	9	0.00048	0.00003
8	10	1.00428	0.70052
10	11	1.00267	0.69575
11	12	0.01535	0.00961
11	16	0.98536	0.67984

12	13	0.01487	0.00957
13	14	0.01438	0.00954
14	15	0.01390	0.00951
16	17	0.98466	0.67888
17	18	0.98379	0.67725
18	19	0.98299	0.67587
19	20	0.00145	0.00010
19	23	0.98078	0.67457
20	21	0.00097	0.00006
21	22	0.00048	0.00003
23	24	0.98011	0.67374
24	25	0.00222	0.00031
24	29	0.97722	0.67259
25	26	0.00173	0.00028
26	27	0.00125	0.00025
27	28	0.00077	0.00022
29	30	0.97651	0.67164
30	31	0.97584	0.67078
31	32	0.97517	0.66997
32	33	0.97439	0.66872
33	34	0.97390	0.66865
34	35	0.97342	0.66861
35	67	0.95779	0.66702
35	36	0.01502	0.00103
36	37	0.01453	0.00099
37	38	0.01405	0.00096
38	39	0.01356	0.00093
39	40	0.01308	0.00089

40	41	0.01259	0.00086
41	42	0.01211	0.00083
42	43	0.01163	0.00079
43	44	0.01114	0.00076
44	45	0.01066	0.00073
45	46	0.01017	0.00069
46	47	0.00969	0.00066
47	48	0.00920	0.00063
48	49	0.00872	0.00060
49	50	0.00823	0.00056
50	51	0.00775	0.00053
51	52	0.00727	0.00050
52	53	0.00388	0.00026
52	61	0.00291	0.00020
53	54	0.00339	0.00023
54	55	0.00291	0.00020
55	56	0.00242	0.00017
56	57	0.00194	0.00013
57	58	0.00145	0.00010
58	59	0.00097	0.00007
59	60	0.00048	0.00003
61	62	0.00242	0.00017
62	63	0.00194	0.00013
63	64	0.00145	0.00010
64	65	0.00097	0.00007
65	66	0.00048	0.00003
67	68	0.95722	0.66663
68	69	0.00194	0.00013

68	73	0.95472	0.66612
69	70	0.00145	0.00010
70	71	0.00097	0.00007
71	72	0.00048	0.00003
73	74	0.95409	0.66548
74	75	0.95348	0.66491
75	76	0.95287	0.66436
76	77	0.00145	0.00010
76	80	0.95081	0.66371
77	78	0.00097	0.00007
78	79	0.00048	0.00003
80	81	0.95020	0.66317
81	82	0.94959	0.66255
82	83	0.94861	0.66200
83	84	0.94810	0.66194
84	85	0.94760	0.66189
85	86	0.94684	0.66156
86	87	0.94605	0.66119
87	88	0.00049	0.00003
87	89	0.52305	0.37381
87	111	0.42190	0.28718
89	90	0.03616	0.02294
89	95	0.48631	0.35074
90	91	0.03567	0.02291
91	92	0.03519	0.02287
92	93	0.03470	0.02284
93	94	0.03422	0.02280
95	96	0.48572	0.35059

96	97	0.48512	0.35044
97	98	0.44617	0.28729
98	99	0.44560	0.28716
99	100	0.44503	0.28704
100	101	0.24945	0.15861
100	104	0.00049	0.00003
100	105	0.19457	0.12832
101	102	0.24895	0.15856
102	103	0.24845	0.15851
105	106	0.19407	0.12827
106	107	0.19356	0.12822
107	108	0.19306	0.12816
108	109	0.19255	0.12810
109	110	0.19204	0.12805
111	112	0.42135	0.28708
112	113	0.42079	0.28696
113	114	0.42022	0.28685
94	115	0.01873	0.01183
97	116	0.00648	0.04148
103	117	0.17562	0.10693
110	118	0.11274	0.07453
114	119	0.25360	0.17816

=====