

Vanessa Batista Boone

**Minimização do custo global de Infraestrutura
de Comunicação e alocação de PMUs em
WAMS utilizando *betweenness centrality* e
dominância em grafos**

Vitória-ES

2022

Vanessa Batista Boone

**Minimização do custo global de Infraestrutura de
Comunicação e alocação de PMUs em WAMS utilizando
betweenness centrality e dominância em grafos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha

Coorientador: Profa. Dra. Marcia Helena Moreira Paiva

Vitória-ES

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

B724 m Boone, Vanessa Batista, 1987-
Minimização do custo global de Infraestrutura de Comunicação e alocação de PMUs em WAMS utilizando betweenness centrality e dominância em grafos / Vanessa Batista Boone. - 2022.
81 f. : il.

Orientador: Helder Roberto de Oliveira Rocha.
Coorientadora: Marcia Helena Moreira Paiva.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. WAMS. 2. PMUs. 3. Otimização. 4. Teoria dos grafos. 5. Observabilidade do Sistema de Potência. I. Rocha, Helder Roberto de Oliveira. II. Paiva, Marcia Helena Moreira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

Vanessa Batista Boone

Minimização do custo global de Infraestrutura de Comunicação e alocação de PMUs em WAMS utilizando *betweenness centrality* e dominância em grafos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória-ES, 20 de dezembro de 2022



Documento assinado digitalmente
MARCIA HELENA MOREIRA PAIVA
Data: 21/03/2023 08:04:06-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dra. Marcia Helena Moreira Paiva

Coorientadora

Documento assinado digitalmente



REGINALDO BARBOSA NUNES
Data: 21/03/2023 07:25:47-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dr. Reginaldo Barbosa Nunes

Instituto Federal do Espírito Santo

Examinador Externo a UFES

Documento assinado digitalmente



ELIZANDRA PEREIRA ROQUE COELHO
Data: 20/03/2023 17:04:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Dra. Elizandra Pereira Roque Coelho

Universidade Federal do Espírito Santo

Examinador Externo ao PPGEE

Vitória-ES

2022

Dedico este trabalho a Deus e minha família.

Agradecimentos

Meu primeiro agradecimento é a Deus por guardar eu e minha família durante o momento em que não tinha vacina de COVID e por ter me dado força e saúde.

Agradeço ao meu pai, Osvaldo e a minha mãe Dilce por todo apoio, suporte e incentivo. Sou grata também a minha irmã Isabella por ficar fazendo bagunça no outro quarto animando o meu dia.

Meus agradecimentos também vão para meus tios, Cristina e Marcelo e também para meu primo Richardson.

É importante também agradecer aos professores, Dr. Gilberto Costa Drumond Sousa e Dr. Marcelo Oliveira Camponêz que enviaram uma carta de recomendação para o processo seletivo de mestrado da UFES, possibilitando o início do mestrado.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha e minha co-orientadora Profa. Dra. Marcia Helena Moreira Paiva por todo aprendizado, apoio, suporte e paciência.

Reconheço também a contribuição do Labtel, UFES e a todos os professores do PPGEE (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) em especial aos professores que me instruíram dando aula durante o mestrado.

Quero manifestar minha gratidão ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte prestado ao desenvolvimento desse trabalho e também ao CAPES e FAPES.

*“Elevo meus olhos para os montes:
de onde me virá o socorro?
O meu socorro vem do Senhor,
que fez o céu e a terra.”
(Salmos 121:1-2)*

Resumo

Este trabalho apresenta um método de otimização do custo global de Infraestrutura de Comunicação (IC) e alocação de *Phasor Measurement Units* (PMUs) em *Wide Area Measurement Systems* (WAMS). A Estimação de Estado (EE) é uma ferramenta que auxilia no tratamento dos dados obtidos das medições, eliminando erros grosseiros e erros de topologia. Esta ferramenta só pode ser executada quando os dados das medições disponíveis são suficientes, portanto deve existir uma quantidade suficiente de PMUs em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) para garantir a EE. Medidas de tensão, corrente e fase em todas as barras do sistema são obtidas em tempo real a partir de dispositivos de medição instalados no SEP e com o auxílio da EE, um banco de dados seguro é fornecido para a tomada de decisão nas redes elétricas, sendo muito importante para a implantação de uma Rede Elétrica Inteligente ou *Smart Grid*. A alocação de PMUs e da IC demanda um elevado custo, sendo que a IC possui um maior impacto no custo global do WAMS. O alto impacto da IC no custo total motivou este novo método de otimização. O objetivo deste trabalho foi o de otimizar a IC e a quantidade de PMUs para obter um menor custo global, em simulações com as redes IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300. Através do conhecimento da teoria de grafos e da elaboração da alocação de PMUs como um problema de Conjunto Dominante Conexo Adaptado foi possível otimizar o custo total. Dessa forma, uma nova métrica a ponderada foi proposta e utilizada com a *Betweenness Centrality*. Além da *Betweenness Centrality* dois algoritmos bastante comuns na teoria de grafos foram usados no processo de otimização. O algoritmo de *Dijkstra* que encontra os menores caminhos entre os vértices e o algoritmo de *Kruskal* que pesquisa uma árvore geradora mínima para um grafo ponderado conexo, foram utilizados para compor a simulação. O algoritmo desenvolvido conseguiu reduzir o custo global dos SEPs testados.

Palavras-chave: WAMS, PMUs, Otimização, Teoria dos grafos e Observabilidade do Sistema de Potência.

Abstract

This work presents a method for optimizing the global cost of Communication Infrastructure (CI) and allocation of *Phasor Measurement Units* (PMUs) in *Wide Area Measurement Systems* (WAMS). State Estimation (SE) is a tool that helps in the treatment of data obtained from measurements, eliminating gross errors and topology errors. This tool can only be run when the available measurement data is sufficient, therefore there must be a sufficient amount of PMUs in an Electric Power System (EPS) to guarantee SE. Voltage, current and phase measurements on all system buses are obtained in real time from measuring devices installed in the EPS and with the help of the SE, a secure database is provided for decision-making in electrical networks, being very important for the implementation of a *Smart Grid*. The allocation of PMUs and CI demands a high cost, and CI has a greater impact on the overall cost of the WAMS. The high impact of CI on total cost motivated this new optimization method. The objective of this work was to optimize the CI and the number of PMUs to obtain a lower overall cost, in simulations with the IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 and IEEE-300 networks. Through the knowledge of graph theory and the elaboration of the allocation of PMUs as an Adapted Connected Dominant Set problem, it was possible to optimize the total cost. Thus, a new weighted metric was proposed and used with *Betweenness Centrality*. In addition to *Betweenness Centrality*, two algorithms quite common in graph theory were used in the optimization process. *Dijkstra's* algorithm that finds the shortest paths between vertices and *Kruskal's* algorithm that searches for a minimal spanning tree for a connected weighted graph, were used to compose the simulation. The developed algorithm was able to reduce the overall cost of the SEPs tested.

Keywords: *Wide Area Measurement Systems, Phasor Measurement Units, Optimization, Graph theory, Power System Observability.*

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma sobre o capítulo 2 (Fonte: Própria autoria)	22
Figura 2 – Fluxo de dados transmitidos das PMUs para os PDCs (Fonte: Adaptada da página da Siemens)	24
Figura 3 – O <i>hardware</i> interno da PMU (Fonte: Adaptado de (HOJABRI et al., 2019))	26
Figura 4 – Tipos de tecnologias de comunicação disponíveis para aplicações em sincrofasores (Fonte: Própria autoria)	28
Figura 5 – As etapas da Estimaco de Estado (Fonte: Própria autoria)	31
Figura 6 – Alocaco de PMUs na rede eltrica IEEE-14 (Fonte: Própria autoria)	36
Figura 7 – Exemplo de um grafo (Fonte: Própria autoria)	38
Figura 8 – Exemplo de um grafo ponderado (Fonte: Própria autoria)	40
Figura 9 – Exemplo de um grafo e seu subgrafo (Fonte: Própria autoria)	40
Figura 10 – Exemplo de uma árvore ponderada (Fonte: Própria autoria)	41
Figura 11 – Exemplo de uma floresta ponderada (Fonte: Própria autoria)	42
Figura 12 – Exemplos de um CD e um CDM respectivamente (Fonte: Própria autoria)	43
Figura 13 – Exemplos de um CDC e um CDCM respectivamente (Fonte: Própria autoria)	44
Figura 14 – Exemplos de um CDC adaptado e um CDCM adaptado respectivamente (Fonte: Própria autoria)	44
Figura 15 – A mtrica <i>betweenness centrality</i> na rede IEEE-14 (Fonte: Própria autoria)	46
Figura 16 – Grafo ponderado com a distância do menor caminho entre os vrtices 1 e 5 aps aplicaco do algoritmo de Dijkstra (Fonte: Própria autoria)	47
Figura 17 – rvore geradora mnima (Fonte: Própria autoria)	48
Figura 18 – Grafo ponderado aplicado ao algoritmo de Kruskal (Fonte: Própria autoria)	49
Figura 19 – Aplicaco do algoritmo de Kruskal em um grafo ponderado (Fonte: Própria autoria)	50
Figura 20 – Fluxograma referente as estratgias de grafos utilizadas para alocaco de PMUs e IC (Fonte: Própria autoria)	51
Figura 21 – <i>Betweenness</i> de cada vrtice da rede IEEE-30 (Fonte: Própria autoria)	56
Figura 22 – Rede IEEE-14 considerando ZIB (Fonte: Própria autoria)	58
Figura 23 – Rede IEEE-14 considerando perda de PMU (Fonte: Própria autoria)	59
Figura 24 – AOP e IC para rede IEEE-14 em condicoes normais (Fonte: Própria autoria)	61
Figura 25 – AOP e IC para rede IEEE-30 em condicoes normais (Fonte: Própria autoria)	62

Figura 26 – Alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-118 em condições normais (Fonte: Própria autoria)	63
Figura 27 – AOP e IC para a rede IEEE-14 na presença de ZIB (Fonte: Própria autoria)	65
Figura 28 – AOP e IC para a rede IEEE-30 na presença de ZIB (Fonte: Própria autoria)	65
Figura 29 – AOP e IC para a rede IEEE-118 na presença de ZIB (Fonte: Própria autoria)	66
Figura 30 – Alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-14 com perda de PMU (Fonte: Própria autoria)	68
Figura 31 – Alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-30 com perda de PMU (Fonte: Própria autoria)	69
Figura 32 – Alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-118 com perda de PMU (Fonte: Própria autoria)	71
Figura 33 – Gráfico do Custo total normalizado em relação a porcentagem da média da métrica ponderada (Fonte: Própria autoria)	72

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tabela com o grau de cada vértice do grafo da Figura 7	39
Tabela 2 – Tabela com custo de PMU e OPGW	60
Tabela 3 – Resultado para o sistema IEEE-14 barras em condições normais	60
Tabela 4 – Resultado para o sistema IEEE-30 barras	61
Tabela 5 – Resultado para o sistema IEEE-118 barras	62
Tabela 6 – Resultado para o sistema IEEE-300 barras em condições normais	64
Tabela 7 – Resultado de redução (%) dos custos totais para situações normais de operação	64
Tabela 8 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-14 barras	64
Tabela 9 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-30 barras	64
Tabela 10 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-118 barras	67
Tabela 11 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-300 barras	67
Tabela 12 – Resultado de redução (%) dos custos totais com ZIB	67
Tabela 13 – Resultado para o sistema IEEE-14 barras com perda de PMU	68
Tabela 14 – Resultado para o sistema IEEE-30 barras com perda de PMU	69
Tabela 15 – Resultado para o sistema IEEE-118 barras	70
Tabela 16 – Resultado para o sistema IEEE-300 barras com perda de PMU	70
Tabela 17 – Resultado de redução (%) dos custos totais considerando perda de PMU	70

Lista de abreviaturas e siglas

AOP	Alocação Ótima de PMUs
BWC	<i>Betweenness Centrality</i>
CD	Conjunto Dominante
CDC	Conjunto Dominante Conexo
CDCM	Conjunto Dominante Conexo Mínimo
CDM	Conjunto Dominante Mínimo
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
EE	Estimação de Estado
IC	Infraestrutura de Comunicação
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LIT	Literatura
MST	<i>Minimum Spanning Tree</i>
MTU	<i>Master Terminal Units</i>
OPGW	<i>Optical Power Ground Wire</i>
PDC	<i>Phasor Data Concentrator</i>
PLC	<i>Power Line Communication</i>
PMU	<i>Phasor Measurement Unit</i>
PRO	Proposto
RTU	<i>Remote Terminal Unit</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SGE	Sistema de Gerenciamento de Energia
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
WAMS	<i>Wide Area Measurement System</i>
ZIB	<i>Zero Injection Bus</i>

Lista de símbolos

$=$	Igualdade
\geq	Maior ou igual
\leq	Menor ou igual
\forall	Para todo
\in	Pertence
\exists	Existe
Σ	Somatório
n	Número de barras na rede
cp_i	Custo de alocação de PMU na barra i
cf	Custo de OPGW por km
cr	Custo dos dispositivos ativos, como roteadores e <i>switches</i> , alocados em todas as barras com PMUs
X	Vetor de decisão binária para a colocação de PMU cujos elementos x_i são definidos como um se uma PMU for colocada na barra i , e zero em caso contrário
A	Matriz de adjacência da rede
d_{ij}	Distância em km entre as barras i e j
y_{ij}	Assume o valor 1 se uma linha existente for selecionada para integrar a rede de comunicação OPGW

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	17
1.2	Trabalhos Relacionados	18
1.3	Principais Contribuições	20
1.4	Objetivos Gerais e Específicos	20
1.5	Estrutura da Dissertação	21
2	ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE ÁREA AMPLA	22
2.1	Sistemas de Medição de Área Ampla	23
2.2	Estimação de Estado	30
2.3	Análise de Observabilidade	34
2.3.1	Análise de Observabilidade Numérica	34
2.3.2	Análise de Observabilidade Topológica	35
3	CONCEITOS DE TEORIA DOS GRAFOS APLICADOS A ALOCAÇÃO ÓTIMA DE PMUS (AOP)	38
3.1	Conjunto Dominante	42
3.2	Conjunto Dominante Mínimo	42
3.3	Conjunto Dominante Conexo	43
3.4	Conjunto Dominante Conexo Mínimo	43
3.5	Conjunto Dominante Conexo Adaptado	44
3.6	Conjunto Dominante Conexo Mínimo Adaptado	45
3.7	As métricas de centralidade	45
3.7.1	A métrica betweenness centrality	45
3.8	Algoritmo de Dijkstra	46
3.9	Árvore Geradora Mínima	47
3.9.1	Árvore Geradora Mínima de Kruskal	48
4	METODOLOGIA	51
4.1	Formulação do Problema	52
4.1.1	Operações em condições normais	52
4.1.2	Operações em caso de perda de PMU	53
4.2	Estratégias de grafos para AOP em condições normais	54
4.3	Estratégias de grafos para AOP na presença de ZIB	56
4.4	Estratégias de grafos para AOP em condições de perda de PMU	58

5	TESTES E RESULTADOS	60
5.1	Resultados para AOP em condições normais	60
5.2	Resultados para AOP na presença de ZIB	64
5.3	Resultados para AOP em condições de perda de PMU	67
5.4	Porcentagem da média da métrica ponderada e o Custo Total	70
6	CONCLUSÃO	73
6.1	Trabalhos Futuros	74
	REFERÊNCIAS	75

1 Introdução

Em razão da crescente demanda de consumo de energia elétrica, existe uma necessidade da ampliação da geração de energia. A utilização de fontes de energias renováveis para geração de energia elétrica é uma ótima opção para garantir a segurança energética (NOTTON et al., 2018). Entende-se que as fontes de energias renováveis são fontes intermitentes. Quando uma fonte de energia tem um aspecto intermitente, a produção de energia ocorre apenas no instante em que o recurso utilizado para a geração de energia estiver disponível. Ou seja, a sua geração de energia elétrica por via de uma fonte intermitente não será constante ao longo do dia.

Os Sistemas de Gerenciamento de Energia (SGE) precisam ser competentes, para que haja uma eficiência no funcionamento das redes elétricas que compõem a geração distribuída e renovável (LEITE, 2015). Portanto, a implementação de um monitoramento eficaz dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) pode contribuir para a expansão da geração de energia elétrica através de fontes de energias renováveis (BUTT; ZULQARNAIN; BUTT, 2021). Os sistemas inteligentes asseguram controle, proteção, intervenção remota e também possuem a capacidade de identificar, quase que instantaneamente, problemas dos SEP (SIANO, 2014). Esses sistemas inteligentes de medição e controle são constituídos de Unidades de Medição Fasoriais (UMFs) ou *Phasor Measurement Units* (PMUs), fundamentais para assegurar confiabilidade nas medições do SEP.

Dados de tensão e corrente são medidos e sincronizados em tempo real pelas PMUs (XU; ABUR, 2004). A disponibilização desses medidores em quantidades suficientes garantem a Estimação do Estado (EE) do SEP (GÓMEZ; RIOS, 2013). Após a execução da EE é possível assegurar a legitimação do monitoramento de sistemas de potência. Através da EE é possível detectar e corrigir erros nas medições e com isso uma reação rápida na decisão de medidas preventivas (ROCHA; SOUZA; FILHO, 2013). A PMU é um importante equipamento de medição de Sistema de Medição de Área Ampla ou *Wide-area Measurement System* (WAMS)(FAN et al., 2018), (HAYERIKHIYAVI; DIMITROVSKI, 2021).

A integração de tecnologias de medição avançada, ferramentas de informação e infraestrutura operacional presentes no WAMS facilitam a compreensão do comportamento dos grandes sistemas de potência (FESHARAKI FARIBORZ E HOOSHMAND,). O WAMS pode complementar o sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) convencional da rede ou pode ser usado como uma infraestrutura autônoma (ANJIA; JIAXI; ZHIZHONG, 2005). Os componentes essenciais do WAMS são as PMUs, os concentradores de dados dos fasores ou *Phasor Data Concentrator* (PDC), o *Global*

Positioning System (GPS) para sincronização de tempo dos fasores, canal de comunicação e os aplicativos (*softwares*) no centro de controle (APPASANI; MOHANTA, 2018a).

Existem diversos sistemas de comunicação. As tecnologias de comunicação podem conter fio ou não. Entre as tecnologias com fio estão inseridas o *Power Line Communication* (PLC) e a fibra ótica e entre as sem fio estão o rádio, celular, micro-ondas, satélite (SEGATTO et al., 2018). O emprego da tecnologia mais apropriada depende da condição necessária para uma rápida transmissão de dados de modo confiável. Dependendo das características dos dados e a distância a serem transmitidos, as tecnologias empregadas para a comunicação podem ser ou não vantajosas. A comunicação de dados para sincrofases exige baixa latência, largura de banda elevada, alta taxa de transferência e confiabilidade (KUMAR; SONI; JAIN, 2014).

A fibra ótica *Optical Power Ground Wire* (OPGW) possui todas as características necessárias para a transmissão de dados de sincrofases. A OPGW possui uma sustentação tubular com fibra ótica, contornada por camadas de fio de aço e alumínio. Em consequência de ser muito eficiente para a transmissão de dados e livre de influências eletromagnéticas, a OPGW é utilizada com muita frequência nas redes elétricas inteligentes (GHASEMKHANI et al., 2016). Os requisitos de baixa latência, confiabilidade, alta largura de banda e taxa de transferência de dados elevada, presentes na fibra ótica são adequados para o funcionamento do WAMS.

Este trabalho propõe uma simulação de otimização de Alocação Ótima de PMUs (AOP) e da Infraestrutura de Comunicação (IC) através de conceitos da teoria de grafos. Na simulação foi elaborada a construção de um conjunto dominante conexo adaptado das redes IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300, com a utilização de grafo ponderado, sendo que os vértices representam as PMUs e as arestas os cabos OPGW. A construção do conjunto dominante conexo adaptado tem o objetivo de minimizar o preço da infraestrutura de comunicação de modo que o conjunto dominante conexo adaptado satisfaça a condição de menor custo total.

1.1 Motivação

O surgimento das redes elétricas inteligentes possibilitou a modernização e eficiência dos Sistemas Elétricos de Potência. A otimização de PMUs e da Infraestrutura de Comunicação contribuem para a economia dos sistemas inteligentes. Com a finalidade de diminuir o custo global, deve-se economizar a quantidade de PMUs e também o custo da IC. Vale ressaltar que o preço do OPGW por km é bem mais elevado que o preço da unidade da PMU, portanto otimizar a IC tem bastante relevância no custo total. Estudos e pesquisas sobre redução dos custos de redes elétricas inteligentes contribuem para o crescimento da implantação desses sistemas inteligentes. Uma IC bem planejada ajuda no

progresso do WAMS no SEP e causa bastantes benefícios como:

- Oferecer suporte de forma confiável e robusta para a expansão da capacidade de fornecimento de eletricidade, mediante a crescente demanda;
- Manter-se em funcionamento em situações de catástrofe ou de desastres naturais;
- Antecipar e responder a perturbações no sistema mediante reconfiguração automática;
- Suportar a expansão da utilização de veículos elétricos e do uso de fontes intermitentes.

1.2 Trabalhos Relacionados

Introduzido por (SCHWEPPE; WILDES, 1970) na década de 70, o conceito de EE foi fundamental para o aumento da confiabilidade dos dados de medições obtidos nos SEP. A EE contribui para a análise de observabilidade do sistema, para a eliminação dos erros grosseiros, erros de precisão, erros causados por ruídos gaussianos e também auxilia no tratamento dos dados na ausência de medidas em algum local da rede e em caso de mudanças de topologia na rede. As Unidades Terminais Remotas (UTRs) ou *Remote Terminal Units* (RTUs) por não apresentarem sincronismo e medições em tempo real necessitam bastante da EE para identificar falhas e erros em sistemas elétricos de potência. A EE processa os dados do sistema SCADA e colabora na estimativa do estado de operação do sistema de elétrico. O SCADA ainda é utilizado em sistemas elétricos de potência, porém com o desenvolvimento de novas tecnologias surgiu o WAMS, sendo este mais robusto e confiável para o monitoramento dos SEP.

Em 1988, a equipe de pesquisa da Virginia Tech desenvolveu o primeiro protótipo de PMU (PHADKE, 2002). Esses dispositivos realizam a sincronização por GPS e definem os valores tensão e corrente através dos sinais coletados em transformadores de uma determinada subestação. Algumas peculiaridades das PMUs são responsáveis por qualidades como maior taxa de amostragem, maior precisão e um rápido sincronismo de medições (JOSHI; VERMA, 2021). Devido a essas qualidades, as medições das PMUs capturam as condições da rede com grande precisão e oferecem informações sobre a estabilidade da rede ou outros tipos de estresse, aumentando a confiabilidade e a eficiência da rede (BECEJAC TAMARA E KEZUNOVIC, 2017). Como consequência dessas qualidades, a EE obtida pelas medições das PMUs é bastante eficaz aos SEP (BASHIAN et al., 2019).

Diversas técnicas podem ser utilizadas para resolver o problema de alocação de PMUs para observabilidade do sistema elétrico (ABDELSALAM; ABDELAZIZ, 2020) e (AHMED et al., 2022). Existem os métodos matemáticos e os métodos meta-heurísticos para a resolução do problema de AOP (JOHNSON; MOGER, 2021). Entre os métodos

matemáticos, o problema de AOP pode ser tratado com a Programação Linear Inteira (ZANGHI, 2019), a Programação Binária Semi-Definida (BSDP) (MANOUSAKIS; KORES, 2020) e Mixed-Integer Linear Programming (RUBEN et al., 2020) e (OKENDO; WEKESA; SAULO, 2021). Em relação aos métodos meta-heurísticos existem a Busca Gravitacional Binária (SINGH; SINGH, 2017), o Algoritmo Genético (ABDULKAREEM; OGBE; SOMEFUN, 2021), o Algoritmo Genético Binário (BASHIAN; ASSILI; ANVARI-MOGHADDAM, 2020), o Algoritmo de Busca Gravitacional (GSA) (SINGH; SINGH, 2015), a Otimização de Enxame de Partículas (PSO) (WANG; LI; ZHANG, 2012) e a Busca Tabu (TS) (KOUTSOUKIS et al., 2013). Além dos métodos matemáticos e métodos meta-heurísticos há também vários trabalhos relacionados a AOP (ZHAO et al., 2019), utilizando algoritmos de observabilidade numérica como (ABUR; MAGNAGO, 1999) e outros com algoritmos de observabilidade topológica. O pioneiro a introduzir algoritmos topológicos para análise de observabilidade foi (BALDWIN et al., 1993). A análise de observabilidade topológica para a AOP provou ser mais vantajosa, pelo fato de ser mais simples e de possuir menor tempo computacional (CRUZ et al., 2019). A teoria de grafos é geralmente aplicada para a formulação de algoritmos topológicos.

Os conceitos de teoria dos grafos foram empregados para a construção da observabilidade topológica neste trabalho. Dentre esses conceitos estão as métricas de centralidade, que podem ser aplicadas em problemas de AOP em sistemas elétricos de potência. A *Betweenness Centrality* (SALEH; ESA; MOHAMED, 2018) é uma das métricas mais úteis para o problema de AOP, ela colabora para a economia de custos da IC, porque contribui para a seleção de vértices onde há os menores caminhos em um grafo. A métrica *Betweenness Centrality* auxiliou na seleção de vértices visando construir um conjunto dominante conexo adaptado (SHAHRAEINI; KOTZANIKOLAOU; NASROLAHI, 2022), técnica que pode ser empregada em monitoramento de sistemas de potência (LIAO et al., 2015).

Como este algoritmo é topológico e tem o objetivo de alcançar o menor custo global, utilizou-se neste trabalho o algoritmo de Kruskal, um algoritmo gerador de árvore mínima. Frequentemente algoritmos geradores de árvore são utilizados para a construção da observabilidade topológica (MANDAVA; VANISHREE; RAMESH, 2015). O algoritmo de Kruskal com o de Dijkstra foram essenciais para a simulação da IC, proporcionando uma árvore com menores caminhos entre os vértices.

Devido ao elevado impacto do preço da IC no problema de AOP, alguns trabalhos pesquisaram sobre a redução do custo global da WAMS, contando não apenas com a quantidade de PMUs como também com o gasto de OPGW (CRUZ et al., 2022). O trabalho de (MOHAMMADI; HOOSMAND; FESHARAKI, 2016) é um dos trabalhos que aborda sobre a otimização global de WAMS com a inclusão do preço da IC. Outro trabalho de extrema relevância e utilizado como referência de comparação dos resultados

é o trabalho de (CRUZ et al., 2019), que além de abordar o custo com PMUs e OPGW considerando operações em condições normais, também aborda considerando ZIB (*Zero Injection Bus*) (ABDELKADER MOHAMED E SELIM,) e perda de PMUs.

1.3 Principais Contribuições

Neste estudo desenvolveu-se um novo método de otimizar o custo global do WAMS, atendendo o custo de instalação de OPGW e da quantidade de PMUs. Realizou-se então a simulação de um conjunto dominante conexo adaptado, sendo que os vértices do grafo representam as PMUs e as arestas os cabos OPGW. A partir do trabalho (CRUZ et al., 2019), percebeu-se que nem sempre as simulações que resultavam em um sistema observável com menor quantidade de PMUs reproduziam um custo reduzido. Ou seja, a simulação de um conjunto dominante conexo pode propiciar um custo menor do que a de um conjunto dominante conexo mínimo. A utilização de um conjunto dominante conexo adaptado pode melhorar ainda mais os resultados dos custos, pois permite a supressão de vértices ou arestas do conjunto dominante conexo possibilitando um resultado com custos inferiores, portanto, foi elaborada a simulação de conjuntos dominantes conexos adaptados. Foi elaborada a métrica ponderada e também foi empregado o uso da métrica *Betweenness Centrality*. Além disso, o presente trabalho permitiu a publicação do seguinte artigo em congresso nacional:

- Boone, V. B.; Cruz, M. A. R. S.; Paiva, M. H. M.; Rocha, H. R. O. "**Minimizando o custo global de Infraestrutura de Comunicação e alocação de PMUs em WAMS: uma abordagem via grafos**". Em: *SBSE*, 2022, Santa Maria-RS.

1.4 Objetivos Gerais e Específicos

O propósito deste trabalho é apresentar uma nova resolução para a alocação de PMUs com uma otimização do custo total em uma rede elétrica de transmissão. Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- Utilização da teoria de grafos para a construção de um Conjunto Dominante Conexo Adaptado.
- Utilizar a métrica *betweenness* para alocar PMUs.
- Propor e utilizar uma nova métrica denominada ponderada para alocar PMUs.
- Utilizar os algoritmos de Kruskal e Dijkstra para a simulação da IC.

- Otimizar a Infraestrutura de Comunicação (IC), visando um custo global mínimo e ratificar a importância da redução do custo da IC.
- Solução de otimização em condições normais de operação.
- Solução de otimização considerando ZIB.
- Solução de otimização considerando situações para perda de PMU.

1.5 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada da seguinte forma:

- No Capítulo 2 contém informações sobre o WAMS e seus componentes, assuntos referentes ao processo de EE e em seguida sobre a análise de observabilidade no SEP e a diferenciação entre a observabilidade topológica e a numérica.
- No Capítulo 3 são discutidos assuntos sobre teoria dos grafos, fundamentais para a elaboração desta dissertação.
- No Capítulo 4 referente a Metodologia, contém informações importantes sobre as equações, além de abordar sobre as estratégias de grafos empregadas para as condições normais, com ZIB e perdas de PMU.
- O Capítulo 5 é referente aos Testes e Resultados obtidos neste trabalho.
- No Capítulo 6 é apresentada a Conclusão deste trabalho.

2 Estimação de Estado em Sistemas de Medição de Área Ampla

Neste capítulo peculiaridades sobre o funcionamento do WAMS ou sistema de medição de áreas amplas são abordadas. No fluxograma da Figura 1 estão descritos de forma resumida o conteúdo que abrange este capítulo. Em sistemas de medição de áreas amplas foi explicado de forma simplificada o funcionamento interno da PMU, sobre as funções básicas dos PDCs e também foi relatado porque se utilizou a fibra ótica com base nas características que a infraestrutura de comunicação do WAMS tem que ter para uma rápida transmissão de dados. Em estimação de estado relatou-se sobre o processo de estimação de estado, ferramenta responsável pelas estimativas, tratamento dos dados de medições do WAMS e eliminação de eventuais erros grosseiros ou de topologia. Dentre as etapas da estimação de estado destaca-se a análise de observabilidade porque nessa etapa os dados das medições disponíveis são verificados se eles são suficientes para executar a estimação de estado. Existem 2 tipos de análise de observabilidade, a numérica e a topológica. A numérica é identificada através dos cálculos da matriz Jacobiana ou da matriz de Ganho e a topológica utiliza a teoria dos grafos.

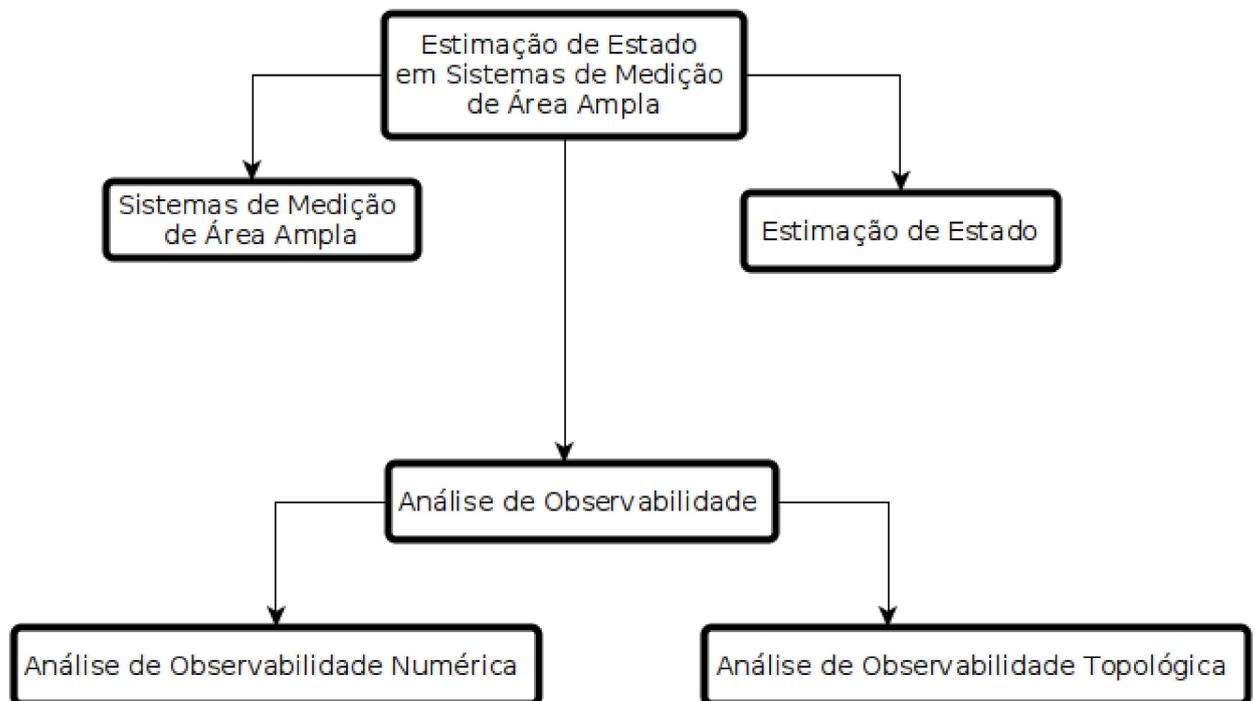


Figura 1 – Fluxograma sobre o capítulo 2 (Fonte: Própria autoria)

Atualmente os dois principais sistemas de medição nos SEPs são o SCADA e o

WAMS (CONGSCHAN et al., 2013). O SCADA foi fundamental para a revolução digital (ZANGHI, 2019). É um sistema constituído de unidades terminais remotas RTU (*Remote Terminal Unit*), infraestrutura de comunicação e unidades terminais-mestre ou MTU (*Master Terminal Units*) (AHMED; SOO, 2008) e (ROOP, 2015). O sistema de comunicação utilizado pode ser PLC ou sinais via rádio para a transmissão de dados (AFRAM; MARIE, 2022). As RTUs ficam localizadas nas subestações e fornecem os valores de tensão, potência ativa e reativa, posição do comutador e a do disjuntor (KALLURI et al., 2016). Através de um protocolo para comunicação das RTUs os dados medidos pelas mesmas são enviados para as MTUs que estão localizadas no centro de controle (LOPEZ et al., 2015). Após os dados serem enviados, os softwares ou aplicativos inclusos nas MTUs, verificam a fase do sinal, reduzem o erro do sinal e enviam os dados obtidos.

Entretanto, existem algumas desvantagens na utilização do sistema SCADA (ZAMANI et al., 2021). Uma dessas desvantagens é a demora na atualização de dados do SCADA que é alta, logo os dados não são medidos em tempo real e a taxa de amostragem das RTUs é defasada, refletindo no seu alto atraso de transmissão e baixa precisão. Outra desvantagem é que os dados das medições das RTUs são enviados sem sincronismo, impossibilitando a disponibilização do ângulo de fase, que permite detectar formas de ondas anormais, fator importante para identificar alguma falta de estabilidade do SEP.

2.1 Sistemas de Medição de Área Ampla

O estado operacional do sistema de energia pode ser monitorado de forma mais eficaz se os dados do SCADA forem complementados pelo WAMS (ANJIA; JIAXI; ZHIZHONG, 2005). Ao contrário das medições no SCADA, as medições fasoriais em um WAMS são valores sincronizados com alta taxa de amostragem (PHADKE; THORP; KARIMI, 1986). Portanto, o WAMS pode melhorar o desempenho dos SEPs por apresentar a capacidade de avaliação de estabilidade do sistema de energia, permitir a localização de falhas via internet, detecção de interrupção de linha e monitoramento de dados em tempo real (MOHAMMADI et al., 2017). Essas características possibilitam que haja um controle baseado em tempo real, provendo ações corretivas com base nos dados das medições.

Entre os componentes que integram o WAMS estão as PMUs, GPS, PDCs, canais de comunicação, centro de controle e *softwares* do centro de controle (AHLAWAT et al., 2020). As medidas são coletadas por diversas PMUs nas subestações e também ocorre a sincronização dessas medidas pelas PMUs com o auxílio do sinal do GPS (JOSHI; VERMA, 2021). Os dados fornecidos pelas PMUs são transmitidos através da rede de comunicação para os PDCs que armazenam e organizam esses dados (KANABAR; ADAMIAK; RODRIGUES, 2013). Em seguida, esses dados são transmitidos para o centro de controle do SEP.

A arquitetura do WAMS desempenha um papel importante nesses sistemas de monitoramento de dados em tempo real. Uma seleção adequada da arquitetura empregada para o funcionamento do WAMS ajuda imensamente a alcançar os benefícios da tecnologia WAMS, como o aumento da estabilidade e confiabilidade da rede. A arquitetura do WAMS pode dispor de uma configuração centralizada, descentralizada ou distribuída (RAO et al., 2019). Consoante a Figura 2 percebe-se que a arquitetura adotada foi a arquitetura centralizada, porém, com *Phasor Data Concentrator* (PDCs) distribuídos. Os PDCs são distribuídos e existe um PDC central que contribui para que os dados sejam tratados de forma mais robusta ao chegarem no centro de controle (ASHOK; YADAV; ABDELAZIZ, 2021).

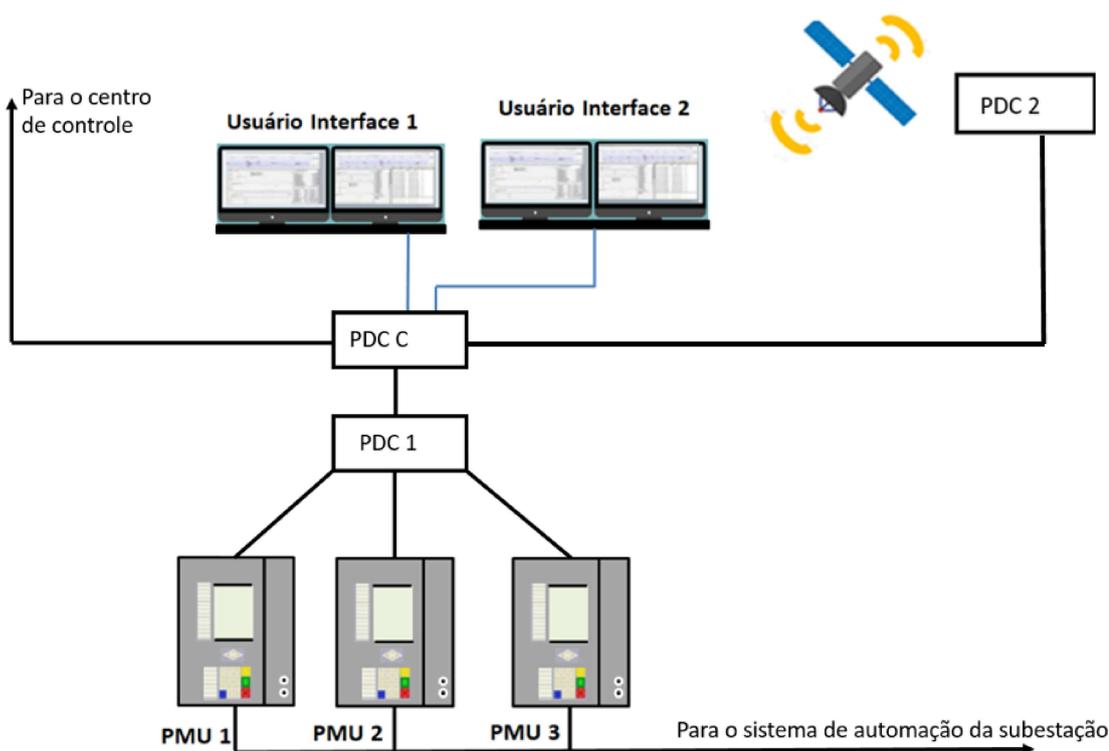


Figura 2 – Fluxo de dados transmitidos das PMUs para os PDCs (Fonte: Adaptada da página da Siemens)

O *hardware* interno da PMU consiste em filtros *anti-aliasing*, conversores A/D, oscilador de bloqueio de fase, microprocessador de fasor, receptor GPS e um módulo de comunicação (AHLAWAT et al., 2020). O funcionamento da PMU pode ser explicado de modo simplificado nas seguintes etapas:

- **Entrada Analógica:** Na entrada analógica da PMU ocorre as coletas dos sinais de tensão e corrente no enrolamento secundário dos transformadores de potencial e de corrente, esses transformadores são empregados em subestações (AHLAWAT et al., 2020).

- Filtro *anti-aliasing*: O filtro *anti-aliasing* é um filtro passa-baixa analógico, usado para eliminar erro do sinal obtido na entrada analógica da PMU, ele filtra o sinal eliminando os componentes com frequências maiores ou iguais à metade da taxa de Nyquist. A taxa de Nyquist é uma taxa de amostragem com valor igual a duas vezes o componente de frequência mais alta do sinal analógico de entrada (PHADKE; BI, 2018).
- Oscilador de bloqueio de fase: O oscilador de bloqueio de fase com a fonte de referência do Sistema de Posicionamento Global fornece uma amostragem sincronizada de alta velocidade necessária para o funcionamento da PMU (PHADKE; THORP, 2006).
- Conversor A/D: No conversor ocorre a conversão do sinal analógico para sinal digital, um sinal analógico de tempo contínuo é convertido em um sinal digital de tempo discreto. Existe a necessidade de definir uma taxa de amostragem para a conversão do sinal analógico em sinal digital. Nesse processo de conversão normalmente ocorre uma pequena quantidade de erro (THOLOMIER; KANG; CVOROVIC, 2009).
- Receptor GPS: O receptor recebe o sinal emitido pelo GPS e fornece um sinal de tempo sincronizado bastante preciso, através da frequência com que os pulsos são emitidos pelo sistema GPS. Devido ao sinal de sincronização de tempo muito preciso, os registros de tensão e corrente de diferentes subestações podem ser exibidos diretamente no mesmo eixo de tempo e no mesmo diagrama fasorial (PHADKE; THORP, 2006).
- Microprocessador de fasor: O microprocessador da PMU, realiza todas as ações importantes como determinação de amplitude, de fase e usa a coordenada de tempo universal (UTC) do GPS para calcular a frequência (THOLOMIER; KANG; CVOROVIC, 2009). No microprocessador, são calculadas as estimativas de sequência positiva de todos os sinais de corrente e tensão (ZAMANI et al., 2021).
- Módulo *Comm*: É o módulo de comunicação da PMU, cuja função é produzir um sinal que possa ser transmitido e decodificado para fazer uma réplica dos dados digitais originais e em seguida os dados são enviados para os PDCs (ZAMANI et al., 2021).

A Figura 3 mostra o hardware interno da PMU e seus componentes.

Antes dos dados coletados pelas PMUs serem enviados para o centro de controle do sistema elétrico de potência, eles são armazenados e organizados com base no registro de data e hora do GPS pelos PDCs. Os principais encargos de um PDC no WAMS são (CASTELLO et al., 2019):

- recepção das medições efetuadas pelas PMUs;

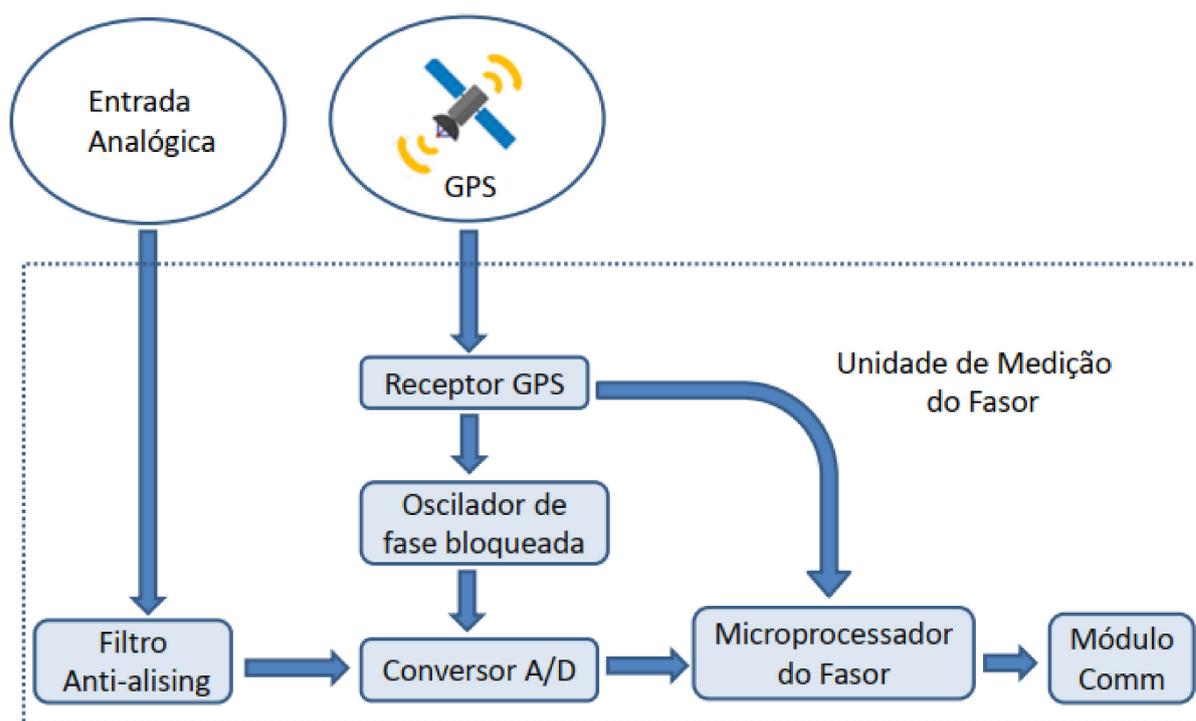


Figura 3 – O *hardware* interno da PMU (Fonte: Adaptado de (HOJABRI et al., 2019))

- controle em tempo real;
- armazenamento das medições em uma base de dados própria;
- manipulação de eventuais erros de transmissão;
- monitoramento e suporte para aplicações *on-line* e *off-line*;
- executar a organização das medidas fasoriais disponibilizadas pelas unidades de medição fasorial;
- disponibilização das medidas fasoriais para o uso de controle em situações de pequenas perturbações, controle para casos de emergência e localização de faltas.

Como os dados são enviados via rede de comunicação, a IC tem um grande impacto na construção do WAMS. Os aspectos dos meios de transmissão desempenham um papel importante na infraestrutura de comunicação da rede elétrica. Aplicações de sincrofasores exigem alta confiabilidade do canal de comunicação para fornecer medição ininterrupta de dados, ajudando os operadores do sistema no monitoramento do estado da rede elétrica moderna em tempo real (MAHESWARI; VANITHA; LOGANATHAN, 2021). As principais características dos meios de comunicação que influenciam na escolha da tecnologia responsável pela transferência de dados dos sincrofasores no WAMS são (KUMAR; SONI; JAIN, 2014):

- taxa de transferência

A taxa de transferência é determinada pela medição da velocidade de transferência de dados em um momento específico. Entre os fatores primários no projeto do sistema de comunicação do WAMS, deve-se incluir a taxa de transferência para garantir a construção de um canal de comunicação confiável. Se a taxa de transferência do canal de comunicação não aumentar conforme o acréscimo de PMUs a comunicação pode sofrer um atraso considerável, acarretando um problema na transmissão de dados do sistema de medição.

- largura de banda

Para garantir a transferência de grandes volumes de dados de sincrofasores no WAMS é necessária uma ampla largura de banda dos métodos de comunicação adotados para aplicações de sincrofasores. A largura de banda é definida como a quantidade de dados que podem ser enviados por uma conexão de rede específica por unidade de tempo. A infraestrutura de comunicação das PMUs deve ter alta largura de banda para suportar a abundância de dados de medição e monitoramento do sistema de energia.

- latência

A latência ou atraso de tempo é um dos requisitos mais rigorosos para o sistema de comunicação no WAMS. O atraso de tempo pode ser causado por alguns fatores como: alinhamento de dados, distúrbios de comunicação, atrasos do transdutor, atrasos de propagação, atrasos de processamento e de transmissão do link de comunicação. O WAMS precisa de baixa latência para suportar o controle e proteção de resposta em tempo real.

- confiabilidade

A confiabilidade da comunicação é muito importante ao WAMS para fornecer monitoramento, proteção e controle ininterruptos em tempo real do sistema de energia. O tempo de atraso e a taxa de largura de banda oferecem suporte ao WAMS garantindo o funcionamento do sistema em um nível adequado de confiabilidade. A taxa de erro de bit é um parâmetro bastante utilizado para medir a confiabilidade do WAMS.

No momento, os meios de comunicação que podem ser usados na transferência de dados dos sincrofasores podem ser agrupados basicamente em duas categorias: comunicação sem fio e comunicação com fio. A Figura 4 retrata essa divisão entre as duas categorias. Cada tecnologia de comunicação apresenta suas peculiaridades e para o sistema WAMS devem satisfazer os requisitos de alta taxa de transferência de dados, baixa latência, alta largura de banda e confiabilidade.

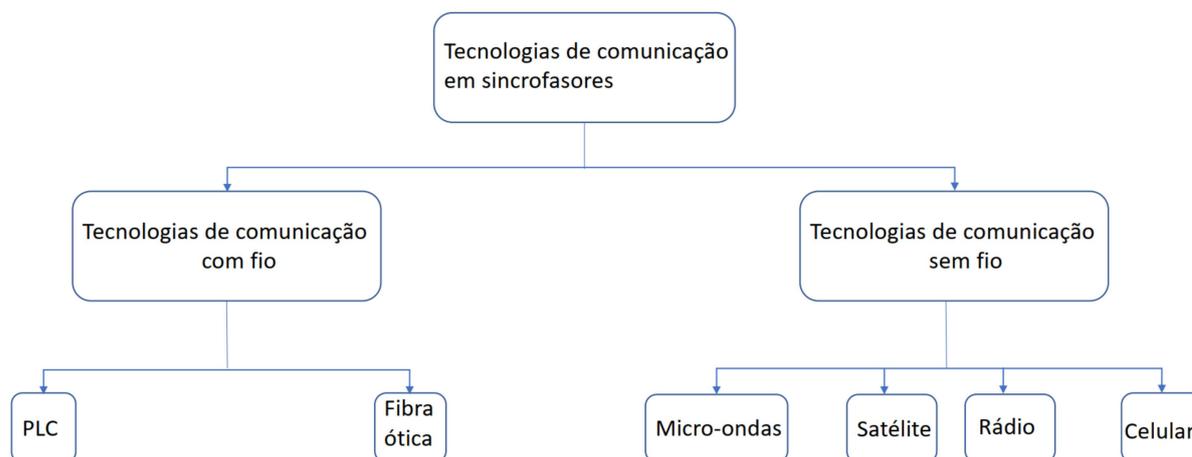


Figura 4 – Tipos de tecnologias de comunicação disponíveis para aplicações em sincrofasores (Fonte: Própria autoria)

Os meios de comunicação sem fio disponíveis para o WAMS são: celular, rádio, satélite e micro-ondas (APPASANI; MOHANTA, 2018b).

- celular

O mecanismo de comunicação celular é um dos tipos de comunicação sem fio mais comuns no mundo. A comunicação via celular foi implantada na maior parte da área terrestre habitada do planeta. Devido à grande expansão de sua infraestrutura, a comunicação celular tem sido considerada como uma alternativa econômica para aplicações de sincrofasores. Embora essa tecnologia possa atender às demandas de aplicações em sincrofasores respeitando os requisitos de taxa de dados, a condição de uso compartilhado dessa tecnologia a torna inaceitável para aplicação em situações de missão crítica que exigem serviços de comunicação ininterruptos.

- satélite

Diferente de outros métodos, a comunicação por satélite pode funcionar de maneira ininterrupta mesmo em ocorrência de desastres naturais devido ao seu equipamento de comunicação estar no espaço. A principal desvantagem do sistema de comunicação via satélite é o atraso de tempo na comunicação (NADUVATHUPARAMBIL; VALENTI; FELIACHI, 2002), além disso, a antena para recepção de sinal de satélite é bastante cara, limitando a promoção em larga escala dos métodos de comunicação via satélite nas aplicações de sincrofasores.

- micro-ondas

A comunicação baseada em micro-ondas tem uma enorme capacidade de transporte de informações devido à sua característica de alta frequência. Além disso, a interferência

da comunicação baseada em micro-ondas também é insignificante. No entanto, a principal desvantagem da comunicação baseada em micro-ondas é o sinal ser suscetível a ataques ciber físicos, afetando significativamente sua confiabilidade e segurança.

- rádio

O rádio tem largura de banda limitada para transmissão de dados. Assim, os dados das PMUs podem interferir em outros dados que possam ser enviados nesta faixa de frequência. Devido à falta de necessidade de fiação, o tempo de implementação e o custo deste método é baixo.

Os meios de comunicação com fio disponíveis para o WAMS são: PLC e fibra ótica (APPASANI; MOHANTA, 2018b).

- PLC

O PLC usa os cabos de linha de energia da rede elétrica para a transferência de dados dos sincrofasores. Essa tecnologia é rápida e econômica para ser implantada em redes de comunicação pelo fato de não haver necessidade de infraestrutura de comunicação adicional. Outra vantagem é que o PLC pode oferecer taxas de transferência de dados com alta velocidade para a transferência de dados dos sincrofasores. No entanto, a tecnologia PLC também tem algumas desvantagens como muita interferência e desvanecimento, impedindo a utilização do PLC em aplicações de sincrofasores com enorme quantidade de dados para ser transmitidos. A interferência causa muitos ruídos nos cabos de alimentação, dificultando a transmissão de dados pelo canal de comunicação em longas distâncias. Em situações com presença de muito ruído a qualidade da transferência de dados é reduzida. Entretanto, o PLC pode fornecer uma solução de comunicação híbrida com outros métodos de comunicação sem fio, como comunicação celular ou comunicação por micro-ondas.

- Fibra óptica

A comunicação baseada em fibra óptica tem sido amplamente utilizada na transmissão de sinais telefônicos, transmissão de sinais de televisão a cabo e comunicação pela internet. Nesse tipo de comunicação, a fibra óptica é utilizada para realizar a transferência de dados das PMUs para os PDCs. Comparada com o PLC, a fibra ótica tem taxas de dados mais altas, atenuação mais baixa e maior confiabilidade. Apesar de ter várias vantagens, devido às suas limitações físicas, a implementação da fibra ótica ainda sofre muitas desvantagens, como os altos custos de instalação e manutenção, o potencial risco de roubo e os problemas de expansão (NADUVATHUPARAMBIL; VALENTI; FELIACHI, 2002).

Devido às vantagens consideráveis da fibra óptica como alta capacidade de canal, alta taxa de transferência de dados, baixa perda de transmisso e imunidade a interferências eletromagnéticas, elas são adotadas como a principal tecnologia para a IC do WAMS (DENG et al., 2012) e (MOHAMMADI; HOOSHMAND; FESHARAKI, 2016). Além disso, ainda tem a vantagem de apresentar uma baixa latência de transmisso, pouca atenuaco e não sofre distorçao causada por fatores ambientais. É muito comum o emprego das fibras ópticas em SEPs por cabos OPGW que são cabos que executam simultaneamente as funçes de proteçao das linhas de transmisso contra descargas atmosféricas e a de provedor de interconexes de alta capacidade para telecomunicaes, pois possui fibras ópticas alocadas em seu interior ao longo das linhas de transmisso.

Atualmente, com a expanso do sistema de telecomunicaes e a implantao das PMUs, é possível ter estimativas dinâmicas de estado do sistema. O ponto importante do sistema em usar a medicao de fase para estimativa de estado do sistema é que não é necessário implementar PMUs para medicao em todos os pontos do sistema e apenas sua observabilidade é suficiente. Ter um número limitado de PMUs em pontos-chave da rede, com o auxílio de softwares existentes, torna todo o sistema visível. Com um número limitado de PMUs é possível economizar o custo do WAMS.

Considera-se a fibra OPGW como IC para o problema da alocao de PMUs nesta dissertao. Entretanto, a OPGW encarece o custo global do WAMS, devido ao seu custo elevado, pois o impacto do preo da instalao de OPGW em um WAMS é maior que o preo da PMU (CRUZ et al., 2019). Assim, esta dissertao aborda a otimizao do custo global do WAMS para as redes IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300. A métrica *betweenness centrality*, a métrica ponderada e os algoritmos de Dijkstra e de Kruskal foram essenciais para a simulao da alocao de PMUs e IC alcançando uma otimizao global do WAMS. O algoritmo de Kruskal permite a gerao de uma árvore primordial para a análise observabilidade topológica. Lembrando que a EE só pode ser executada se o requisito de observabilidade for garantido, ou seja, se for possível saber os valores de tenso, corrente e fase em todas as barras da rede.

2.2 Estimaco de Estado

A confiabilidade do processo de estimaco de um estimador de estado, depende da redundância das medidas aferidas, importante não somente para assegurar a observabilidade do sistema, como também para deteco e identificao de possíveis erros grosseiros (LONDON et al., 2009). A Figura 5 mostra as etapas da estimaco de estado.

Estimaco de estado é uma das partes mais importantes do monitoramento dos sistemas de potência (NADUVATHUPARAMBIL; VALENTI; FELIACHI, 2002). A Figura 5 mostra as etapas da estimaco de estado. As etapas da EE são: pré-processamento,

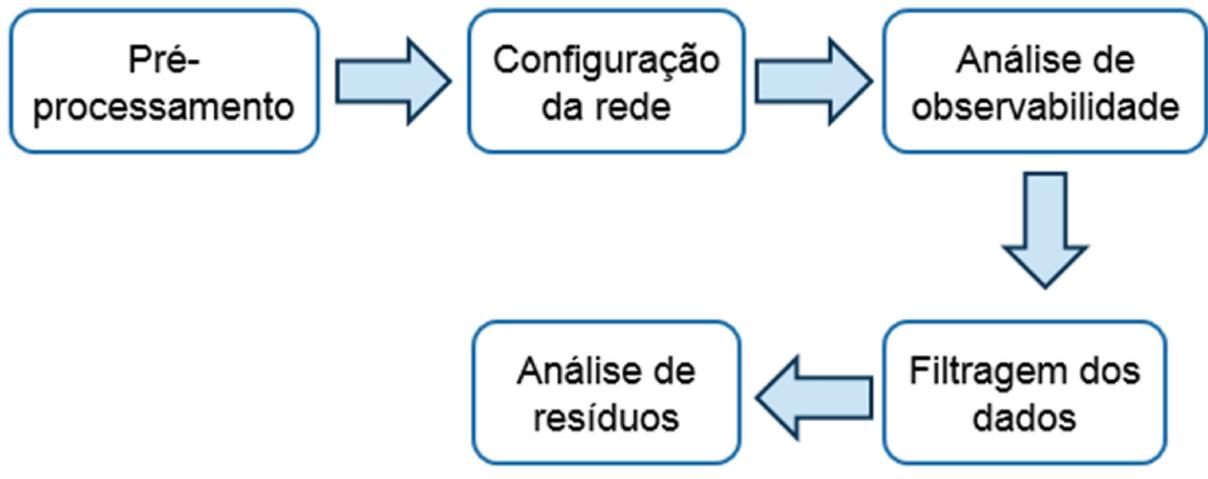


Figura 5 – As etapas da Estimação de Estado (Fonte: Própria autoria)

configuração da rede, análise de observabilidade, filtragem e análise de resíduos (ROCHA, 2010):

- No pré-processamento analisam-se os dados recebidos, eliminam-se as medidas erradas e corrigem-se erros de configuração da rede elétrica.
- Na configuração da rede um módulo computacional determina a configuração atual da rede elétrica (topologia atual) sob supervisão, considerando as informações do chaveamento de dispositivos e localização de medidores.
- Na análise de observabilidade, os dados disponíveis são verificados se são suficientes para permitir a EE. Caso o sistema não seja observável, identificam-se as ilhas observáveis e calculam-se pseudo-medidas necessárias para tornar o sistema globalmente observável. Pode-se executar ainda nesta fase a análise de medidas e conjuntos de medidas críticas.
- Na filtragem os dados são filtrados geralmente com o uso do método dos Mínimos Quadrados Ponderados, uma técnica para a estimação do estado provável das variáveis elétricas do sistema.
- Na etapa de análise de resíduos realizam-se cálculos estatísticos para identificação dos erros de configuração da rede e erros grosseiros não eliminados na primeira etapa.

Ao observar a etapa da filtragem na EE, pode-se dizer que quanto mais redundância de medidas dispor o estimador, mais precisa será a EE, uma vez que a filtragem de erros será mais efetiva quanto mais dados medidos estiverem disponíveis. Por outro lado, mais medições significa mais custos com instalação de equipamentos e, por isso, o planejamento de um sistema de monitoramento passa pelo compromisso de atingir um bom desempenho da EE com um custo adequado, ou seja, uma menor quantidade de PMUs instaladas.

A seguir as equações utilizadas para a estimação de estado serão discutidas para melhor compreensão desse processo. De modo geral, o estado de um SEP é definido pelo módulo e ângulo de fase das tensões das barras do sistema.

A relação entre medidas e estado verdadeiro é estabelecida pela seguinte função não linear do estado 2.1 (SCHWEPPE; WILDES, 1970):

$$z = h(x) + \epsilon, \quad (2.1)$$

Sendo:

z : vetor de medidas, de dimensão ($m \times 1$);

m : número de medidas;

$h(\cdot)$: vetor de funções não-lineares, de dimensão ($m \times 1$), que relacionam o estado verdadeiro com medidas não corrompidas;

x – vetor de estado, de dimensão ($n \times 1$), representando módulos e ângulos de fase das tensões nodais;

$n = 2nb - 1$ (uma barra do sistema é considerada referência angular, portanto, seu ângulo não faz parte do processo de estimação);

nb – número de barras da rede;

ϵ - vetor de erros ou incertezas associadas às medidas z , como as medições possuem dados corrompidos, o estimador de estado processa os dados com a adição de algum erro com ruído gaussiano.

O vetor de erros ϵ é modelado como variável aleatória com distribuição Normal, de valor esperado zero e matriz de covariância R (ROCHA, 2010);

$$R = E[\epsilon \cdot \epsilon^T] = \text{diag}(\sigma_i^2) \quad (2.2)$$

$E[\cdot]$ é o operador valor esperado e σ_i^2 a variância da i -ésima medida.

Os estimadores de estado devem possuir a capacidade de limpar os dados, provenientes dos sistemas de medição, que podem conter erros de origens distintas, onde os principais erros são de medição, topologia e parâmetro (HONORATO et al., 2020). No processo de EE é comumente empregado o método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) para encontrar o melhor ajuste dos dados medidos na EE. Esse método utiliza a seguinte função-objetivo (ROCHA, 2010):

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \epsilon_i^2 \alpha_i = \sum_{i=1}^m (z_i - h(x))^2 \alpha_i \quad (2.3)$$

Sendo:

$J(x)$ - função objetivo;

z_i - i -ésima medida;

α_i - peso atribuído à i -ésima medida;
 m - número de medidas.

A equação 2.3 pode ser representada em forma matricial como apresentado na equação 2.4:

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.4)$$

O objetivo é ter uma estimativa \hat{x} para o estado x que minimize $J(\hat{x})$.

$$J(\hat{x}) = \text{Min}([z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)]) \quad (2.5)$$

Depois que a função-objetivo é determinada, ela deve atender a seguinte condição para ser minimizada (SCHWEPPE; WILDES, 1970):

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

Aplicando a condição 2.6 em 2.4 aparece então a equação 2.7 (ROCHA, 2010):

$$H^T R^{-1} [z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.7)$$

Definindo $f(x) = H^T R^{-1} [z - h(x)]$ e usando o método de Newton-Raphson para encontrar \hat{x} em 2.7 chega-se ao seguinte processo iterativo:

$$x_{i+1} = x_i + K_i \cdot [z - h(x_i)] \quad (2.8)$$

Sendo que:

$$K = G^{-1} H^T R^{-1} \quad (2.9)$$

$$G = [H^T R^{-1} H] \quad (2.10)$$

$$H = \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.11)$$

i - contador de iterações;
a expressão 2.10 é a matriz de Ganho, avaliada em $x = x_i$;
e a expressão 2.11, é a matriz Jacobiana.

A convergência do processo estabelecido por 2.8 é avaliada verificando se a norma do vetor desvio $\Delta x_i = |x_{i+1} - x|$ atende a uma tolerância pré-estabelecida.

2.3 Análise de Observabilidade

Normalmente o SEP opera em situações observáveis, entretanto pode ocorrer falhas nos equipamentos de medição, no sistema de transmissão de dados, eventos contingenciais, como perdas de PMUs e perdas de linhas, tornando o sistema inobservável e fazendo com que seja necessária uma análise de observabilidade em casos críticos de operação.

Analisar a observabilidade da rede elétrica é importante para a etapa do projeto de sistemas de medição, porque permite identificar onde devem ser instalados os medidores, para que o processo de estimação de estado funcione adequadamente. Pode-se afirmar que um SEP é observável, se o conjunto de medidas efetuadas for suficiente para a determinação de todas as suas variáveis de estado, isto é, medidas de corrente, fase e tensão de todas as suas barras. Caso haja alguma medida ausente, o sistema se torna inobservável (CHAKRABARTI; KYRIAKIDES; ELIADES, 2008).

Se o estado do sistema for não observável, é relevante identificar as ilhas observáveis, ou seja, aquelas áreas do sistema cujos respectivos estados podem ser estimados, e detectar aqueles barramentos com ramais não observáveis que não devem ser incluídas na estimativa. Sendo o estado não observável, também é relevante detectar quais medidas adicionais tornam o sistema observável. Ou seja, identificar cada medição individual ou conjunto de medições (chamadas pseudo-medidas) que, adicionadas ao conjunto de medições disponíveis, resultam em um estado observável (MONTICELLI; WU, 1985).

Para a análise de observabilidade, pode-se usar algoritmos com base em métodos numéricos, topológicos ou uma combinação dos dois (KORRES; KATSIKAS, 2003), (SODHI; SRIVASTAVA; SINGH, 2010) e (ZHANG; HAN, 2020). A observabilidade numérica é realizada pela análise do bom condicionamento da matriz Jacobiana (H), enquanto a observabilidade topológica é verificada pelo uso da topologia da rede e a localização das medidas no sistema. De forma geral, os algoritmos topológicos têm um custo computacional menor que os numéricos.

2.3.1 Análise de Observabilidade Numérica

A análise de observabilidade numérica utiliza a matriz Jacobiana de medição e a matriz de ganho. Segundo a análise numérica, se o posto Jacobiano for igual ao número de variáveis desconhecidas, então o sistema é observável, caso contrário, o sistema não é observável (YANG et al., 2018). Já para a matriz de ganho o sistema é observável se o determinante deste diferir de zero, caso contrário, o sistema não é observável. Pode-se ressaltar que a observabilidade numérica fundamenta-se em operações de ponto flutuante, o que pode resultar em erros de arredondamento e dados imprecisos (HAIBO; BOMING; HONGBIN, 2003).

Quando a observabilidade numérica é ratificada, procede-se a estimação de estado,

todavia, o método topológico nem sempre certifica a EE, porque a garantia da observabilidade de um SEP é agregada ao bom condicionamento da matriz jacobiana, que só é realizada na análise numérica (ROCHA, 2010).

2.3.2 Análise de Observabilidade Topológica

A análise da observabilidade topológica é denominada *Árvore Geradora de Medidas*, ou seja, pesquisa como gerar uma árvore T que conecta todos os nós de uma rede pelos ramos aos quais são atribuídas os valores das correntes, medidas ou calculadas. Portanto, verificar a observabilidade topológica é tentar construir esta árvore de medidas.

Com o advento das PMUs, (BALDWIN et al., 1993) foi o primeiro trabalho a introduzir algoritmos topológicos na alocação de PMUs, seguindo basicamente o conceito de *Árvore Geradora de Medidas* e outros conceitos da teoria dos grafos como subgrafo e cobertura de nós. Assim, a metodologia consiste em introduzir PMUs, com o propósito de fazer crescer o subgrafo de medidas pela introdução de PMUs, aumentando a cobertura dos nós, até obter a árvore geradora de medidas. A maioria dos trabalhos centra-se na observabilidade topológica pela vantagem de ser computacionalmente menos exigente e pela facilidade de localizar as áreas com inobservabilidade.

A Figura 6 mostra uma rede IEEE-14 barras e através das linhas não tracejadas é possível identificar quais vértices são adjacentes aos vértices 2, 7, 10 e 13. O vértice 2 é adjacente a 1, 3, 4 e 5, significando que a colocação de PMU no vértice 2, permite a observabilidade dos vértices 1, 3, 4 e 5. O mesmo pode ser analisado nos vértices 7, 10 e 13 com seus respectivos vértices adjacentes.

É possível concluir, então, que com somente quatro PMUs em 2, 7, 10 e 13, assegure-se a completa observabilidade de todo o sistema, ou seja, a tensão, corrente e suas fases em todas as barras do sistema são conhecidas (medidas e/ou calculadas). Quando na rede do sistema de potência, um barramento não possui gerador de energia para injetar energia nele ou cargas para consumir energia, então nesse barramento o fluxo de corrente é igual a zero, portanto é descrito como um barramento de injeção zero ou *Zero Injection Bus (ZIB)*. Como o fluxo de corrente é igual a zero, pode-se concluir que a soma de todas as medidas de corrente dos fasores e de seus ramos incidentes é igual a zero. Geralmente o ZIB é usado para tornar um sistema observável com um número menor de PMUs (RAVINDRA; RAO; RAJ, 2016).

A observabilidade topológica pode ser alcançada aplicando as seguintes regras comuns:

I) Um barramento é considerado diretamente observável se possui uma PMU instalada que mede o fasor de tensão e da corrente das linhas (ramos) incidentes, logo tensão e corrente são consideradas diretamente mensuráveis.

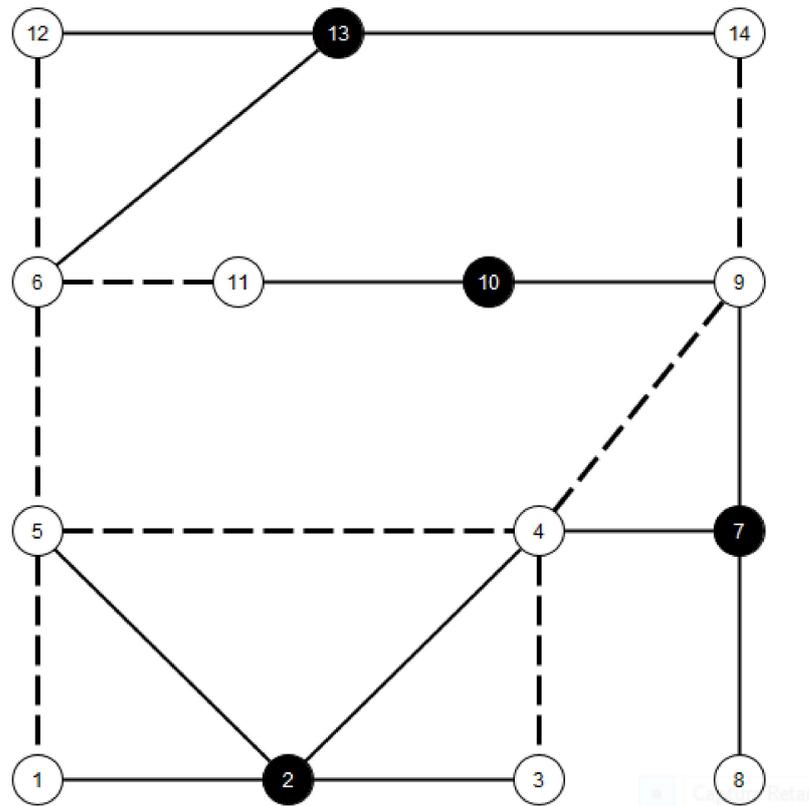


Figura 6 – Alocação de PMUs na rede elétrica IEEE-14 (Fonte: Própria autoria)

II) Se os fasores de tensão e corrente de uma extremidade da linha são conhecidos, o fasor de tensão da outra extremidade da linha pode ser calculado usando a lei de Ohm. Este barramento com o fasor de tensão calculado é considerado indiretamente observável.

III) Se os fasores de tensão de ambas as extremidades de uma linha são conhecidos direta ou indiretamente, então o fasor de corrente dessa linha pode ser calculado, assumindo que a impedância da linha é conhecida. Esta corrente de linha é considerada indiretamente mensurável.

IV) Para um único ZIB observável, se os fasores de tensão deste barramento e de todos os barramentos adjacentes forem conhecidos, exceto um, o fasor de tensão desconhecido pode ser calculado usando a lei de Kirchhoff para correntes no ZIB.

V) Para um único ZIB não observável, se os fasores de tensão de todas as barras vizinhas são conhecidos, o ZIB também é considerado observável, pois seu fasor de tensão pode ser calculado usando as equações dos nós.

VI) Para uma quantidade de ZIBs não observáveis, se os fasores de tensão de todas as barras vizinhas são conhecidos, todas as barras do grupo são consideradas observáveis, pois seus fasores de tensão podem ser calculados usando um sistema de equações nodais. O número de ZIBs não observáveis é a quantidade de equações que o sistema deve ter para

que a solução seja possível.

3 Conceitos de Teoria dos Grafos Aplicados a Alocação Ótima de PMUs (AOP)

Neste trabalho utilizaram-se grafos para representar os sistemas elétricos de potência, logo são necessários os conceitos de teoria dos grafos que serão abordados neste capítulo.

Pode-se definir grafo $G(V, E)$ como um conjunto de vértices e arestas, sendo V o conjunto de vértices e E o conjunto de arestas. A Figura 7 é um exemplo de um grafo simples com um conjunto finito de vértices e arestas.

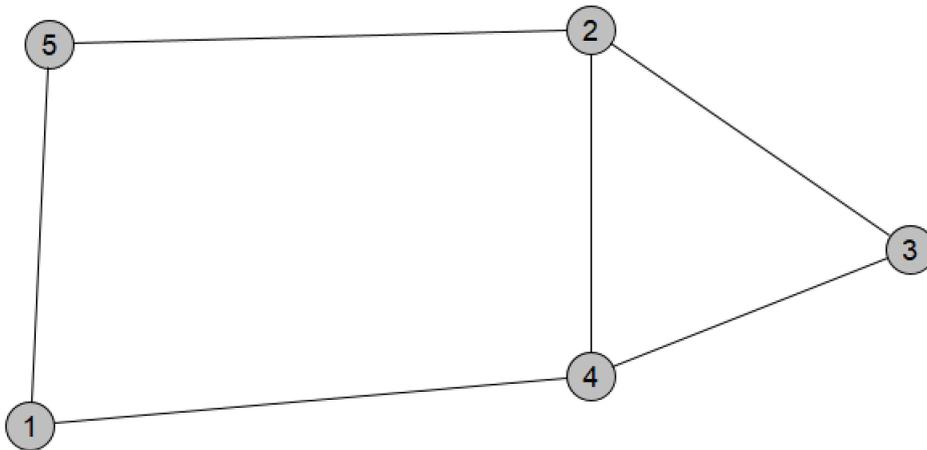


Figura 7 – Exemplo de um grafo (Fonte: Própria autoria)

O grafo da Figura 7 possui 5 vértices e 6 arestas. A ordem de um grafo é determinada como o número de vértices de um grafo, portanto neste caso a ordem do grafo é igual a 5. Geralmente um grafo de ordem n é representado através de uma matriz de adjacência $A(G) = [a_{ij}]$ de dimensão $n \times n$ de modo que o valor a_{ij} esclarece sobre como os vértices v_i e v_j estão relacionados, ou seja, se v_i e v_j são adjacentes ou não, portanto o valor de a_{ij} é determinado desse modo:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se } v_i \text{ e } v_j \text{ são adjacentes;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Como o grafo é simples, não direcionado e não ponderado, os elementos a_{ij} da matriz tem valor igual a 1 se v_i e v_j são adjacentes e 0 caso contrário. Para melhor compreensão, a matriz de adjacência do grafo da Figura 7 é descrita a seguir:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Quando o grafo não é direcionado, a matriz de adjacência será sempre simétrica com a diagonal nula. Consoante a teoria dos grafos, o grau de um vértice em um grafo não direcionado é definido como o número de arestas incidentes ao vértice, ou seja, o número de vértices adjacentes. Para calcular o grau de um vértice basta somar os componentes da coluna ou da linha da matriz de adjacência em relação ao respectivo vértice.

$$\text{deg}(v_i) = \sum_{j=1}^n [a]_{ij} \quad (3.3)$$

A Tabela 1 mostra o grau de cada vértice do grafo presente na ilustração 7. Consoante a Tabela 1, o grafo da Figura 7 não apresenta nenhum vértice terminal. Vértices terminais são aqueles com grau igual a 1, logo são adjacentes a apenas um vértice. Os vértices com maior grau são os vértices 2 e 4 com grau igual a 3, por consequência o grau máximo do grafo é igual a 3.

Tabela 1 – Tabela com o grau de cada vértice do grafo da Figura 7

vértice	grau
1	2
2	3
3	2
4	3
5	2

Se o grafo for ponderado, os elementos a_{ij} contém o peso dessa mesma aresta, ao invés de 1 quando houver uma aresta entre v_i e v_j , como no caso da Figura 8, que é o mesmo grafo da Figura 7, porém com pesos.

Os pesos de um grafo podem representar o deslocamento entre cidades, a extensão de linhas em uma rede elétrica e até mesmo distanciamento entre equipamentos de monitoramento. Neste trabalho proposto os pesos serão as distâncias entre as barras das redes. A seguir o grafo da Figura 8 e sua matriz de adjacência respectivamente:

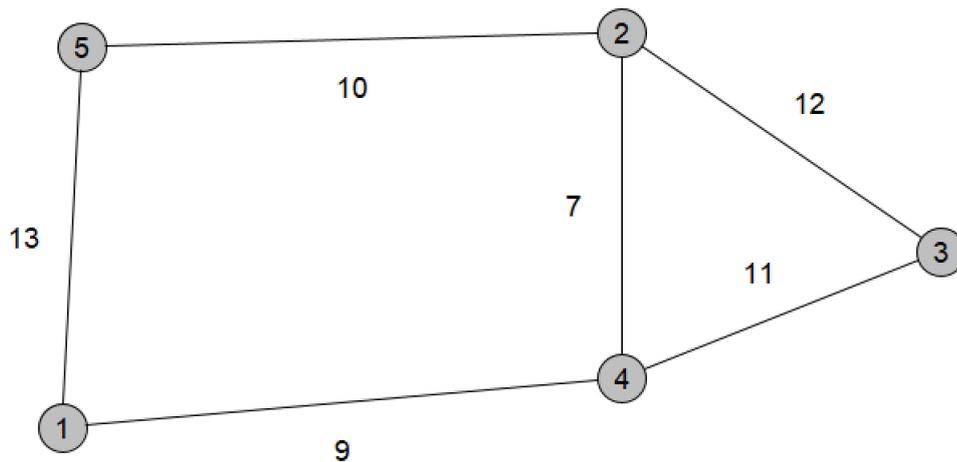


Figura 8 – Exemplo de um grafo ponderado (Fonte: Própria autoria)

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 9 & 13 \\ 0 & 0 & 12 & 7 & 10 \\ 0 & 12 & 0 & 11 & 0 \\ 9 & 7 & 11 & 0 & 0 \\ 13 & 10 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

Um subgrafo de um grafo G pode ser definido como um grafo que contém um conjunto de vértices que é um subconjunto do conjunto de vértices G e um conjunto de arestas que é um subconjunto do conjunto de arestas de G . O subgrafo induzido é obtido pela remoção de um subconjunto S de vértices de G e de arestas de G que incidem em vértices de S . A Figura 9 mostra um exemplo de um grafo original e seu subgrafo que está representado pelos vértices 1, 2, 3 e 4 e linhas destacadas:

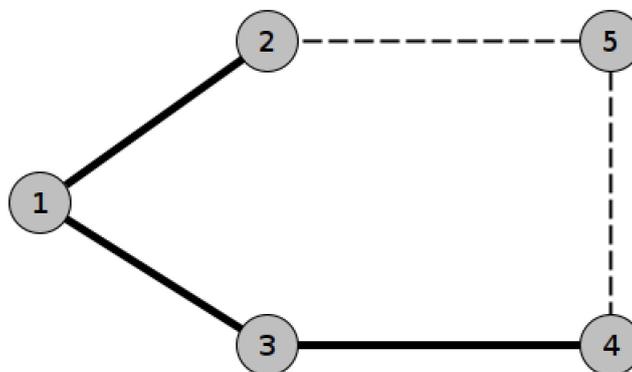


Figura 9 – Exemplo de um grafo e seu subgrafo (Fonte: Própria autoria)

Ao analisar o grafo da Figura 7 percebe-se que ele contém 3 ciclos. Ciclo é definido

como um caminho cujo vértice inicial coincide com o vértice final, porém sem repetição. Os 3 ciclos identificados são: $\{2, 3, 4\}$, $\{1, 2, 4, 5\}$, $\{1, 2, 3, 4, 5\}$.

Um grafo G é dito planar se puder ser representado graficamente no plano de tal forma que não haja cruzamento de suas arestas. Caso contrário, o grafo é dito não-planar. Um caminho ou caminho simples em um grafo é uma sequência finita de vértices distintos conectados por uma sequência de arestas. Um grafo é dito conexo se existir pelo menos um caminho entre cada par de vértices do grafo.

Define-se árvore como um grafo conexo e sem ciclos em que há somente um caminho entre qualquer par de vértices. Seja T uma árvore com n vértices, então as suas características são:

- T é conexo e sem ciclos;
- T possui $n - 1$ arestas;
- T é um grafo planar;
- Existe exatamente um caminho entre cada par de vértices.

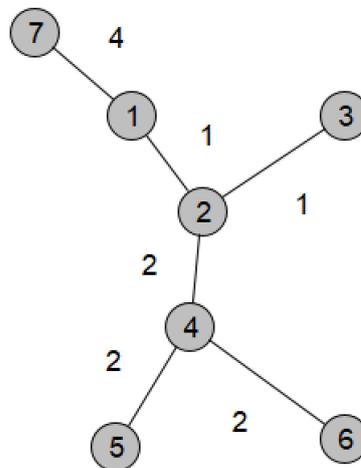


Figura 10 – Exemplo de uma árvore ponderada (Fonte: Própria autoria)

Uma floresta é um conjunto de árvores sem vértices em comum, é também um grafo desconexo e sem ciclos. O grafo da Figura 10 é uma árvore e ao remover as arestas entre os vértices 1 e 2 e entre os vértices 2 e 4 do grafo da Figura 10, construiu-se uma floresta observada na Figura 11, com 3 árvores.

Os conceitos de árvore e de floresta são fundamentais para a compreensão da construção da observabilidade topológica, em razão da construção de uma árvore geradora mínima para a simulação da alocação de PMUs e OPGW. Além dos conceitos de teoria

de grafos abordados, existem também métricas de centralidade utilizadas para medir a importância de um vértice em um grafo.

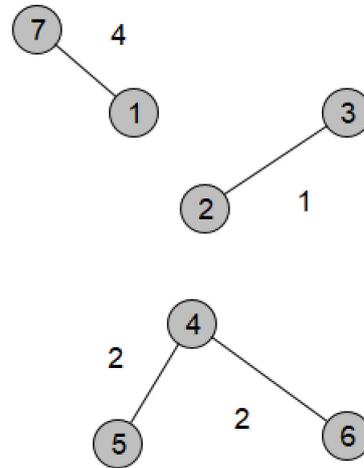


Figura 11 – Exemplo de uma floresta ponderada (Fonte: Própria autoria)

Diversos trabalhos de AOP que usam a análise topológica da observabilidade recorrem à representação em grafos do sistema elétrico para modelar o problema de otimização. Uma das técnicas de grafo utilizadas é o conjunto dominante.

3.1 Conjunto Dominante

Um conjunto S de vértices em um grafo $G(V, E)$ é um conjunto dominante (CD) se todo vértice de G ou pertence a S , ou é adjacente a algum vértice em S (GUHA; KHULLER, 1998). Pode-se aplicar a elaboração de conjunto dominante para colocação de dispositivos de monitoramento, como câmeras de vigilância e até mesmo alarmes de incêndio (HENNING; RAD, 2012). No caso dos problemas de AOP, o CD mostrado na Figura 12, em representação do grafo da rede IEEE-14, é análogo ao posicionamento necessário de PMUs em barramentos que garantam a observabilidade topológica da rede, onde os vértices de cor cinza representam o CD.

3.2 Conjunto Dominante Mínimo

Quando um conjunto de vértices em um grafo é mínimo de modo que cada vértice do grafo pertence a este conjunto ou é adjacente a algum vértice que lhe pertence, pode-se afirmar que esse conjunto de vértices é um conjunto dominante mínimo (CDM). Determinar o conjunto dominante mínimo em um grafo sem características particulares é um problema NP-Difícil. Os vértices de cor cinza representam o CDM na Figura 12.

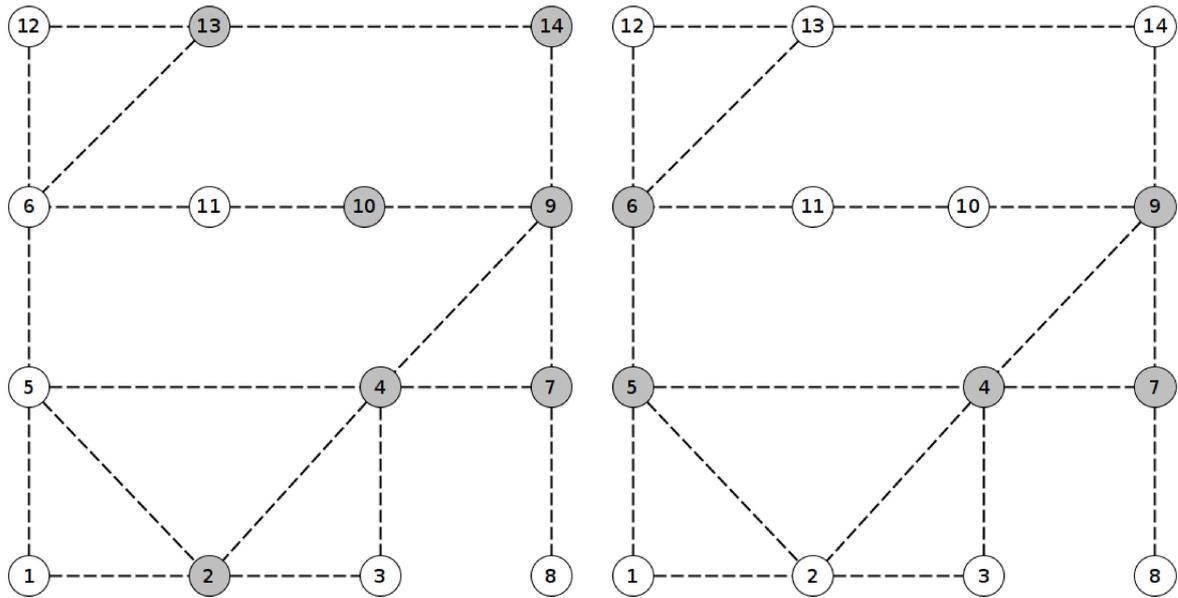


Figura 12 – Exemplos de um CD e um CDM respectivamente (Fonte: Própria autoria)

3.3 Conjunto Dominante Conexo

Um conjunto dominante é dito conexo (CDC) quando o subgrafo induzido pelos seus vértices é conexo. A construção de um conjunto dominante conexo é muito empregada em redes de sensores sem fio (YU et al., 2013) e (TOSUN; HAYTAOGLU, 2018), *backbone virtual* (YIN; SHI; SHANG, 2011), (BAI et al., 2020) e sistemas de monitoramento de energia elétrica (DORFLING; HENNING, 2006), (STEPHEN et al., 2015) e (LIAO et al., 2015). No caso do CDC da Figura 13 os vértices de cor cinza retratam as sete PMUs alocadas e as arestas destacadas representam a fibra ótica.

3.4 Conjunto Dominante Conexo Mínimo

Quando um conjunto de vértices em um grafo é mínimo e o subgrafo induzido pelos seus vértices é conexo, então pode-se dizer que o conjunto dominante é um conjunto dominante conexo mínimo (CDCM). Na Figura 13 os vértices de cor cinza e as arestas destacadas representam o CDCM.

Um grafo pode ter vários *CD* e *CDC*, mas achar um conjunto dominante mínimo (CDM) e um conjunto dominante conexo mínimo (CDCM) é um problema bem conhecido da teoria dos grafos que encontra aplicação em várias áreas. Para a elaboração de um conjunto dominante utilizou-se a *betweenness centrality* que é uma métrica de centralidade frequentemente utilizada para medir a importância dos vértices em um grafo (MAHESWARI; VANITHA; LOGANATHAN, 2021).

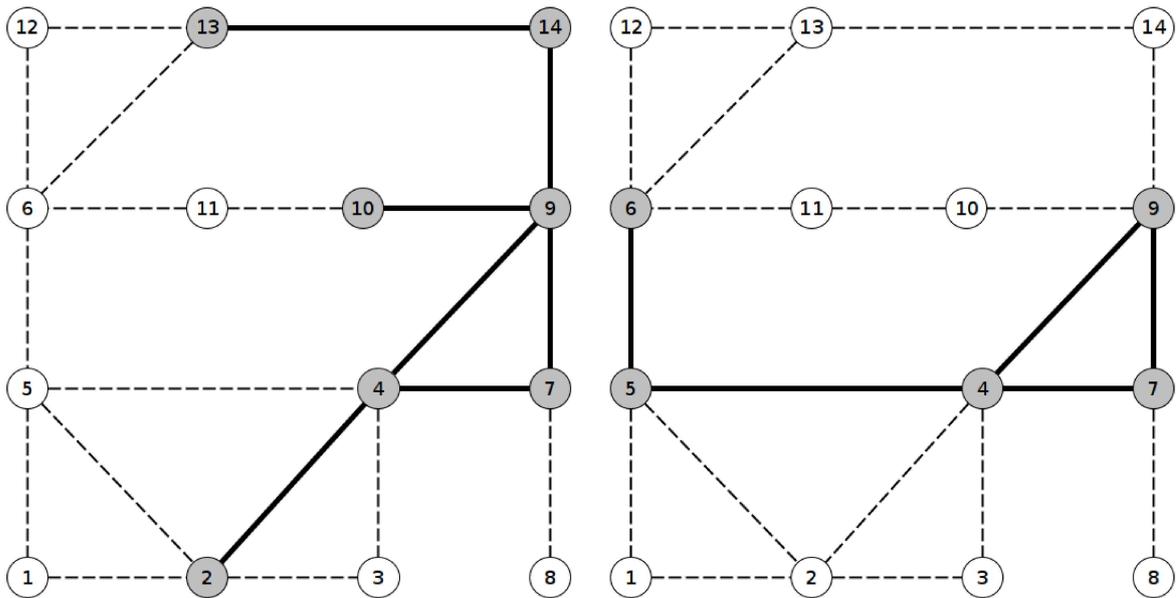


Figura 13 – Exemplos de um CDC e um CDCM respectivamente (Fonte: Própria autoria)

3.5 Conjunto Dominante Conexo Adaptado

Conjunto dominante conexo adaptado é quando há a supressão de determinados vértices ou arestas do subgrafo induzido conexo pelos vértices que compõem o conjunto dominante. Ao comparar as Figuras 13 e 14 percebe-se que os vértices 2,4,7,9,10,13 e 14 fazem parte do CDC e do CDC adaptado, já a aresta entre os vértices 4 e 9 é eliminada no CDC adaptado.

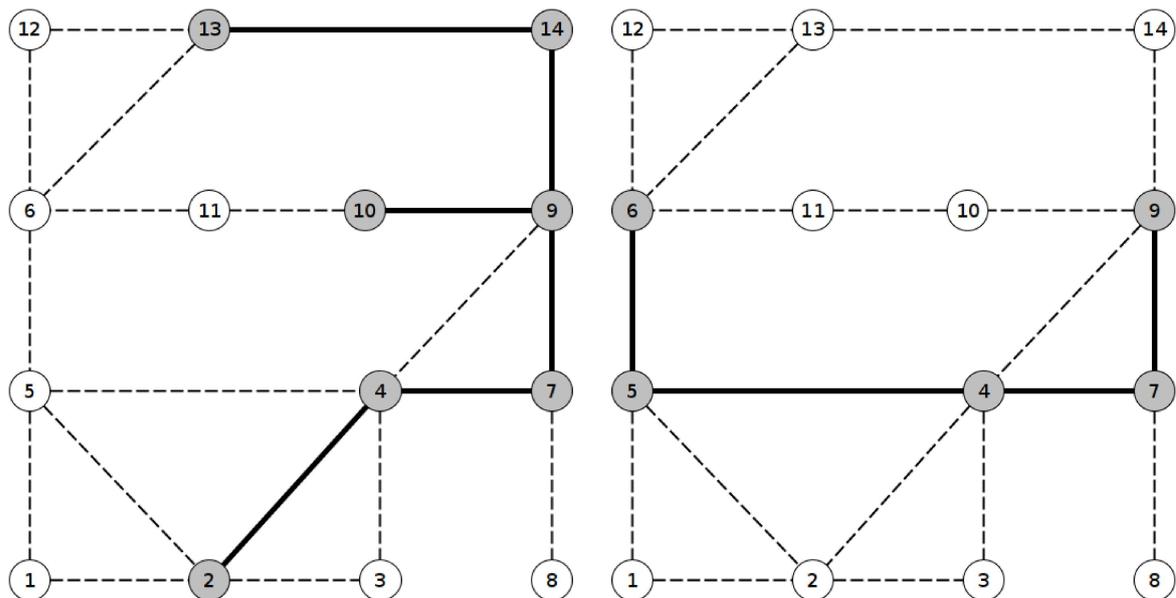


Figura 14 – Exemplos de um CDC adaptado e um CDCM adaptado respectivamente (Fonte: Própria autoria)

3.6 Conjunto Dominante Conexo Mínimo Adaptado

Quando há a supressão de determinados vértices ou arestas do subgrafo induzido conexo pelos vértices que compõem o conjunto dominante mínimo, pode-se afirmar que o conjunto dominante é um conjunto dominante conexo mínimo adaptado. Ainda observando as Figuras 13 e 14 é possível analisar que os vértices do CDCM e do CDCM adaptado são 4,5,6,7 e 9, todavia aresta entre os vértices 4 e 9 foi suprimida.

3.7 As métricas de centralidade

Qualquer tipo de rede pode ser caracterizada por um grafo, inclusive as redes sociais, as quais são tipos de redes referentes ao conjunto de pessoas interligadas. As métricas de centralidade surgiram a partir da análise de estrutura do grafo que representa as redes sociais e determinam a importância de um vértice em uma rede. A centralidade abordada neste trabalho será apenas a métrica *betweenness centrality* (FREEMAN, 1977), devido a sua relevância para desenvolvimento e desempenho dos resultados neste trabalho.

3.7.1 A métrica *betweenness centrality*

A *betweenness centrality* é definida como a proporção entre a quantidade de menores caminhos que um vértice pertence e a quantidade total de menores caminhos entre todos os pares de vértices do grafo.

Observa-se que a Figura 15, é um grafo que representa a rede IEEE-14 com os valores calculados da *betweenness centrality* de cada nó e que os tamanhos dos vértices são proporcionais aos valores da *betweenness centrality*.

A *betweenness centrality* de um vértice significa a influência total que esse vértice tem nas comunicações entre cada par de vértices em um grafo, assumindo que a informação é transmitida de modo mais rápido pelos caminhos mais curtos (DINLER; TURAL, 2018). Pode-se definir a *betweenness centrality* (BWC) pela equação 3.5, sendo que $mc_{jk}(i)$ representa a contagem de vezes que o vértice i está inserido entre os menores caminhos constituídos pelos vértices j e k e mc_{jk} representa a contagem do total de menores caminhos entre os vértices j e k .

$$BWC = \sum_{j \neq k \neq i} \frac{mc_{jk}(i)}{mc_{jk}} \quad (3.5)$$

Além da métrica *betweenness centrality*, que quantifica a importância de um vértice em um grafo, o algoritmo de Dijkstra foi outro conteúdo pertencente a teoria de grafos, útil para a simulação da alocação de PMUs neste trabalho.

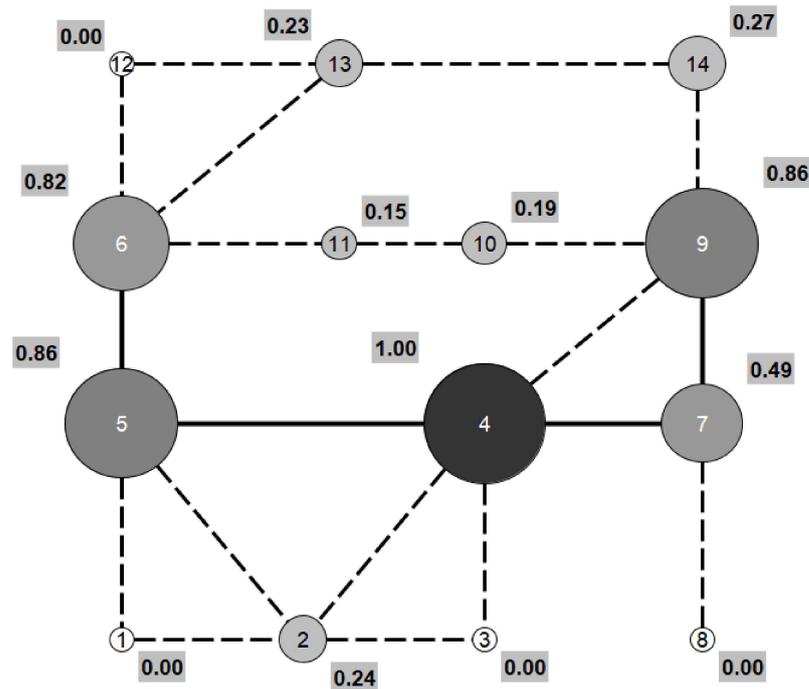


Figura 15 – A métrica *betweenness centrality* na rede IEEE-14 (Fonte: Própria autoria)

3.8 Algoritmo de Dijkstra

O algoritmo de Dijkstra encontra o caminho mais curto entre os vértices em um grafo orientado ou não orientado com arestas de pesos não negativos (SZCZEŚNIAK; JAJSZCZYK; WOŻNA-SZCZEŚNIAK, 2019). É um algoritmo muito citado e recomendado em problemas que envolvem a definição de menores caminhos.

Algoritmo 1: Dijkstra

Require: INICIALIZAÇÃO (G, w, s)

- 1: $S \leftarrow \emptyset$
 - 2: $Q \leftarrow V[G]$
 - 3: **while** $Q \neq \emptyset$ **do**
 - 4: $u \leftarrow \text{EXTRAIR-MIN}(Q)$;
 - 5: $S \leftarrow S \cup \{u\}$;
 - 6: **for** cada vértice $v \in S[u]$ **do**
 - 7: RELAXAR (u, v, w)
 - 8: **end for**
 - 9: **end while**
-

Primeiro são inicializados os valores de caminhos mais curtos e os vértices antecedentes (vértices que antecedem s no menor caminho de w para s). Um conjunto vazio S é inicializado na linha 1. Na linha 2 o algoritmo mantém um conjunto Q com todos os

vértices V de G . Na linha 3 inicia-se o loop que se mantém enquanto Q diferir de zero, o vértice u é extraído de Q e adicionado a S . O vértice u tem o caminho mais curto estimado de qualquer vértice em Q . Nas linhas 6-7 são relaxadas cada aresta (u, v) que tem início em u , e em seguida atualiza-se a estimativa dos valores de caminhos mais curtos e dos vértices antecedentes. No algoritmo, os vértices nunca são incluídos em Q depois da linha 2 e cada vértice é extraído de Q e adicionado a S uma única vez, de forma que o loop das linhas 3-7 tem uma iteração de $|V|$ vezes.

Ao aplicar o algoritmo de Dijkstra para os menores caminhos entre os vértices 1 e 5 estão destacados e a distância é igual a 6, conforme pode ser visto na Figura 16.

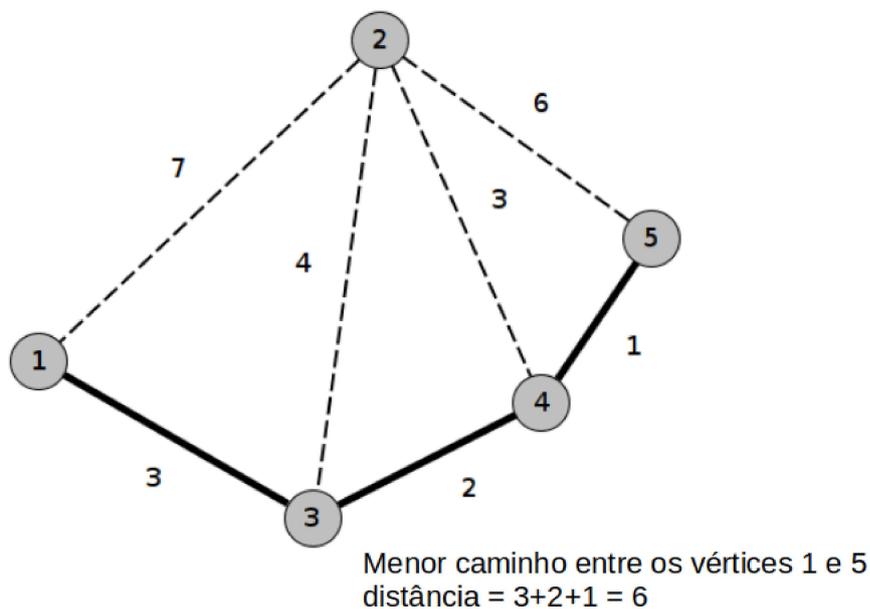


Figura 16 – Grafo ponderado com a distância do menor caminho entre os vértices 1 e 5 após aplicação do algoritmo de Dijkstra (Fonte: Própria autoria)

Com a finalidade de edificar a IC, além do algoritmo de Dijkstra, foi necessária a utilização do algoritmo de Kruskal para gerar uma árvore mínima.

3.9 Árvore Geradora Mínima

A otimização do custo total de redes pode ser efetuada através da obtenção de uma árvore geradora mínima, contribuindo no cálculo do custo total da IC.

Dado um grafo $G = (V, E)$ não direcionado ponderado com n vértices e uma lista de arestas, uma árvore geradora mínima (*Minimum Spanning Tree* - MST) é um subconjunto de arestas que conecta todos os vértices para originar um grafo acíclico e com peso total mínimo das arestas (QIAO; CRÉPUT, 2019). Qualquer árvore geradora que tenha arestas com pesos iguais será uma MST.

A Figura 17 apresenta uma árvore geradora mínima a partir de um grafo original. A árvore é identificada pelas arestas não tracejadas e o conjunto de vértices do grafo original.

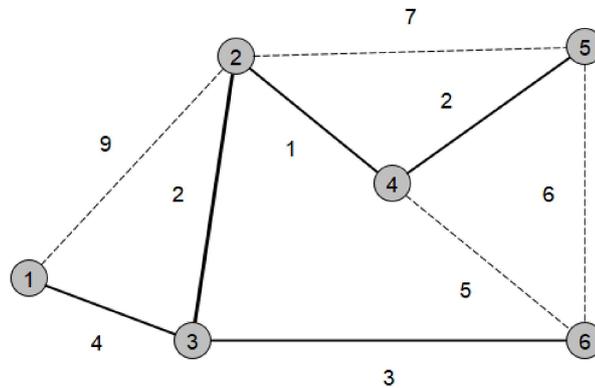


Figura 17 – Árvore geradora mínima (Fonte: Própria autoria)

Um dos algoritmos gerador de árvore mínima frequentemente utilizado é o algoritmo de Kruskal (KRUSKAL, 1956), que será abordado a seguir.

3.9.1 Árvore Geradora Mínima de Kruskal

É um algoritmo bastante utilizado em teoria dos grafos que pesquisa uma árvore geradora mínima para um grafo conexo ponderado. O algoritmo *Kruskal Minimum Spanning Tree* possui tempo computacional $O(|E|\log|V|)$ (RAFID, 2019).

A princípio ocorre a inicialização do grafo e dos pesos das arestas que o mesmo contém. Em seguida, na linha 1 um conjunto vazio A é inicializado. Começa um loop na linha 2 para cada vértice v que pertence aos vértices do grafo G faça. Em 3 são criados conjuntos disjuntos de árvores a partir de vértices v . Depois na linha 4 as arestas do grafo são ordenadas de forma decrescente pelo peso p . Na linha 5 para cada aresta de peso p em ordem crescente faça, apenas se em 6 os dois conjuntos de árvores disjuntos diferirem sendo que u e v não pertencem aos mesmos conjuntos e em 7 uma aresta (u, v) com o menor peso $p(u, v)$ é selecionada para ligar os dois conjuntos disjuntos de árvores e depois incluída ao conjunto A . Na linha 10 ocorre a união de cada aresta selecionada em cada iteração do algoritmo. Já na linha 11 o algoritmo retorna ao conjunto A de modo que o algoritmo só termina após selecionar todas as arestas de peso mínimo e o grafo final será uma árvore.

A Figura 19 é a demonstração de como acontece a aplicação do algoritmo de Kruskal no grafo ponderado da Figura 18. Segundo a Figura 19 inicialmente é escolhida a aresta de peso mínimo 1 entre os vértices 2 e 4, em seguida a aresta entre os vértices 4 e 5, a partir daí escolhe a aresta entre os vértices 2 e 3, depois a aresta entre os vértices 3 e 6 e finalmente a aresta entre os vértices 3 e 1. Após a seleção da última aresta, uma árvore foi

Algoritmo 2: AGM-KRUSKAL**Require:** INICIALIZAÇÃO (G,p)

```

1:  $A \leftarrow \emptyset$ 
2: for cada vértice  $v \in V[G]$  do
3:   IDENTIFICAR-CONJUNTO ( $v$ );
4:   Ordenar as arestas de  $E$  de forma decrescente pelo peso  $p$ 
5:   for cada aresta  $(u,v) \in E$  tomada na ordem crescente do peso  $p$  do
6:     if ENCONTRAR-CONJUNTO( $u$ )  $\neq$  ENCONTRAR-CONJUNTO( $v$ ) then
7:        $A \leftarrow A \cup \{ (u,v) \}$ 
8:     end for
9:   end if
10:  UNIÃO(  $\{u,v\}$ )
11:  Retorna  $A$ 
12: end for

```

produzida e para saber o comprimento total do grafo basta somar os pesos das arestas da árvore produzida. Ao somar o valor de todas as arestas o valor total é igual a 12.

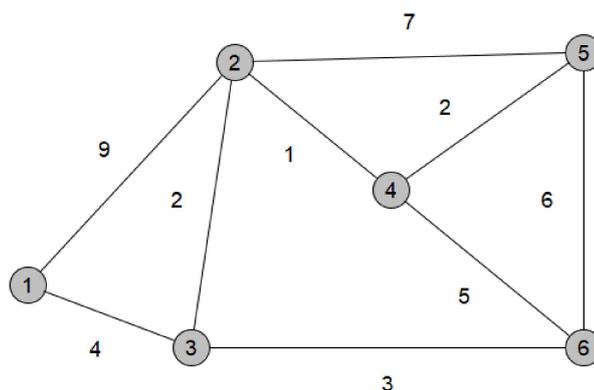


Figura 18 – Grafo ponderado aplicado ao algoritmo de Kruskal (Fonte: Própria autoria)

Este algoritmo tem o objetivo de produzir o crescimento de uma floresta tentando conectar árvores pela adição de arestas, garantindo que não formem ciclos, preferindo arestas de pesos mínimos.

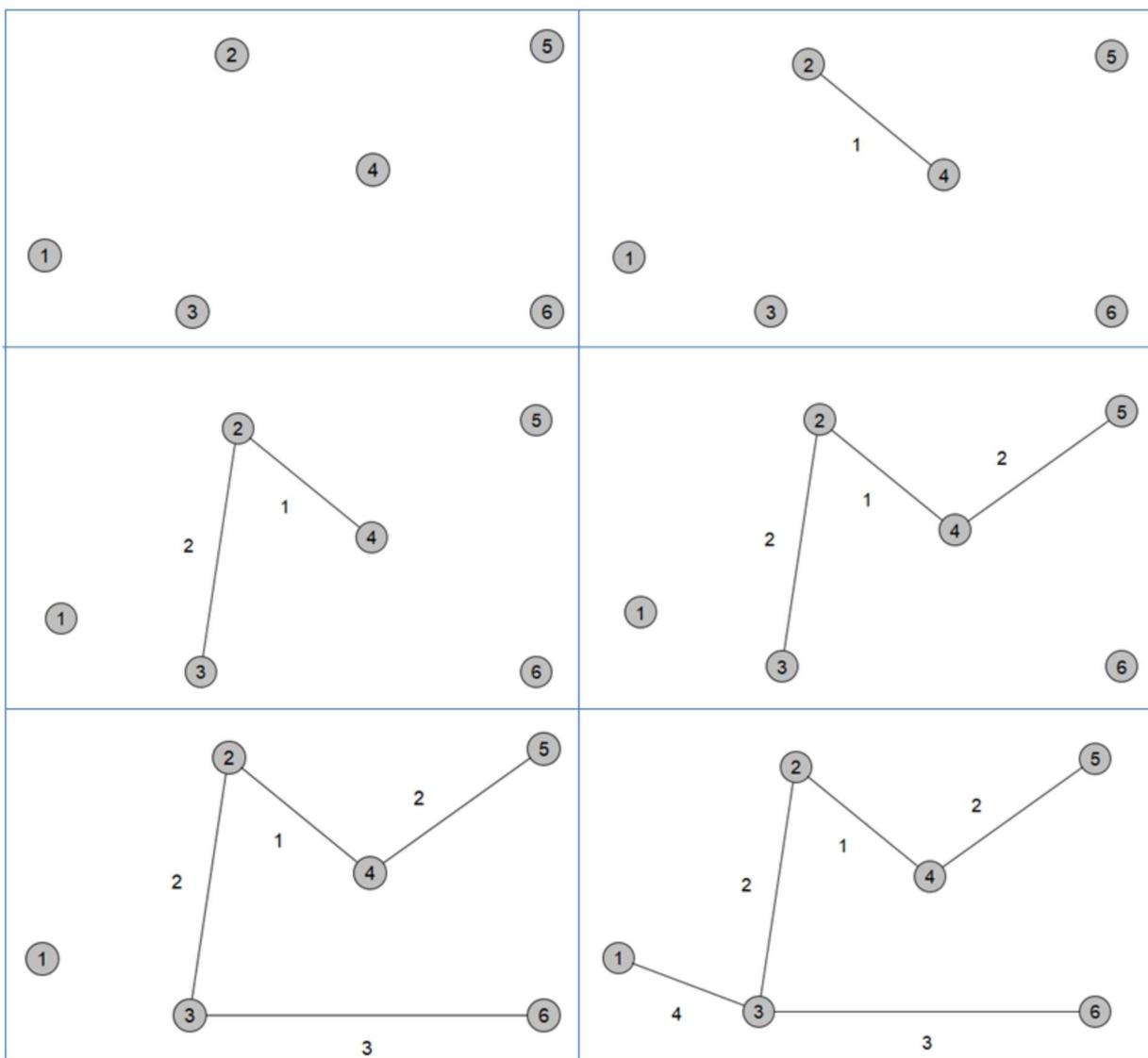


Figura 19 – Aplicação do algoritmo de Kruskal em um grafo ponderado (Fonte: Própria autoria)

4 Metodologia

A Figura 20 apresenta o fluxograma referente as estratégias de grafos utilizadas para alocação de PMUs e infraestrutura de comunicação. O algoritmo implementado para a alocação de PMUs e IC apresenta a opção 1 para condições normais, opção 2 para presença de ZIB e opção 3 para perda de PMU. As partes tracejadas representam o início de cada opção do algoritmo.

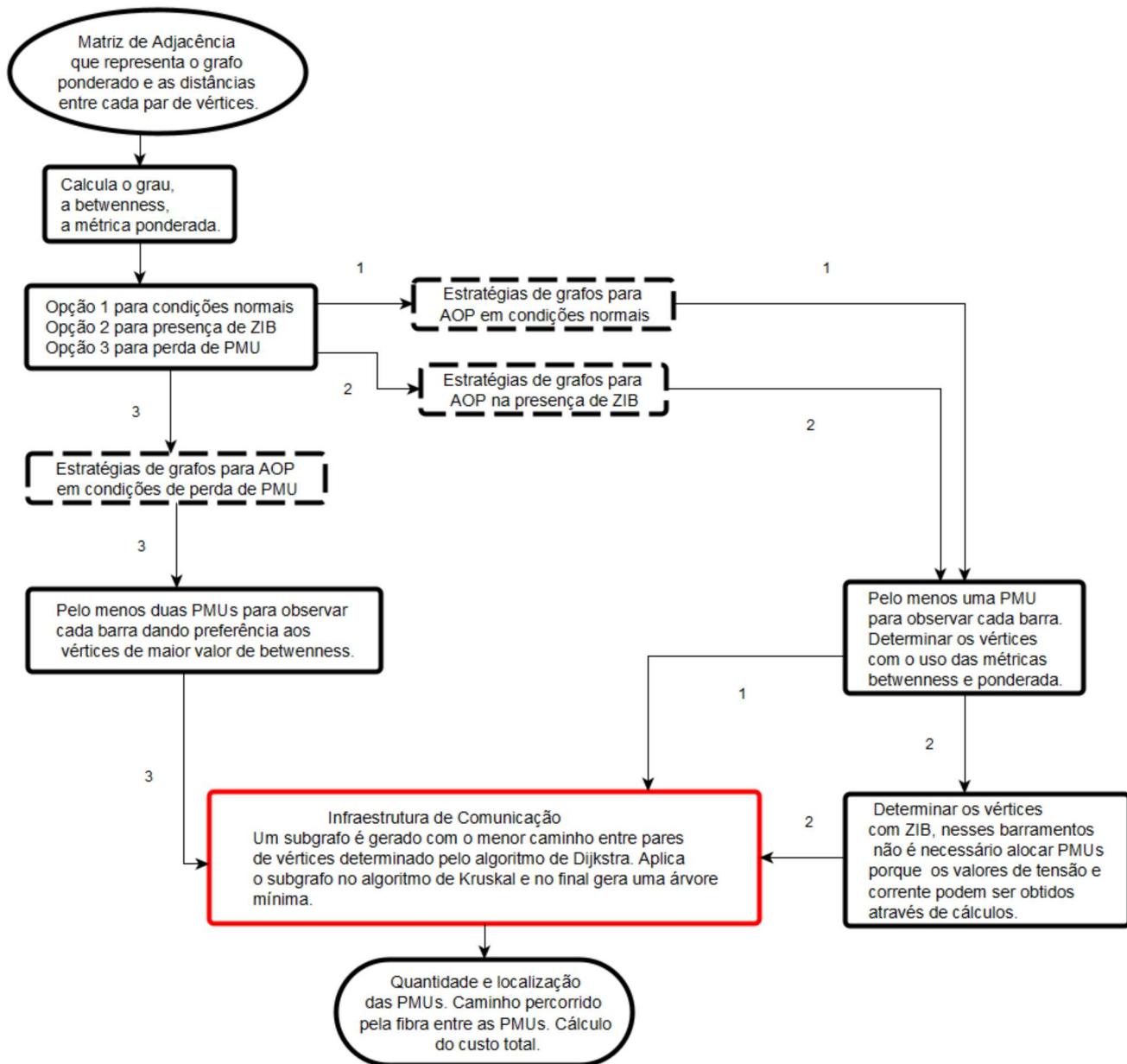


Figura 20 – Fluxograma referente as estratégias de grafos utilizadas para alocação de PMUs e IC (Fonte: Própria autoria)

A entrada do algoritmo é a matriz de adjacência e a saída é a quantidade e a

localização das PMUs com o caminho percorrido pela fibra entre as PMUs.

4.1 Formulação do Problema

A formulação do problema examina a abrangência de todos os gastos com a instalação de equipamentos e os custos com a infraestrutura de comunicação. Nos custos de equipamentos, incluem-se as PMUs, os PDCs, os *switches* e roteadores nos barramentos. Os custos com a IC referem-se aos cabos OPGW necessários para interligar todas as barras com PMUs. Os cabos OPGW são instalados sobre a rede elétrica, considerando-se um sistema de transmissão independente e numa arquitetura centralizada.

4.1.1 Operações em condições normais

A seguir a formulação do problema em condições normais é definida. O problema é declarado nas equações (4.1) - (4.9) (CRUZ et al., 2022):

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^n cp_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (cf \cdot [ap]_{ij} + cr \cdot x_i) \cdot [y]_{ij} \right) \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$A \cdot X \geq b = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (4.2)$$

$$\forall j \in V, x_j + \sum_{ij \in E} x_i \geq 1 \quad (4.3)$$

$$x_f = 1 \quad (4.4)$$

$$\forall S \subseteq V, \sum_{ij: i \in S, j \in V \setminus S} y_{ij} \geq 1 \quad (4.5)$$

$$\forall S \subseteq V, \sum_{ij: i, j \in S} y_{ij} \leq |S| - 1 \quad (4.6)$$

$$\forall i, j \in V, y_{ij} \leq x_i \quad (4.7)$$

$$\forall i, j \in V, y_{ij} \leq x_j \quad (4.8)$$

$$\forall i, j \in V, y_{ij} \leq e_{ij} \quad (4.9)$$

Onde:

n é o número de barras na rede;

cp_i é o custo de alocação de PMU na barra i ;

cf é o custo de OPGW por km;

cr é o custo dos dispositivos ativos, como roteadores e *switches*. Considera-se que estes equipamentos serão alocados em todas as barras com PMUs;

x_i é definido como 1 se uma PMU for colocada na barra i , e 0 caso contrário;

$[ap]_{ij}$ representa a distância do barramento i ao barramento j . É um elemento da matriz de adjacência ponderada (com distâncias) da rede;

A é a matriz de adjacência da rede, cujos elementos $[ap]_{ij}$ recebem valores 1 se o barramento i está conectado ao barramento j e 0 caso contrário;

y_{ij} assume o valor 1 se uma linha existente for selecionada para integrar a rede de comunicação OPGW;

X é o vetor da localização das PMUs, cujos elementos foram definidos anteriormente.

Na função objetivo (eq. 4.1) o primeiro termo visa minimizar o custo total relacionado às PMUs e o segundo termo o custo da infraestrutura de comunicação. O termo referente a IC tem dois componentes: um está relacionado a elementos ativos, como *switches* e roteadores e o outro está relacionado à implantação do OPGW, proporcional ao comprimento dos cabos implantados.

A restrição (4.2) garante a observabilidade do sistema de potência em condições normais se b for um vetor unitário de comprimento n . Além disso, a equação (4.2) assegura a observabilidade topológica.

As equações de numeração (4.3) até (4.9) são restrições de conjunto dominante da teoria dos grafos. A expressão (4.4) é referente a definição do vértice onde está localizado o PDC central. A equação (4.5) assegura que os cabos OPGW conectem todos os barramentos com PMU. A condição restritiva (4.6) impõe que a rede de comunicação tenha uma configuração em estrutura de árvore. O parâmetro S é o conjunto de todos os barramentos ligados pela rede OPGW. As restrições (4.7) e (4.8) são utilizadas para verificar se cada vértice pertencente as arestas selecionadas existem no grafo de origem. A restrição (4.9) tem a função de verificar se as arestas localizadas entre cada par de vértices selecionados fazem parte do grafo de origem.

4.1.2 Operações em caso de perda de PMU

Quando ocorrem problemas de funcionamento das PMUs nos sistemas elétricos de potência, o sistema pode ficar inobservável. A EE é uma ferramenta que necessita de um sistema observável para ser executada. Deve-se então melhorar a proteção do sistema de potência com o intuito de evitar a inobservabilidade do sistema devido à falha de alguma PMU. Considerou-se que cada barra do sistema deve ser observada por pelo menos duas

PMUs. Ao adotar esse requisito, o problema utilizado para condições normais deve ser reformulado. Com a finalidade de remodelar o problema, basta manter as equações (4.1) até (4.9), trocando apenas a restrição (4.2) pela (4.10).

$$A \cdot X \geq [2 \ 2 \ 2 \ \dots \ 2]^T \quad (4.10)$$

4.2 Estratégias de grafos para AOP em condições normais

O problema proposto envolve a minimização dos custos com a instalação de equipamentos e da infraestrutura de comunicação. O objetivo é encontrar o custo total mínimo a partir da alocação das PMUs em locais que proporcionem um menor comprimento dos cabos OPGW.

A alocação das PMUs e da IC envolve dois problemas de otimização simultâneos, a primeira etapa do algoritmo é minimizar a quantidade de PMUs considerando a possibilidade de minimizar a infraestrutura de comunicação, porque nem sempre o número mínimo de PMUs garante o menor custo da IC. A *betweenness* foi utilizada para encontrar os vértices que proporcionam o menor comprimento de cabos OPGW.

As distâncias entre as barras são definidas como os pesos e n o número de barras do sistema. Desenvolveu-se o cálculo da razão do somatório dos pesos de cada vértice pelo grau, para contribuir na seleção de vértices que possibilitam um menor custo de OPGW. Essa razão foi nomeada de métrica ponderada, e mostrou-se fundamental para a escolha de alguns vértices do conjunto dominante.

A métrica ponderada e sua média aritmética são apresentadas respectivamente nas equações (4.11) e (4.12):

$$ponderada = \frac{\sum_{i=1}^n pesos_i}{grau} \quad (4.11)$$

A definição da média aritmética da métrica ponderada é:

$$media = \frac{\sum_{i=1}^n ponderada_i}{n} \quad (4.12)$$

Existe um critério para a seleção dos vértices escolhidos ao utilizar essas duas métricas. A média aritmética é calculada para identificar os vértices que possuem um valor bastante inferior à média. Para os sistemas testados neste trabalho, foi escolhido empiricamente o valor de 58% da média aritmética para que os vértices fossem verificados. Após a verificação, os vértices que tiverem *betweenness* diferente de zero e forem adjacentes a vértices que possuem os valores mais elevados de *betweenness* serão selecionados. Isso tudo porque se observou que vértices nessas condições colaboraram para a obtenção de um conjunto dominante conexo com um somatório de pesos mínimo.

As etapas a seguir descrevem como foram selecionados os vértices para a alocação de PMUs.

Etapa 1: Calcula o grau, o valor da *betweenness*, métrica ponderada de cada vértice e a média aritmética da métrica ponderada.

Etapa 2: Um conjunto vazio S é inicializado onde serão adicionados os vértices adjacentes aos vértices terminais.

Etapa 3: Verifica os vértices que satisfazem a seguinte condição:

$$(\text{cálculo da equação 4.11}) < 0,58 * (\text{cálculo da equação 4.12}) \neq 0.$$

Quando essa condição é satisfeita, os vértices que tiverem *betweenness* diferente de zero e forem adjacentes a vértices que possuem os valores mais elevados de *betweenness* serão adicionados a S .

Etapa 4: Adiciona ao conjunto S os vértices com maior valor de *betweenness* até obter um conjunto dominante.

Etapa 5: Qualquer vértice com *betweenness* igual a zero não pertencerá ao conjunto S , para assegurar que nenhum vértice seja escolhido para alocar PMU.

Após o sistema se tornar observável com uma quantidade de PMUs mínima de modo que o comprimento da rede seja mínimo, a simulação do algoritmo segue para a fase de construção da IC descrita a seguir a partir da Etapa 6 até a Etapa 9.

Etapa 6: O algoritmo de Dijkstra localiza os vértices nos caminhos mais curtos entre os vértices onde as PMUs serão alocadas.

Etapa 7: A partir dos vértices selecionados pelo algoritmo de Dijkstra, um subgrafo $G1 = (V', E')$ é gerado sendo eliminados os vértices desnecessários do grafo original.

Etapa 8: O algoritmo de Kruskal é usado para definir uma árvore geradora mínima para o subgrafo $G1$.

Etapa 9: Calcula o custo total com PMUs e OPGW.

Um modo de compreender melhor como ocorre essa seleção de vértices para o conjunto dominante em cada etapa é utilizar a rede IEEE-30 como exemplo. A Figura 21 representa a simulação da rede IEEE-30, onde as linhas destacadas correspondem aos cabos OPGW e os nós pretos são aqueles onde as PMUs foram colocadas. Conforme pode-se observar, a Figura 21 possui os valores de *betweenness* de cada nó da rede IEEE-30, facilitando o entendimento do algoritmo.

Os vértices 9, 12 e 25 foram selecionados na etapa 2, que escolhe os nós adjacentes aos que tem grau igual a 1. Os vértices 1, 3, 7, 8, 19 e 21 satisfazem a condição descrita anteriormente na etapa 3, porém apenas os valores 3 e 7 foram selecionados porque além de possuírem o valor de *betweenness* diferente de zero, são também adjacentes aos três vértices

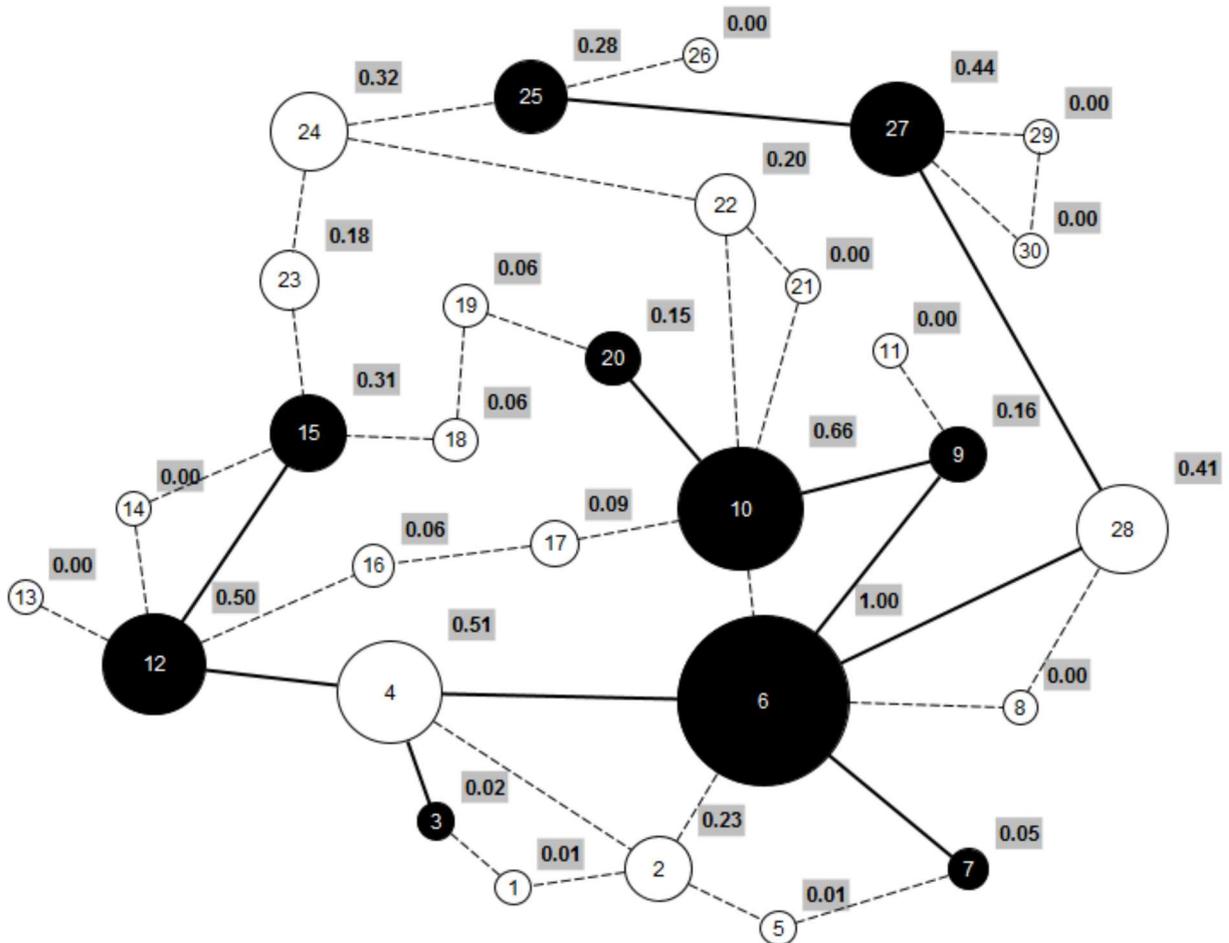


Figura 21 – *Betweenness* de cada vértice da rede IEEE-30 (Fonte: Própria autoria)

com maior valor de *betweenness* que são os vértices 4, 6 e 10. O vértice 8 é adjacente ao 6 e 10, enquanto o nó 21 é adjacente ao 10, porém, tanto o 8 quanto o 21 tem o valor de *betweenness* igual a zero e por esse motivo não foram escolhidos. Os vértices 1 e 19, como não são adjacentes aos nós 6, 10 e 4, também não foram selecionados. Na etapa 4 os vértices selecionados foram 6, 10, 15, 20 e 27. A métrica *betweenness* com a métrica proposta ponderada foi eficiente na simulação em cenário de operação normal.

4.3 Estratégias de grafos para AOP na presença de ZIB

O ZIB de um sistema denota as barras que não possuem instalações de geração de energia ou carga. Se um determinado barramento não possui gerador de energia para injetar energia nele ou cargas para consumir energia, então pode-se afirmar que o fluxo de corrente é igual a zero. Quando fluxo de corrente é igual a zero, a soma de todas as medidas de corrente dos fasores de seus ramos incidentes é igual a zero. O ZIB é aplicado para tornar um sistema observável com uma quantidade menor de PMUs, permitindo uma economia com custo de PMUs. Para a simulação na presença de ZIB, algumas mudanças

foram necessárias em relação à situação de operação em condições normais. As etapas a seguir descrevem como foi elaborada a escolha dos vértices para a alocação de PMUs, na presença de ZIB.

Etapa 1: Calcula o grau, o valor da *betweenness*, métrica ponderada de cada vértice e a média aritmética da métrica ponderada.

Etapa 2: Um conjunto vazio S é inicializado onde serão adicionados os vértices adjacentes aos vértices terminais.

Etapa 3: Verifica os vértices que satisfazem a seguinte condição:

$$(\text{cálculo da equação 4.11}) < 0,58 * (\text{cálculo da equação 4.12}) \neq 0.$$

Quando essa condição é satisfeita, os vértices que tiverem *betweenness* diferente de zero e forem adjacentes a vértices que possuem os valores mais elevados de *betweenness* serão adicionados a S .

Etapa 4: Qualquer vértice com *betweenness* igual a zero não pertencerá ao conjunto S , para assegurar que nenhum vértice seja escolhido para alocar PMU.

Etapa 5: Adiciona ao conjunto S os vértices com maior valor de *betweenness* até obter conjunto dominante e em seguida considera-se a condição na presença de ZIB.

Na Figura 22 nos vértices 4, 5, 6 e 9 foram alocadas as PMUs e considerou-se ZIB no vértice 7 representado em formato retangular, entretanto o valor de tensão, fase e corrente dos vértices 7 e 8 podem ser descobertos mesmo com a ausência de PMU em 7. Como os nós 4 e 9 são adjacentes ao 7, portanto é possível obter os valores das correntes dos ramos 4-7 e 7-9. Em seguida determina-se o fasor da corrente no ramo 7-8, com a aplicação da lei dos nós em 7 e consecutivamente por intermédio da lei de Ohm calcula-se a tensão na barra terminal 8.

Após o sistema se tornar observável com uma quantidade de PMUs mínima de modo que o comprimento da rede seja mínimo, a simulação do algoritmo segue para a fase de construção da IC descrita a seguir a partir da Etapa 6 até a Etapa 9.

Etapa 6: O algoritmo de Dijkstra localiza os vértices nos caminhos mais curtos entre os vértices onde as PMUs serão alocadas.

Etapa 7: A partir dos vértices selecionados pelo algoritmo de Dijkstra, um subgrafo $G1 = (V', E')$ é gerado sendo eliminados os vértices desnecessários do grafo original.

Etapa 8: O algoritmo de Kruskal é usado para definir uma árvore geradora mínima para o subgrafo $G1$.

Etapa 9: Calcula o custo total com PMUs e OPGW.

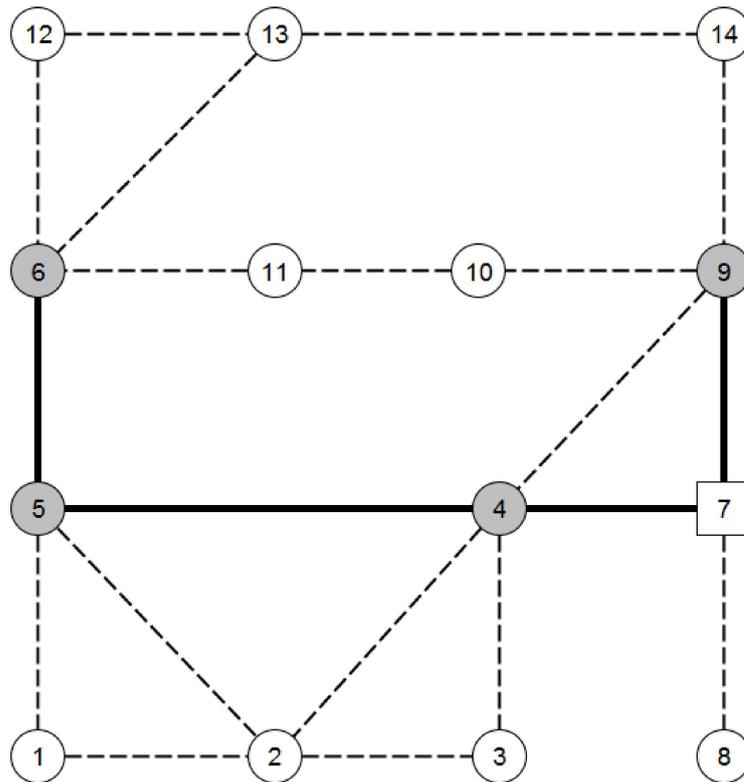


Figura 22 – Rede IEEE-14 considerando ZIB (Fonte: Própria autoria)

4.4 Estratégias de grafos para AOP em condições de perda de PMU

Considerou-se que cada barra do sistema deve ser observada por pelo menos duas PMUs. As etapas a seguir descrevem como foram escolhidos os vértices para a alocação de PMUs.

Etapa 1: Calcula o grau, o valor da *betweenness*, métrica ponderada de cada vértice e a média aritmética da métrica ponderada.

Etapa 2: Um conjunto vazio S é inicializado onde os vértices eleitos serão introduzidos.

Etapa 3: Adiciona ao conjunto S os vértices de modo que cada barra seja observada por pelo menos duas PMUs, dando preferência aos vértices com maior valor de *betweenness*.

Após o sistema obter a quantidade de PMUs desejada, a simulação do algoritmo segue para a fase de construção da IC descrita a seguir a partir da Etapa 4 até a Etapa 7.

Etapa 4: O algoritmo de Dijkstra localiza os vértices nos caminhos mais curtos entre os vértices onde as PMUs serão alocadas.

Etapa 5: A partir dos nós selecionados pelo algoritmo de Dijkstra, um subgrafo $G_1 = (V', E')$ é gerado sendo eliminados os vértices desnecessários do grafo original.

Etapa 6: O algoritmo de Kruskal é usado para definir uma árvore geradora mínima

para o subgrafo G1.

Etapa 7: Calcula o custo total com PMUs e OPGW.

A Figura 23 representa o resultado para a situação de perda de PMUs na rede IEEE-14 com presença de ZIB, onde os nós de cor cinza são os que representam a alocação das PMUs.

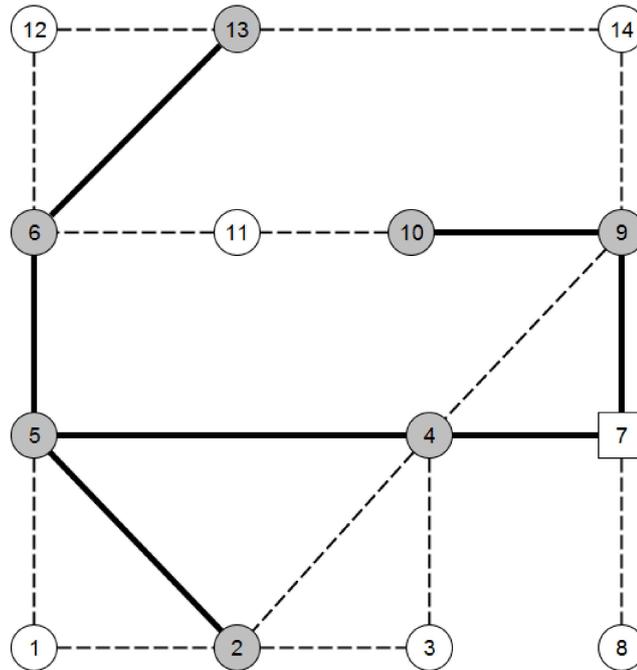


Figura 23 – Rede IEEE-14 considerando perda de PMU (Fonte: Própria autoria)

Conforme afirmado anteriormente em estratégia de grafos para AOP na presença de ZIB, a aplicação da lei dos nós na barra 7 determina o fasor da corrente do ramo 7-8 e consecutivamente com a lei de Ohm calcula-se a tensão na barra terminal 8. Determinou-se duas PMUs observando cada barra, exceto na barra terminal 8, adjacente a barra 7, em formato retangular onde há presença de ZIB.

É importante observar que a preferência por nós com maior valor de *betweenness* proporcionou uma solução com menor custo global.

5 Testes e Resultados

Neste capítulo, apresentam-se as simulações do algoritmo proposto para as redes de transmissão: IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300 barras. Com a finalidade de estabelecer as distâncias das linhas para cada rede, determinou-se que todas as linhas de transmissão têm o mesmo condutor e configuração. Assim, as distâncias relativas entre todas as barras são extraídas da matriz de admitância do sistema (WASHINGTON, 1999). Devido ao propósito de comparação de resultados, consideraram-se os custos da PMU e da OPGW, conforme os valores descritos na Tabela 2. Os custos com *switches* e roteadores foram considerados irrisórios em comparação com os custos das PMUs e com OPGW.

Tabela 2 – Tabela com custo de PMU e OPGW

Equipamento	Custo
PMU / Unidade	U\$ 40.000
OPGW / km	U\$ 10.000

5.1 Resultados para AOP em condições normais

As siglas PRO e LIT são utilizadas na primeira coluna a partir da Tabela 3, PRO se refere a algoritmo proposto e LIT se refere a literatura. O algoritmo proposto é comparado com a seguinte literatura (CRUZ et al., 2019). Foram elaborados gráficos a fim de comparação e melhor percepção entre a diferença dos custos globais de LIT e PRO.

Todas as tabelas referentes aos resultados para condições normais, ZIB e perda de PMUs seguem o mesmo padrão, observado a partir da Tabela 3. Na segunda coluna estão descritos os nós onde foram alocadas as PMUs, na terceira a quantidade de PMUs alocadas, na quarta o comprimento de fibra óptica em km, na última coluna o custo global, incluindo o custo com PMUs e com OPGW. Na Tabela 3 é possível perceber que para a rede IEEE-14 os resultados são os mesmos, provando que não foi possível otimizar mais do que o trabalho utilizado como referência para comparação.

Tabela 3 – Resultado para o sistema IEEE-14 barras em condições normais

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	4,5,6,7,9	5	199	2,2
PRO	4,5,6,7,9	5	199	2,2

Percebe-se que o grafo introduzido na Figura 24 forneceu os dados computados da Tabela 3. As linhas não tracejadas representam a fibra OPGW e os nós com cor cinza correspondem as PMUs alocadas.

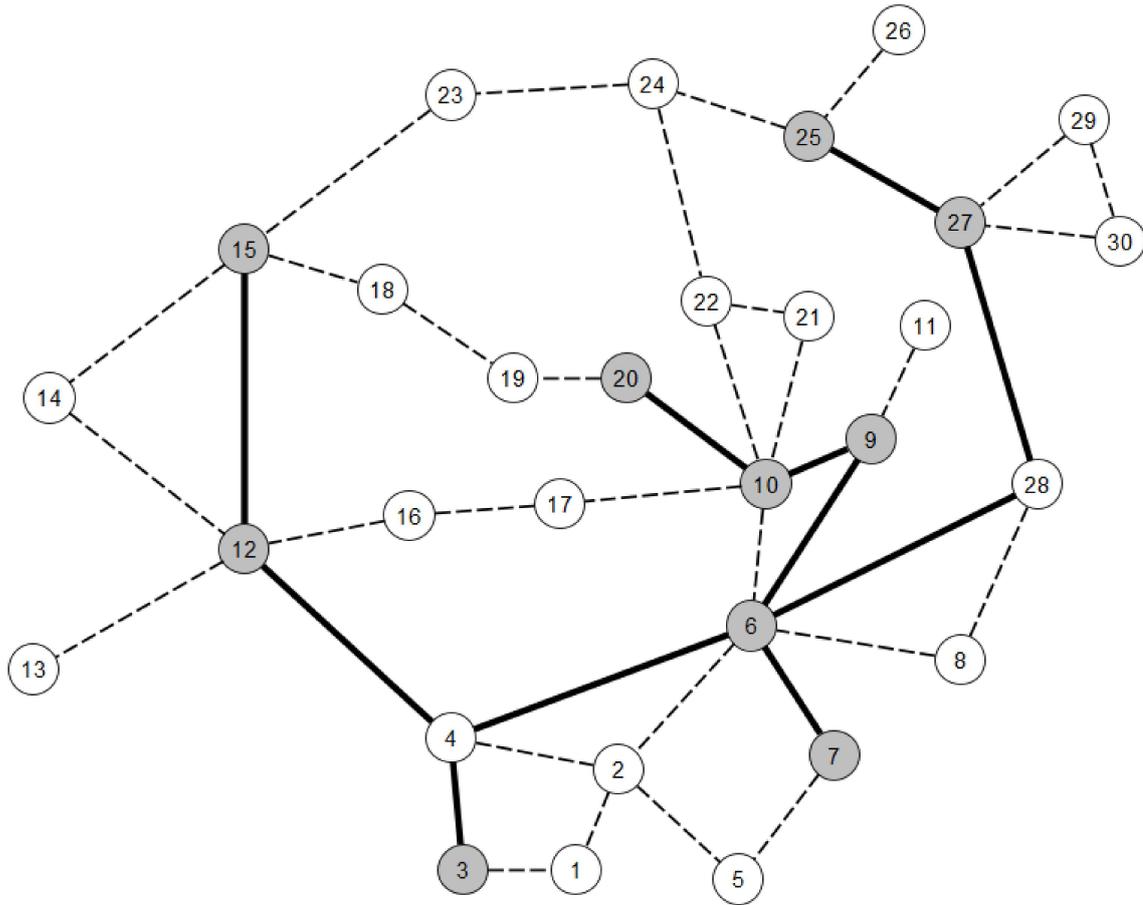


Figura 25 – AOP e IC para rede IEEE-30 em condições normais (Fonte: Própria autoria)

Tabela 5 – Resultado para o sistema IEEE-118 barras

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	2,5,9,11,12,17,21,27,30,31,32,34,40,45,49, 50,51,54,59,65,66,68,70,71,75,77,80, 83,86,89,92,96,100,105,110	36	1991,5	21,4
PRO	3,5,9,12,15,17,20,23,27,30,31,32,34,37, 40,45,49,51,54,56,61,64,65,66,68,71,75 77,78,83,86,89,92,96,100,105,110	37	1938,6	20,9

arestas destacadas caracterizam os caminhos percorridos pela fibra ótica. Essa simulação representa o grafo que gerou os resultados de quantidades de PMUs, custos com OPGW, custo total e apresentados na Tabela 5.

Analisando-se os dados descritos na Tabela 6 a solução apresentou uma PMU a mais do que na LIT, porém com um custo menor de fibra ótica, levando a uma diminuição de 0,85% do custo total. É importante salientar que como o custo é da ordem de 10⁶, então uma redução mesmo que com um valor de 0,85% tem bastante relevância.

As atenuações em porcentagem dos custos totais para os sistemas IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300, foram comentadas na Tabela 7. A solução para o sistema

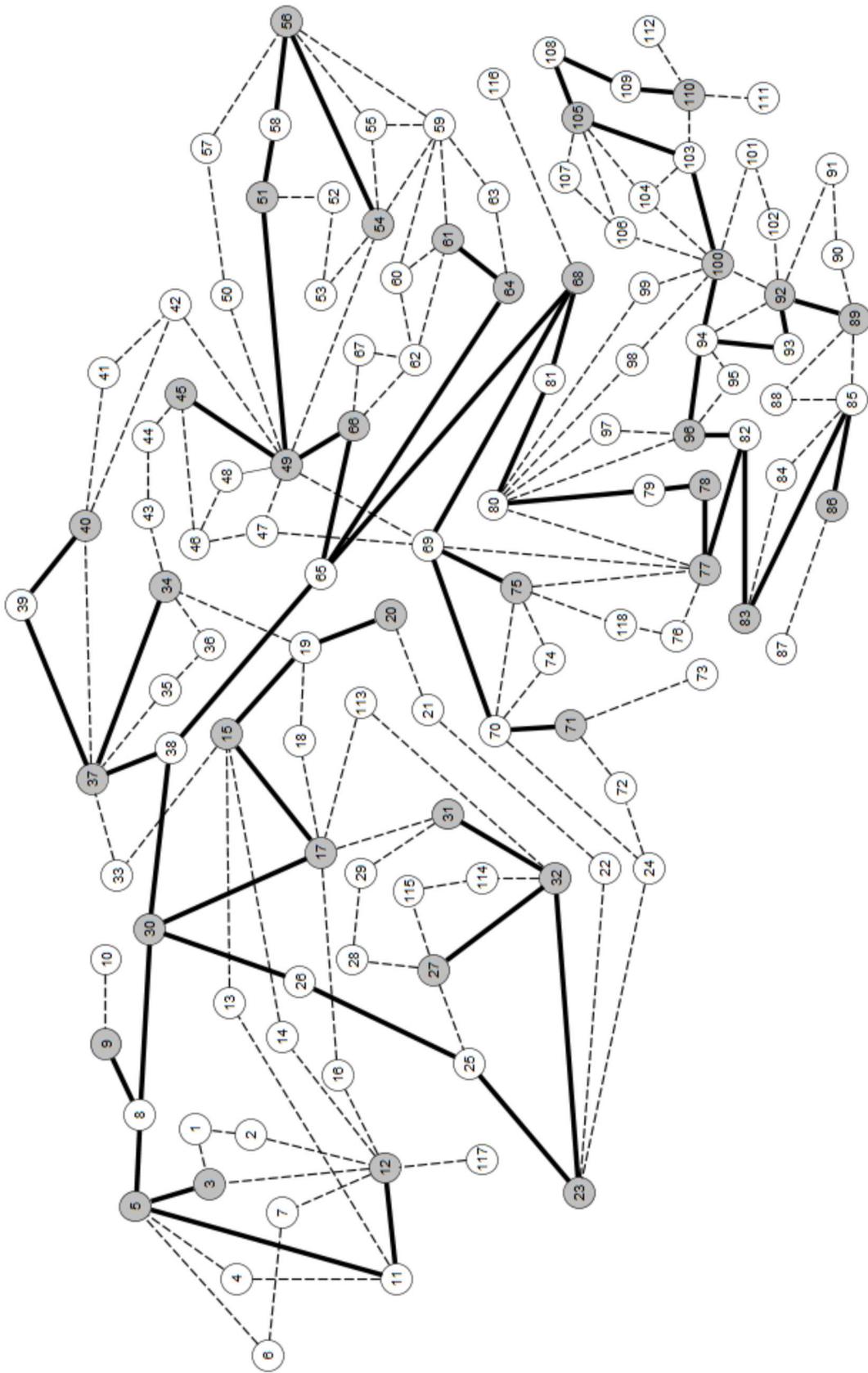


Figura 26 – Alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-118 em condições normais (Fonte: Própria autoria)

Tabela 6 – Resultado para o sistema IEEE-300 barras em condições normais

	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	91	7862,4	82,3
PRO	92	7792,3	81,6

IEEE-14 foi a única que não apresentou redução percentual.

Tabela 7 – Resultado de redução (%) dos custos totais para situações normais de operação

Rede	Redução do Custo Global em (%)
IEEE-14	0
IEEE-30	3,58
IEEE-118	2,34
IEEE-300	0,85

5.2 Resultados para AOP na presença de ZIB

Um barramento de injeção zero (ZIB) contribui para a diminuição da quantidade de PMUs necessárias para tornar o sistema de energia totalmente observável. A resolução obtida para o sistema IEEE-14 barras na presença de ZIB, presente na Tabela 8 mostra que o algoritmo proposto obteve o mesmo valor da literatura U\$ $2,15 \times 10^6$.

Ao comparar as resoluções da rede IEEE-14 para situações normais e com presença de ZIB, que estão localizadas respectivamente na Tabela 3 e na Tabela 8 foi verificado que ocorreu o decréscimo de uma PMU na Tabela 8 em relação à Tabela 3, todavia a quantidade de OPGW foi de 199 km tanto na Tabela 3 quanto na Tabela 8. Vale ressaltar que o resultado proposto e o da literatura são iguais na tabela 8. As Figuras 27, 28 e 29 representam os grafos que originaram os dados respectivamente das Tabelas 8, 9 e 10. As linhas não tracejadas correspondem ao caminho percorrido pela fibra OPGW, os nós onde foram alocadas as PMUs estão com cor cinza e os barramentos em formato retangular são os vértices onde se considerou ZIB.

Tabela 8 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-14 barras

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	4,5,6,9	4	199	2,15
PRO	4,5,6,9	4	199	2,15

Tabela 9 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-30 barras

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	2,4,10,12,15,20,27	7	546,3	5,74
PRO	3,6,7,10,12,15,20,27	8	527,39	5,59

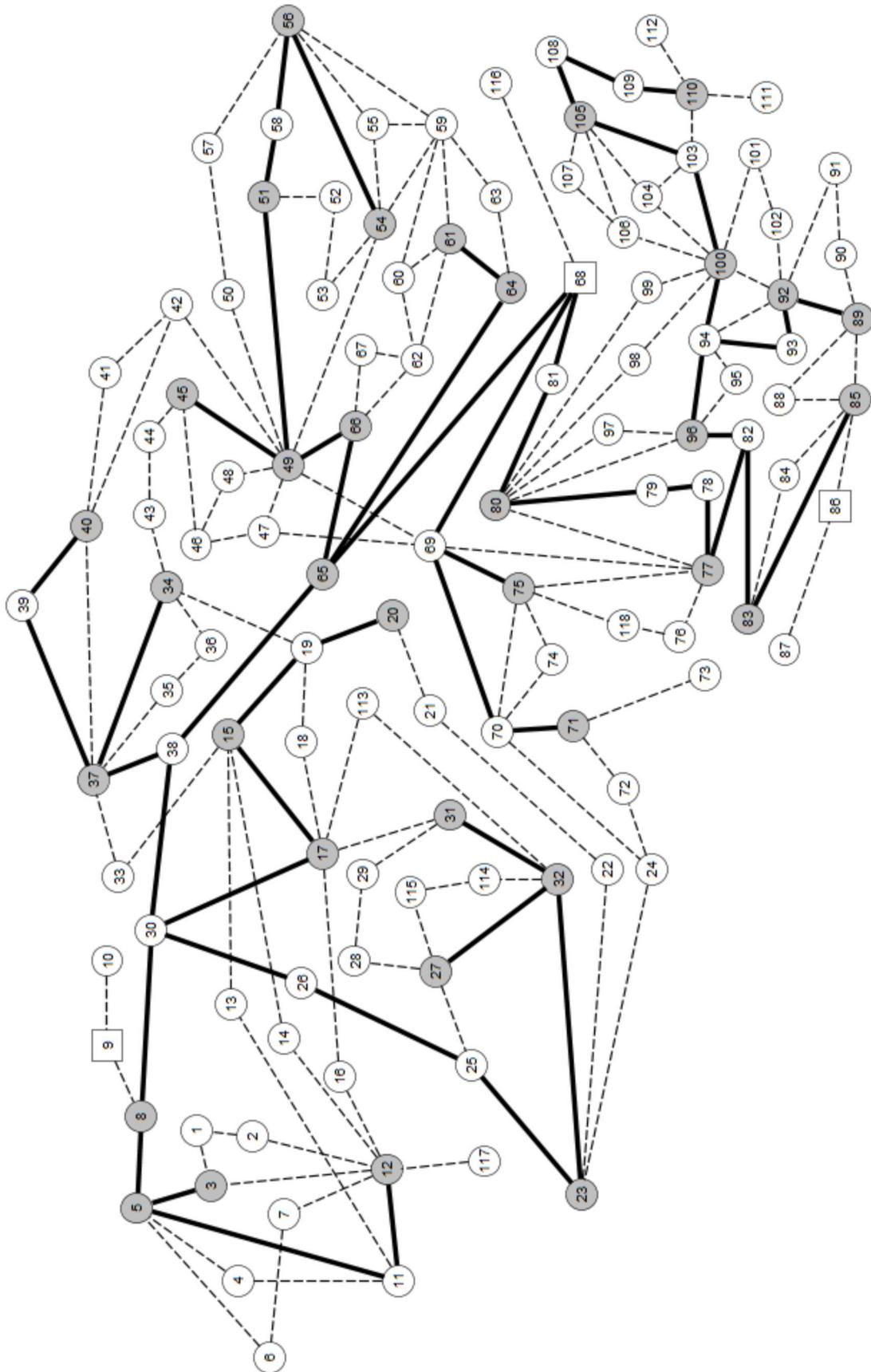


Figura 29 – AOP e IC para a rede IEEE-118 na presença de ZIB (Fonte: Própria autoria)

A simulação com ZIB para o sistema IEEE-30, cujos resultados estão na Tabela 9 revela que mesmo com o acréscimo de uma PMU, o comprimento do enlaço com OPGW foi menor, fazendo com que o preço total em PRO seja menor que em LIT.

Observa-se na Tabela 10 uma quantidade de PMUs maior no algoritmo proposto, entretanto, a missão de otimizar o preço total foi cumprida, porque com a utilização da métrica ponderada e da *betweenness* foi possível atenuar o custo com OPGW, visto que a quantidade em *km* de OPGW foi menor em PRO.

Tabela 10 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-118 barras

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	3,8,11,12,17,21,27,31,32,34,37,40,45,49,51, 54,56 61,66,70,71,75,77,80,83 86,89,92,96, 100,105,110	32	1983,3	21,11
PRO	3,5,8,12,15,17,20,23,27,31,32,34,37,40,45,49, 51,54,56,61,64,65,66,71,75,77,80,83,85, 89,92,96,100,105,110	35	1862,4	20,02

A Tabela 11 é referente ao resultado da simulação com ZIB para o sistema IEEE-300 barras, contendo a comparação entre o que foi proposto e os dados da literatura e a Tabela 12 introduz a redução percentual do custo total com ZIB.

Tabela 11 – Resultado com ZIB para o sistema IEEE-300 barras

	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	89	7888,0	82,4
PRO	89	7577,2	79,3

Tabela 12 – Resultado de redução (%) dos custos totais com ZIB

Rede	Redução do Custo Global em (%)
IEEE-14	0
IEEE-30	2,61
IEEE-118	5,17
IEEE-300	3,76

Ao examinar os sistemas com ZIB, verificou-se na Tabela 12 uma queda percentual para a rede IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300. Apenas para a rede IEEE-14 não aconteceu a otimização. A redução do custo global foi maior para o sistema IEEE-118.

5.3 Resultados para AOP em condições de perda de PMU

Em casos de perda ou falha de PMU a análise de observabilidade pode ser comprometida, desse modo deve-se considerar que cada barra do sistema de potência deve ser

observada por pelo menos duas PMUs. Ao garantir um sistema completamente observável, mesmo em situações de perdas ou falhas de PMUs a EE será executada com eficácia. Nos barramentos em formato retangular considerou-se ZIB.

Os dados computados na Tabela 13 foram gerados através do grafo da Figura 30.

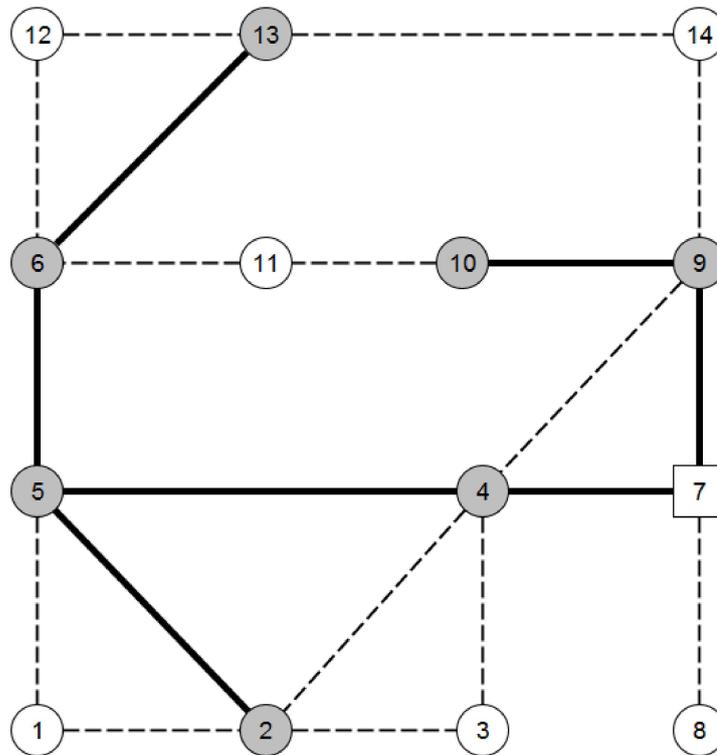


Figura 30 – Alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-14 com perda de PMU (Fonte: Própria autoria)

Por intermédio da Tabela 13 percebe-se que houve um decréscimo do custo global para o sistema IEEE-14 barras, a diminuição ocorreu porque foi possível otimizar o custo da implantação de fibra ótica. Vale ressaltar que as linhas destacadas correspondem ao caminho percorrido pela fibra OPGW, os nós onde foram alocadas as PMUs estão com cor cinza e os barramentos em formato retangular são os vértices onde se considerou ZIB.

Tabela 13 – Resultado para o sistema IEEE-14 barras com perda de PMU

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	2,4,5,6,9,11,13	7	376,7	4,05
PRO	2,4,5,6,9,10,13	7	334,6	3,63

Os valores obtidos na Tabela 14 foram originados por intermédio do grafo da Figura 31, que permite uma melhor percepção da simulação efetuada. Conforme pode ser analisada, a Tabela 14 referente ao resultado para o sistema IEEE-30 barras obteve uma solução de gasto total com redução significativa, ou seja, uma economia um pouco maior do que U\$ 10⁶.

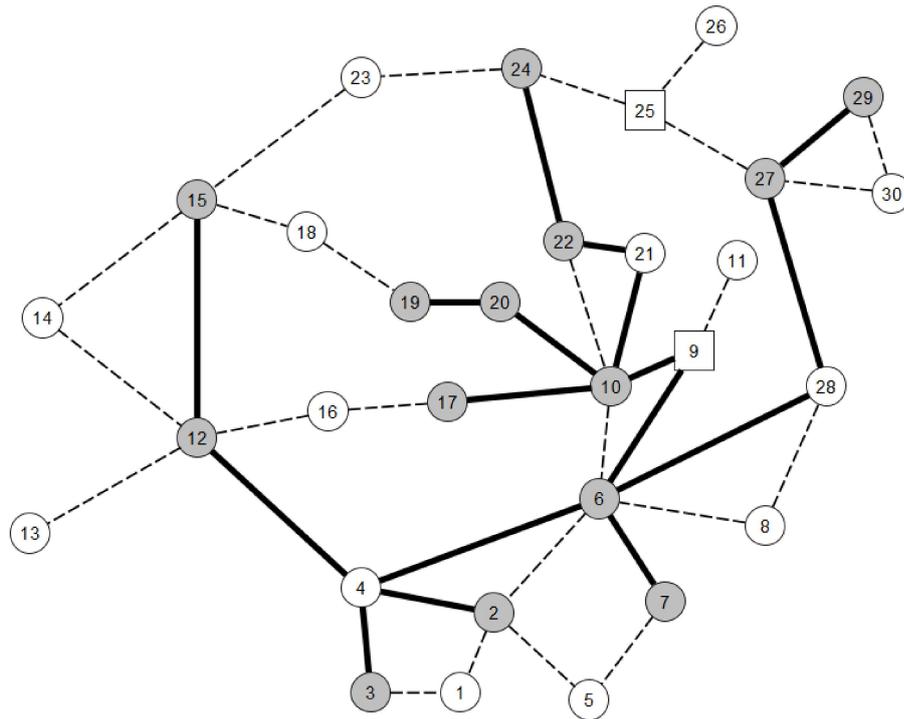


Figura 31 – Alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-30 com perda de PMU (Fonte: Própria autoria)

Tabela 14 – Resultado para o sistema IEEE-30 barras com perda de PMU

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	2,3,4,6,7,10,12,13,15,17,19,20,21,24,27,30	16	1026,8	10,9
PRO	2,3,4,6,7,10,12,15,17,19,20,22,24,27,29	15	908,93	9,69

Exibida na Tabela 15, a solução para a rede IEEE-118 na condição de perdas de PMU, obteve uma quantidade de PMUs reduzidas e também um custo menor com OPGW para o algoritmo proposto, o que implicou no decréscimo do custo global quando comparado com a LIT. Embora o resultado dos custos em situações de perdas de PMUs seja mais elevado devido a uma maior quantidade de PMUs e *km* de OPGW, a otimização proposta também obteve êxito para o sistema IEEE-118. O grafo da Figura 32 reproduz a simulação, referente aos dados da Tabela 15.

A Tabela 16 expressa a resolução para a condição de perda de PMU do sistema IEEE-300 barras. Os dados relacionados a situação de perda de PMU da rede IEEE-300 barras não foram localizados na literatura, portanto não foi possível efetuar a comparação entre o algoritmo proposto e literatura.

O resultado da Tabela 17 exhibe a porcentagem de redução dos custos totais em relação ao trabalho comparado. Devido à falta de dados referentes a perda de PMU para a rede IEEE-300, não foi possível apresentar o percentual de redução na Tabela 17. Os percentuais de diminuição são maiores para os resultados em condições de perdas de PMU

Tabela 15 – Resultado para o sistema IEEE-118 barras

	PMUs	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
LIT	1,3,5,6,8,9,11,12,15,17,19,21,22,24,25,27, 29,31,32,34,36,37,40,42,44,45,48,49,51, 52,54,56,57,59,62,65,66,69,70,71,75,77 79,80,83,85,86,87,89,90,92,94,96,100,102 105,107,109,110,111,112,115,117,118	64	3016,0	32,7
PRO	1,3,5,7,8,11,12,15,17,19,21,23,24,26,27 29,32,34,36,37,40,41,44,45,48,49,50,51 52,54,56,61,62,63,64,66,68,69,70,71,73,75 77,78,80,83,85,89,90,92,94,96,100,102 105,107,109,110,111,112,114,118	62	2470,0	29,9

Tabela 16 – Resultado para o sistema IEEE-300 barras com perda de PMU

	NrPMUs	km(OPGW)	U\$[10 ⁶]
PRO	164	28698	293,5

do que em outras situações.

Tabela 17 – Resultado de redução (%) dos custos totais considerando perda de PMU

Rede	Redução do Custo Global em (%)
IEEE-14	10,37
IEEE-30	11,10
IEEE-118	8,62

5.4 Porcentagem da média da métrica ponderada e o Custo Total

A métrica ponderada e a *betweenness centrality* foram utilizadas para a escolha de vértices. Determinou-se o valor de 58% da média da métrica ponderada para a escolha dos vértices. Ao analisar o gráfico da Figura 33 cujo custo total foi normalizado, a rede IEEE-14 (cor vermelha) obteve custo mínimo de U\$ $2,2 \times 10^6$ entre as porcentagens de 0 até 69 % e o custo máximo foi de U\$ $3,6 \times 10^6$ entre 74 até 100 %. O resultado para a rede IEEE-30 (cor azul) obteve custo mínimo de U\$ $6,46 \times 10^6$ para 58 % e o custo máximo foi U\$ $7,82 \times 10^6$ de entre 90 até 92%. Através da análise do gráfico da Figura 33 para a rede IEEE-118 (cor verde) o custo mínimo de U\$ $20,9 \times 10^6$ entre 58 % e 100 % sendo que o custo máximo foi U\$ $21,44 \times 10^6$ de entre 0 até 18%. Já em relação à rede IEEE-300 (cor preta) o custo mínimo de U\$ $81,6 \times 10^6$ entre 0 % e 61% o custo máximo foi U\$ $82,7 \times 10^6$ para 100%. Através desses valores de custo mínimo e máximo percebeu-se que a rede IEEE-118 (cor verde) foi a apresentou a menor variação entre o custo máximo e mínimo. Ao analisar a Figura 33 percebeu-se que todas as redes IEEE testadas apresentaram um custo mínimo para o valor de 58%.

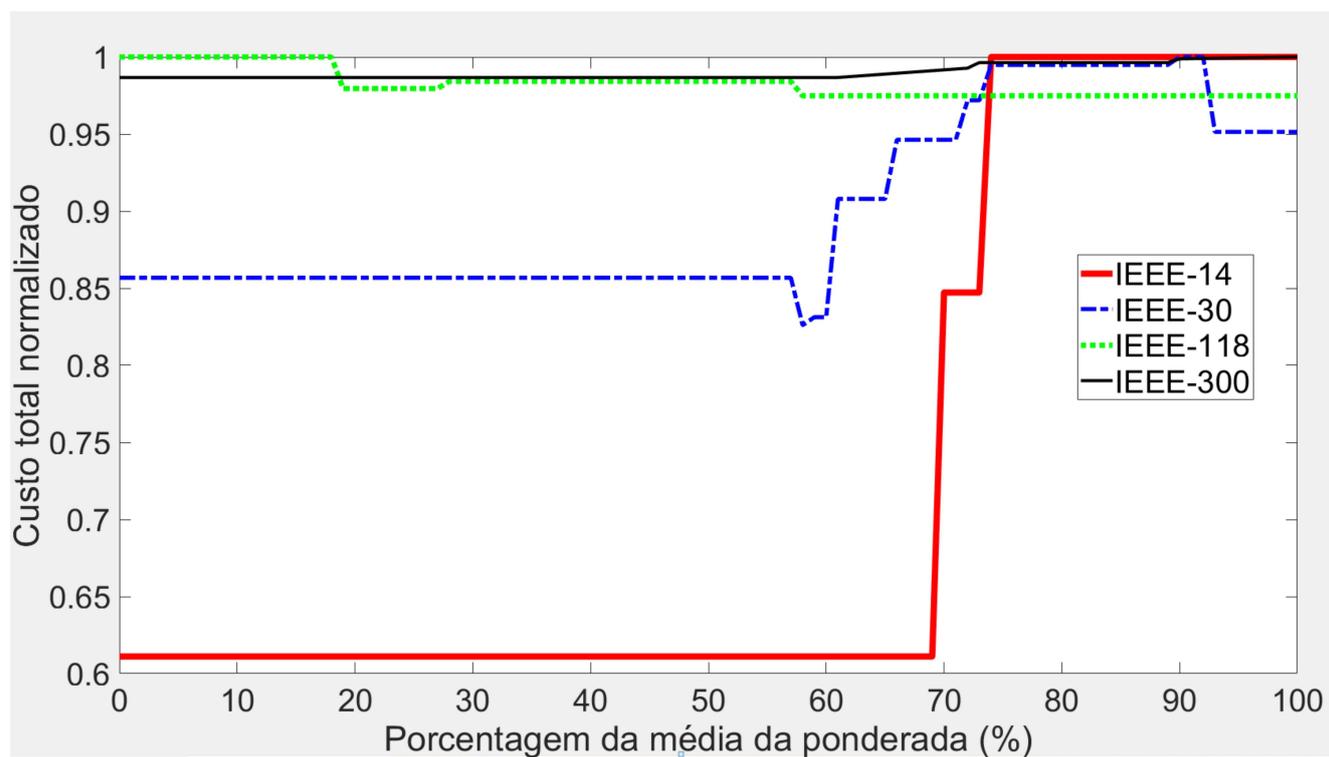


Figura 33 – Gráfico do Custo total normalizado em relação a porcentagem da média da métrica ponderada (Fonte: Própria autoria)

6 Conclusão

Embora a tecnologia *Wide Area Measurement Systems* (WAMS) proporcione um melhoramento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), o custo para sua implementação é bem elevado, logo a importância de elaborar uma otimização para o problema de Alocação Ótima de *Phasor Measurement Units* (AOP). Neste trabalho uma nova metodologia foi proposta para otimização de custo financeiro, abrangendo os custos com a instalação de equipamentos e infraestrutura de comunicação do sistema WAMS em SEPs.

O trabalho relatou sobre o surgimento das *Phasor Measurement Units* (PMUs), dotadas de alta tecnologia para medir tensão, corrente e fase no SEP e que proporcionaram um avanço em relação às Unidades Terminais Remotas (UTRs). O advento das PMUs implicou no surgimento da tecnologia WAMS, constituída de infraestrutura de comunicação moderna com centro de controle, onde os dados são tratados e monitorados. Foi comprovado que o sistema WAMS proporciona um monitoramento de melhor qualidade em comparação com o sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA), por possuir aparatos modernos. O WAMS favoreceu o aparecimento de uma Estimção de Estado (EE) dinâmica, permitindo um monitoramento robusto. Como os dados são obtidos rapidamente, é possível detectar erros e tomar decisões com finalidade preventiva. Conforme foi discutido, o WAMS pode ser utilizado para complementar o SCADA.

De acordo com algumas literaturas, uma arquitetura centralizada com PDCs distribuídos, surte um efeito melhor de segurança no tratamento dos dados, portanto esse tipo de arquitetura foi selecionada para o projeto. Abordou-se sobre os componentes internos das PMUs e seu funcionamento, além disso, também o esclareceu-se sobre as aplicações das tecnologias de comunicação em WAMS suas vantagens e desvantagens, fundamentando-se nos requisitos primordiais para um excelente funcionamento do WAMS. A fibra OPGW foi adotada neste projeto porque é uma tecnologia de comunicação bastante abordada em diversos trabalhos científicos, incluindo o trabalho utilizado como referência.

Os aspectos relevantes em relação à redundância de medidas para uma EE eficaz foram discutidos, além da análise de observabilidade numérica e sua importância no processo da elaboração da EE final. Destacou-se que a análise de observabilidade topológica requer a utilização de conceitos de teoria dos grafos para sua eficácia.

Após introduzir os principais conceitos de teoria dos grafos na dissertação, uma nova métrica foi proposta, cuja razão do somatório dos pesos de cada vértice pelo grau, contribuiu para o alcance do objetivo. Além da ponderada, a nova métrica proposta nesta literatura, a *betweenness centrality* também foi utilizada para encontrar os possíveis vértices para a alocação de PMU. O uso da métrica *betweenness centrality* contribuiu para escolha

de melhores locais para a alocação de PMUs, não somente em condições normais como em condições de ZIB e perda de PMU.

Posteriormente à alocação de PMUs, os algoritmos de Dijkstra e de árvore geradora mínima de Kruskal foram utilizados para calcular a menor distância entre as PMUs alocadas e garantir a otimização da infraestrutura de comunicação. Pode-se afirmar que a otimização do custo total nas redes IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300 obteve resultados melhores do que a literatura comparada, apenas a IEEE-14 apresentou os mesmos resultados para condições normais de operação e ZIB, porém para a perda de PMU ocorreu redução.

O trabalho proposto obteve êxito ao apresentar redução dos gastos com OPGW, o que resultou também em uma redução do custo global para a alocação de PMUs. As tabelas com decréscimos percentuais dos custos totais foram elaboradas e a tabela com a redução em porcentagem dos custos totais considerando perda de PMU foram as que apresentaram maior redução percentual. Este algoritmo provou ser adaptável e bastante eficaz para todos os SEPs testados.

6.1 Trabalhos Futuros

Os resultados auferidos neste trabalho torna mais esperançosa a busca de outros desafios como:

- Buscar uma tecnologia alternativa ao OPGW.
- Testar o algoritmo para redes com maior quantidade de barramentos.
- Elaborar a solução de otimização substituindo o algoritmo de árvore mínima por outro algoritmo.

Referências

- ABDELKADER MOHAMED E SELIM, A. e. K. S. e. J. F. *Colocação ideal de unidades de medição fasorial para estimativa de estado de sistemas de energia elétrica*. Citado na página 20.
- ABDELSALAM, A. A.; ABDELAZIZ, A. Y. Minimizing the cost of wide area monitoring systems by optimal allocation of pmus and their communication infrastructure. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Springer, v. 45, n. 8, p. 6453–6466, 2020. Citado na página 18.
- ABDULKAREEM, A.; OGBE, D.; SOMEFUN, T. Review of different methods for optimal placement of phasor measurement unit on the power system network. *Adv. Sci. Technol. Eng. Syst*, v. 5, p. 1071–1081, 2021. Citado na página 19.
- ABUR, A.; MAGNAGO, F. Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 4, p. 1273–1278, 1999. Citado na página 19.
- AFRAM, R. M.; MARIE, M. J. Implementation of Wireless SCADA System for Al-Tahady ESP. *Alkut university college journal*, Al Kut College, v. 6, n. 1, p. 52–65, 2022. Citado na página 23.
- AHLAWAT, A. et al. A laboratory setup for synchrophasor applications. In: *2020 IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- AHMED, M. M. et al. A Critical Review of State-of-the-Art Optimal PMU Placement Techniques. *Energies*, MDPI, v. 15, n. 6, p. 2125, 2022. Citado na página 18.
- AHMED, M. M.; SOO, W. L. Supervisory Control and Data Acquisition System (SCADA) based customized Remote Terminal Unit (RTU) for distribution automation system. In: *2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1655–1660. Citado na página 23.
- ANJIA, M.; JIAXI, Y.; ZHIZHONG, G. PMU placement and data processing in WAMS that complements SCADA. In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 780–783 Vol. 1. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 23.
- APPASANI, B.; MOHANTA, D. K. Co-Optimal Placement of PMUs and Their Communication Infrastructure for Minimization of Propagation Delay in the WAMS. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 5, p. 2120–2132, 2018. Citado na página 17.
- APPASANI, B.; MOHANTA, D. K. A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications. *Protection and control of modern power systems*, SpringerOpen, v. 3, n. 1, p. 1–17, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.

- ASHOK, V.; YADAV, A.; ABDELAZIZ, A. Y. A Comprehensive Review on Wide-Area Protection, Control and Monitoring Systems. *Wide Area power systems stability, protection, and security*, Springer, p. 1–43, 2021. Citado na página 24.
- BAI, X. et al. Minimum connected dominating sets in heterogeneous 3d wireless ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, Elsevier, v. 97, p. 102023, 2020. Citado na página 43.
- BALDWIN, T. L. et al. Power system observability with minimal phasor measurement placement. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 2, p. 707–715, May 1993. ISSN 0885-8950. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 35.
- BASHIAN, A.; ASSILI, M.; ANVARI-MOGHADDAM, A. A security-based observability method for optimal pmu-sensor placement in wams. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 121, p. 106157, 2020. Citado na página 19.
- BASHIAN, A. et al. Co-optimal pmu and communication system placement using hybrid wireless sensors. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Elsevier, v. 19, p. 100238, 2019. Citado na página 18.
- BECEJAC TAMARA E KEZUNOVIC, M. Tecnologia de sincrofasores: ferramenta poderosa que aumenta a confiabilidade da rede e aumenta a segurança elétrica. In: *2017 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW)*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página 18.
- BUTT, O. M.; ZULQARNAIN, M.; BUTT, T. M. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. *Ain Shams Engineering Journal*, Elsevier, v. 12, n. 1, p. 687–695, 2021. Citado na página 16.
- CASTELLO, P. et al. An Active Phasor Data Concentrator Suitable for Control and Protection Applications. In: *2019 International Conference on Smart Grid Synchronized Measurements and Analytics (SGSMA)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7. Citado na página 25.
- CHAKRABARTI, S.; KYRIAKIDES, E.; ELIADES, D. G. Placement of synchronized measurements for power system observability. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 24, n. 1, p. 12–19, 2008. Citado na página 34.
- CONGSHAN, L. et al. Data fusion method of WAMS/SCADA hybrid measurements in power system state estimation. *High Voltage Engineering*, v. 39, n. 11, p. 2686–2691, 2013. Citado na página 23.
- CRUZ, M. A. et al. An algorithm for cost optimization of PMU and communication infrastructure in WAMS. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 106, p. 96–104, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 30 e 60.
- CRUZ, M. A. et al. Pmu placement with multi-objective optimization considering resilient communication infrastructure. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 141, p. 108167, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 52.
- DENG, Y. et al. Communication network modeling and simulation for wide area measurement applications. In: IEEE. *2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*. [S.l.], 2012. p. 1–6. Citado na página 30.
- DINLER, D.; TURAL, M. K. Faster computation of successive bounds on the group betweenness centrality. *Networks*, Wiley Online Library, v. 71, n. 4, p. 358–380, 2018. Citado na página 45.

- DORFLING, M.; HENNING, M. A. A note on power domination in grid graphs. *Discrete Applied Mathematics*, Elsevier, v. 154, n. 6, p. 1023–1027, 2006. Citado na página 43.
- FAN, X. et al. Closed-form solution for synchrophasor data correction under GPS spoofing attack. In: IEEE. *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*. [S.l.], 2018. p. 1–5. Citado na página 16.
- FESHARAKI FARIBORZ E HOOSHMAND, R.-A. e. K. A. H. *Projeto Ótimo Simultâneo de Infraestruturas de Medição e Comunicação em WAMS Estruturado Hierárquico*. Citado na página 16.
- FREEMAN, L. C. A set of measures of centrality based on betweenness. *Sociometry*, JSTOR, p. 35–41, 1977. Citado na página 45.
- GHASEMKHANI, A. et al. An efficient multi-objective approach for designing of communication interfaces in smart grids. In: *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 17.
- GÓMEZ, O.; RIOS, M. A. ILP-based multistage placement of PMUs with dynamic monitoring constraints. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 53, p. 95–105, 2013. Citado na página 16.
- GUHA, S.; KHULLER, S. Approximation algorithms for connected dominating sets. *Algorithmica*, Springer, v. 20, n. 4, p. 374–387, 1998. Citado na página 42.
- HAIBO, Z.; BOMING, Z.; HONGBIN, S. Theory analysis about measurement islands' combination in observability analysis in power system state estimation. *PROCEEDINGS-CHINESE SOCIETY OF ELECTRICAL ENGINEERING*, CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING, v. 23, n. 2, p. 46–49, 2003. Citado na página 34.
- HAYERIKHIYAVI, M.; DIMITROVSKI, A. A Practical Assessment of the Power Grid Inertia Constant Using PMUs. In: *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–5. Citado na página 16.
- HENNING, M. A.; RAD, N. J. Locating-total domination in graphs. *Discrete Applied Mathematics*, Elsevier, v. 160, n. 13-14, p. 1986–1993, 2012. Citado na página 42.
- HOJABRI, M. et al. A comprehensive survey on phasor measurement unit applications in distribution systems. *Energies*, MDPI, v. 12, n. 23, p. 4552, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 26.
- HONORATO, Í. H. et al. Alocação de PMUs via Análise de Observabilidade Topológica e Numérica. In: *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2, n. 1. Citado na página 32.
- JOHNSON, T.; MOGER, T. A critical review of methods for optimal placement of phasor measurement units. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Wiley Online Library, v. 31, n. 3, p. e12698, 2021. Citado na página 18.
- JOSHI, P. M.; VERMA, H. Synchrophasor measurement applications and optimal PMU placement: A review. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 199, p. 107428, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 23.

- KALLURI, R. et al. Simulation and impact analysis of denial-of-service attacks on power SCADA. In: IEEE. *2016 national power systems conference (NPSC)*. [S.l.], 2016. p. 1–5. Citado na página 23.
- KANABAR, M.; ADAMIAK, M.; RODRIGUES, J. Optimizing wide area measurement system architectures with advancements in phasor data concentrators (PDCs). In: IEEE. *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*. [S.l.], 2013. p. 1–5. Citado na página 23.
- KORRES, G. N.; KATSIKAS, P. J. A hybrid method for observability analysis using a reduced network graph theory. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 18, n. 1, p. 295–304, 2003. Citado na página 34.
- KOUTSOUKIS, N. C. et al. Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive tabu search method. *IET Generation, Transmission & Distribution*, Citeseer, v. 7, n. 4, p. 347, 2013. Citado na página 19.
- KRUSKAL, J. B. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, JSTOR, v. 7, n. 1, p. 48–50, 1956. Citado na página 48.
- KUMAR, S.; SONI, M.; JAIN, D. Requirements and challenges of pmus communication in wams environment. *Far East Journal of Electronics and Communications*, Pushpa Publishing House, v. 13, n. 2, p. 121, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.
- LEITE, J. B. Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de energia (ems-energy management system) para a rede elétrica inteligente (smart grid). Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2015. Citado na página 16.
- LIAO, C.-S. et al. Hybrid search for the optimal PMU placement problem on a power grid. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 243, n. 3, p. 985–994, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 43.
- LONDON, J. et al. Redundancy and Observability Analysis of Conventional and PMU Measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n. 3, p. 1629–1630, 2009. Citado na página 30.
- LOPEZ, I. et al. SCADA systems in the railway domain: enhancing reliability through redundant multipath tcp. In: IEEE. *2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems*. [S.l.], 2015. p. 2305–2310. Citado na página 23.
- MAHESWARI, M.; VANITHA, N. S.; LOGANATHAN, N. Wide-area measurement systems and phasor measurement units. *Wide Area power systems stability, protection, and security*, Springer, p. 105–126, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 43.
- MANDAVA, S.; VANISHREE, J.; RAMESH, V. A spanning tree approach in placing multi-channel and minimum channel pmu's for power system observability. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, IAES Institute of Advanced Engineering and Science, v. 5, n. 3, p. 518, 2015. Citado na página 19.
- MANOUSAKIS, N. M.; KORRES, G. N. Optimal allocation of phasor measurement units considering various contingencies and measurement redundancy. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 69, n. 6, p. 3403–3411, 2020. Citado na página 19.

MOHAMMADI, M. B.; HOOSHMAND, R.-A.; FESHARAKI, F. H. A new approach for optimal placement of pmus and their required communication infrastructure in order to minimize the cost of the wams. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 1, p. 84–93, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 30.

MOHAMMADI, M. B. et al. Determination of the minimum number of shared phasor measurements for a new line outage detection approach in external power network. *UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN SERIES C-ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE*, POLYTECHNIC UNIV BUCHAREST SPLAIUL INDEPENDENTEI 313, SECTOR 6, BUCH, 060042 . . . , v. 79, n. 3, p. 93–112, 2017. Citado na página 23.

MONTICELLI, A.; WU, F. F. Network observability: Identification of observable islands and measurement placement. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 5, p. 1035–1041, 1985. Citado na página 34.

NADUVATHUPARAMBIL, B.; VALENTI, M.; FELIACHI, A. Communication delays in wide area measurement systems. In: *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory (Cat. No.02EX540)*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 118–122. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 30.

NOTTON, G. et al. Intermittent and stochastic character of renewable energy sources: Consequences, cost of intermittence and benefit of forecasting. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 87, p. 96–105, 2018. Citado na página 16.

OKENDO, E. O.; WEKESA, C. W.; SAULO, M. J. Optimal placement of phasor measurement unit considering system observability redundancy index: case study of the kenya power transmission network. *Heliyon*, Elsevier, v. 7, n. 7, p. e07670, 2021. Citado na página 19.

PHADKE, A. Synchronized phasor measurements-a historical overview. In: *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 476–479 vol.1. Citado na página 18.

PHADKE, A.; THORP, J. History and applications of phasor measurements. In: IEEE. *2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*. [S.l.], 2006. p. 331–335. Citado na página 25.

PHADKE, A. G.; BI, T. Phasor measurement units, wams, and their applications in protection and control of power systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, SGEPRI, v. 6, n. 4, p. 619–629, 2018. Citado na página 25.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S.; KARIMI, K. J. State Estimation with Phasor Measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1, n. 1, p. 233–238, 1986. Citado na página 23.

QIAO, W.-b.; CRÉPUT, J.-C. Gpu implementation of borvka’s algorithm to euclidean minimum spanning tree based on elias method. *Applied Soft Computing*, Elsevier, v. 76, p. 105–120, 2019. Citado na página 47.

RAFID, I. M. Performance evaluation for Kruskal’s and Prim’s Algorithm in Minimum Spanning Tree using Networkx Package and Matplotlib to visualizing the MST Result. *no. May*, 2019. Citado na página 48.

- RAO, A. N. et al. Wide area monitoring for energy system: a review. *International Journal of Ambient Energy*, Taylor Francis, v. 40, n. 5, p. 537–553, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1399458>>. Citado na página 24.
- RAVINDRA, M.; RAO, R. S.; RAJ, K. K. Critical Bus Constrained Optimal PMU Allocation with Zero Injection Modeling for Complete Observability. *Indian Journal of Science and Technology*, v. 9, p. 48, 2016. Citado na página 35.
- ROCHA, H. d. O. *Construção de Planos de Medição Para a Estimação de Estado em Sistemas de Potência Via Metaheurísticas*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado)—Universidade Federal de Fluminense, Niterói, RJ, 2010 . . . , 2010. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 35.
- ROCHA, H. R. de O.; SOUZA, J. C. S. de; FILHO, M. B. D. C. Planning high quality metering systems for state estimation through a constructive heuristic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 52, p. 34–41, 2013. Citado na página 16.
- ROOP, D. W. Power system SCADA and smart grids [book reviews]. *IEEE Power and Energy Magazine*, IEEE, v. 14, n. 1, p. 115–116, 2015. Citado na página 23.
- RUBEN, C. et al. Multi-objective milp model for pmu allocation considering enhanced gross error detection: A weighted goal programming framework. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 182, p. 106235, 2020. Citado na página 19.
- SALEH, M.; ESA, Y.; MOHAMED, A. Applications of complex network analysis in electric power systems. *Energies*, v. 11, n. 6, 2018. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/11/6/1381>>. Citado na página 19.
- SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power system static-state estimation, part i: Exact model. *IEEE Transactions on Power Apparatus and systems*, IEEE, n. 1, p. 120–125, 1970. Citado 3 vezes nas páginas 18, 32 e 33.
- SEGATTO, M. E. V. et al. Telecommunication technologies for smart grids: Total cost optimization. In: *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*. [S.l.]: Elsevier, 2018. p. 451–478. Citado na página 17.
- SHAHRAEINI, M.; KOTZANIKOLAOU, P.; NASROLAHI, M. Communication resilience for smart grids based on dependence graphs and eigenspectral analysis. *IEEE Systems Journal*, IEEE, 2022. Citado na página 19.
- SIANO, P. Demand response and smart grids—A survey. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 30, p. 461–478, 2014. Citado na página 16.
- SINGH, S. P.; SINGH, S. Optimal placement of phasor measurement units using gravitational search method. *Int. J. of ECECE*, v. 9, n. 3, p. 268–272, 2015. Citado na página 19.
- SINGH, S. P.; SINGH, S. P. A multi-objective pmu placement method in power system via binary gravitational search algorithm. *Electric Power Components and Systems*, Taylor & Francis, v. 45, n. 16, p. 1832–1845, 2017. Citado na página 19.

- SODHI, R.; SRIVASTAVA, S.; SINGH, S. Optimal pmu placement method for complete topological and numerical observability of power system. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 80, n. 9, p. 1154–1159, 2010. Citado na página 34.
- STEPHEN, S. et al. Resolving-power dominating sets. *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier, v. 256, p. 778–785, 2015. Citado na página 43.
- SZCZEŚNIAK, I.; JAJSZCZYK, A.; WOŻNA-SZCZEŚNIAK, B. Generic Dijkstra for optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, Optical Society of America, v. 11, n. 11, p. 568–577, 2019. Citado na página 46.
- THOLOMIER, D.; KANG, H.; CVOROVIC, B. Phasor measurement units: Functionality and applications. In: IEEE. *2009 Power Systems Conference*. [S.l.], 2009. p. 1–12. Citado na página 25.
- TOSUN, M.; HAYTAOGLU, E. A New Distributed Weighted Connected Dominating Set Algorithm for WSNs. In: IEEE. *2018 IEEE 8th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin)*. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado na página 43.
- WANG, J.-m.; LI, C.; ZHANG, J. Optimal phasor measurement unit placement by an improved pso algorithm. In: IEEE. *2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*. [S.l.], 2012. p. 1–4. Citado na página 19.
- WASHINGTON, U. *Power systems test case archive*. 1999. Citado na página 60.
- XU, B.; ABUR, A. Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs. In: *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004*. [S.l.: s.n.], 2004. p. 943–946 vol.2. Citado na página 16.
- YANG, K. et al. A numerical observability analysis method for combined electric-gas networks. In: IEEE. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. [S.l.], 2018. p. 1–9. Citado na página 34.
- YIN, B.; SHI, H.; SHANG, Y. An efficient algorithm for constructing a connected dominating set in mobile ad hoc networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Elsevier, v. 71, n. 1, p. 27–39, 2011. Citado na página 43.
- YU, J. et al. Connected dominating sets in wireless ad hoc and sensor networks—a comprehensive survey. *Computer Communications*, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 121–134, 2013. Citado na página 43.
- ZAMANI, R. et al. Introduction to WAMS and Its Applications for Future Power System. In: *Wide Area Power Systems Stability, Protection, and Security*. [S.l.]: Springer, 2021. p. 45–69. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 25.
- ZANGHI, E. *Sistemas SCADA: Conceitos*. 09 2019. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.
- ZHANG, H.; HAN, K. A hybrid observability analysis method for power system state estimation. *IEEE Access*, v. 8, p. 73388–73397, 2020. Citado na página 34.
- ZHAO, Z. et al. Optimal placement of pmus and communication links for distributed state estimation in distribution networks. *Applied Energy*, Elsevier, v. 256, p. 113963, 2019. Citado na página 19.