



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Otimização Multi-Objetivo de WAMS Resilientes para a Estimação de Estado

Marco António do Rosário Santos Cruz

Orientador: Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Coorientador: Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

VITÓRIA-ES
17 DE DEZEMBRO DE 2021

Marco António do Rosário Santos Cruz

**Otimização Multi-Objetivo de WAMS Resilientes para a
Estimação de Estado**

Otimização Multi-Objetivo de WAMS Resilientes para a
Estimação de Estado

Linha de pesquisa: Telecomunicações

Orientador: Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo -
UFES

Coorientador: Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo -
UFES

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
VITÓRIA-ES
17 DE DEZEMBRO DE 2021

Marco António do Rosário Santos Cruz

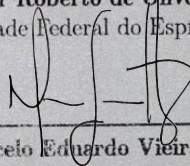
Otimização Multi-Objetivo de WAMS Resilientes para a Estimação de Estado

Otimização Multi-Objetivo de WAMS Resilientes para a
Estimação de Estado

Trabalho aprovado. Vitória-ES, 17 de Dezembro de 2021

Helder Roberto de O. Rocha

Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo



Dr. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo

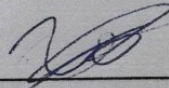
**Julio Cesar
Stacchini de Souza**

Assinado de forma digital por Julio
Cesar Stacchini de Souza
Dados: 2022.01.24 15:29:50 -03'00'

Dr. Julio Cesar Stacchini de Souza
Universidade Federal Fluminense

Imene

Dra. Imene Yahyaoui
University of Rey Juan Carlos



Dr. Wanderley Cardoso Celeste
Universidade Federal do Espírito Santo

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO - UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
VITÓRIA-ES
17 DE DEZEMBRO DE 2021

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

D631o do Rosário Santos Cruz, Marco António, 1977-
Otimização Multi-Objectivo de WAMS Resilientes para a
Estimação de Estado / Marco António do Rosário Santos Cruz. -
2021.
82 f. : il.

Orientador: Hélder Roberto de Oliveira Rocha.
Coorientador: Marcelo Eduardo Vieira Segatto.
Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. PMU. 2. Estimação de Estado. 3. Observabilidade Topológica
e Numérica. 4. VNS Multi-Objectivo. 5. Infraestrutura de
Comunicação. 6. Resiliência. I. de Oliveira Rocha, Hélder
Roberto. II. Vieira Segatto, Marcelo Eduardo. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

Aos meus pais e irmãos...

Agradecimentos

Sinto que este trabalho é o resultado de uma sinergia que se vive no ecossistema "PPGEEE-Labtel". Agradeço pelo excelente acolhimento e apoios recebido dos professores, colegas, funcionários (AA+) e demais colaboradores com quem convivi e interagi a vários níveis. Um agradecimento muito especial ao professor Jair Silva, Márcia Paiva e orientadores, Hélder Rocha e Marcelo Vieira Segatto. E por fim um obrigado às instituições CAPES e FAPES pelo apoio para a conclusão do meu doutoramento.

*” Baralhá ess carta e no bem torná dá... pa tud
criston panhá se trunf, pal salvá ess chitada
de fome ”*

Resumo

O presente projeto de pesquisa visa apresentar um novo algoritmo de AOP (Alocação Ótima de PMUs (*Phasor Measurement Units*)) em uma rede de transmissão de energia visando múltiplos objetivos. A planificação de um sistema de medição nas WAMS (*Wide Area Measurement System*) requer a observância de critério técnico e econômico para uma melhor decisão dos operadores de tais sistemas. Muitos trabalhos de AOP vem sendo apresentados na literatura, motivados por minimizar custos com PMUs e com comunicações mas também de atender critérios técnicos como observabilidade analítica ou numérica, robustez de medidas, estabilidade de sinal entre outros.

Alguns trabalhos da literatura passaram a formular o problema de AOP como um problema multi-objetivo e algumas soluções foram apresentadas, uma vez que vários fatores se mostram importantes na caracterização de um bom plano de medidas de uma WAMS. Uma combinação de objetivos relevante neste caso é o compromisso entre o custo do investimento de um plano de medições e a robustez desejada ou necessária num determinado contexto.

A robustez de um sistema de medições refere-se à sua predisposição em garantir a função da Estimação de Estado (EE), fundamental na operação e monitoramento de um Centro de Controle de sistemas de potência. Uma confiável EE depende de um bom plano de medidas que no entanto se vê restrito às questões orçamentárias.

Este trabalho procura responder a este dilema do planejador na medida em que, procura formular o problema com objetivos claros de conseguir robustez e resiliência no plano de medições e minimizar custos totais. Assim, propõe-se um algoritmo que recorre à observabilidade numérica para caracterizar esta robustez e também à teoria dos grafos para formular o problema dos custos totais, onde se consideram aspectos práticos e mais realistas da instalação de PMUs bem como se aborda os custos das infraestruturas de comunicação. No final constrói-se a curva de Pareto de soluções não-dominadas que numa situação real servirá para uma decisão mais criteriosa dos planejadores do sistema de medição.

Palavras-chave: VNS Multi-objetivo, PMU, observabilidade topológica e numérica, infraestrutura de comunicação, resiliência.

Abstract

This research project aims to present a new PMU (*Phasor Measurement Units*) Optimal Allocation algorithm in a power transmission network with multiple objectives. Planning a measurement system in WAMS (*Wide Area Measurement System*) requires technical and economic criteria for a better decision by the operators of such systems. Many Optimal PMU Placement (OPP) algorithms have been presented in the literature, motivated by minimizing costs with PMUs and with communications, but also to meet technical criteria, such as analytical or numerical observability, measurement robustness, signal stability, among others.

Some works in the literature have formulated the OPP problem as a multi-objective problem and some solutions were presented given the relevant decision factors involved in designing a good planning system for WAMS. A relevant combination of objectives is the trade-off that has to exist between the investment cost and the desired or necessary robustness of a measurement plan in a given context.

The robustness of a measurement system is directly related to the State Estimation (SE) function, which is fundamental in the operation and monitoring of a Power Systems Control Center. A reliable SE depends on a good measurement plan. However, the operator has limited financial availability and has to face the dilemma of determining the appropriate measurement plan, even in the face of budget constraints.

This work aims to respond to this dilemma, as it seeks to formulate the problem with clear objectives to achieve robustness in the measurement plan and minimize total costs. Thus, it is proposed an algorithm that uses numerical observability to characterize this robustness and also the graph theory to formulate the problem of total costs, which considers practical and more realistic aspects of the installation of PMUs as well as addressing costs of communication infrastructures. In the end, a set of optimal solutions is built that, in a real situation, would serve better for judicious decision by the planners of the measurement system.

Keywords: Multi-objective VNS, PMU, topological and numerical observability, communication infrastructure, resilience.

Lista de Figuras

Figura 1 – Alocação de PMUs em uma rede elétrica de transmissão IEEE-14	3
Figura 2 – Estrutura de uma PMU	15
Figura 3 – Modelo Geral de uma WAMS	16
Figura 4 – Aplicativos de uma WAMS	17
Figura 5 – Caso Particular de uma Arquitetura de Comunicação de PMUs	19
Figura 6 – Arquitetura Centralizada de uma WAMS	20
Figura 7 – Etapas da Estimação de Estado	23
Figura 8 – Algoritmo para identificação de C_{meds} e C_{conjs}	26
Figura 9 – Grafo genérico com 5 vértices e 5 arestas.	31
Figura 10 – Subgrafo obtido do grafo anterior pela remoção da aresta entre v_1 e v_2	33
Figura 11 – Grafo ponderado.	34
Figura 12 – Exemplo de um grafo e seu respectivo CDC	35
Figura 13 – Conjunto Dominante 2-Conexo	36
Figura 14 – A execução do Algoritmo Dijkstra. A fonte s é o vértice mais à esquerda. A estimação dos caminhos mais curtos é mostrada dentro dos vértices; as arestas em cinza indicam valores precedentes. Vértices em preto estão no conjunto S e os brancos estão na fila min-prioridade $Q = V - S$. (a) Situação antes da primeira iteração do <i>loop</i> nas linhas 4-8. O vértice em cinza tem o menor valor d e é escolhido como vértice u na linha 5. (b)-(f) As situações após cada iteração sucessiva do <i>loop</i> . O vértice cinza em cada situação é escolhido como vértice na linha 5 da próxima iteração. Os valores d e π em (f) são os valores finais.	39
Figura 15 – Exemplo de funcionamento do algoritmo de Suurballe. Em (a) tem-se o grafo G com arestas ponderadas. Em (b) a árvore geradora mínima T e o primeiro menor caminho $P1$ (em verde). Em (c) tem-se o grafo modificado $G(s)$ e em (d) o menor caminho $P2$, encontrado sobre $G(s)$. Em (e) os dois caminhos obtidos são confrontados, eliminando-se as arestas opostas. Obtendo-se assim a solução ótima apresentada em (f).	41
Figura 16 – Exemplo da criação do grafo modificado. Em a) um vértice v com suas arestas; em b), v é duplicado em $[v_{in}]$ e $[v_{out}]$, as arestas repartidas entre esses dois vértices e uma aresta falsa é adicionada entre os dois; em c) são adicionadas cópias de todas as arestas. A cópia de aresta falsa recebe peso X e as demais cópias recebem peso Y	43
Figura 17 – A Curva de Pareto	45
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo VNS Multi-Objetivo	55
Figura 19 – Rede de Transmissão IEEE-14 e distâncias entre nós	56

Figura 20 – Subgrafo definido pela rotina Dijkstra (enraizado em 4)	57
Figura 21 – Solução inicial: alocação de PMUs (vértices em amarelo)	57
Figura 22 – Solução inicial: PMUs e rede de comunicação	58
Figura 23 – Perturbação - Obtenção de Nova Solução	59
Figura 24 – Superfície de Pareto - Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE14	63
Figura 25 – Curva de Pareto - Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE14	63
Figura 26 – Curva de Pareto - Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE118. (a) indicadores versus custo total, (b) indicadores (valores absolutos) versus % de barramentos com PMUs instalados	65
Figura 27 – Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE118 - Comparação de várias simulações com valores de parâmetro diferente	65
Figura 28 – Simulação na Rede IEEE118 - soluções com rede de comunicação re- siliente. (a) indicadores versus custo total, (b) indicadores (valores absolutos) versus % de barramentos com PMUs instalados	67
Figura 29 – Representação da Rede IEEE 300 barras	67
Figura 30 – Rede IEEE300 - Soluções de Pareto com Rede OPGW sem resiliência. (a) indicadores versus custo total, (b) indicadores (valores absolutos) versus % de barramentos com PMUs instalados	68
Figura 31 – Frente de Pareto - peso de custos PMU nos custos totais, IEEE-300 . .	69
Figura 32 – Representação da Rede polish-2383	70
Figura 33 – Sistema Brasileiro de Transmissão	70
Figura 34 – Representação da Rede Brasileira com 5771 barramentos	71
Figura 35 – Curva de Pareto - Sistemas Super-Resilientes. Simulação em três siste- mas diferentes	72

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação de diferentes tecnologias de comunicação nas WAMS	22
Tabela 2 – Métricas da Rede IEEE-14 extraídas da Figura 19	54
Tabela 3 – Solução Inicial - resultados	58
Tabela 4 – Solução Inicial e Perturbação - resultados	58
Tabela 5 – Rede IEEE14: Otimização Multi-objetivo de PMUs	62
Tabela 6 – Rede IEEE14: Comparação entre simulações com diferentes Δk	66
Tabela 7 – Peso das PMUs no Custo Total (redes de comunicação com resiliência)	71

Lista de Abreviaturas e Siglas

AOP	Alocação Ótima de PMUs
BR-5774	Rede Brasileira de Transmissão com 5774 barramentos
C2D	Conjunto 2-Dominante
C2D2C	Conjunto 2-Dominante 2-Conexo
Cconjs	Conjuntos Críticos
CDC	Conjunto Dominante Conexo Mínimo
CDC	Conjunto Dominante Conexo
Cmeds	Medidas Críticas
IC	Infraestrutura de Comunicação
IEEE-118	Rede IEEE de Transmissão de 118 barramentos
IEEE-14	Rede IEEE de Transmissão de 14 barramentos
IEEE-300	Rede IEEE de Transmissão de 300 barramentos
OPGW	Optical Ground Wire
PaC	Indicador de Probabilidade de Aumento de Medidas Críticas
PDC	Phasor Data Concentrator
PiO	Indicador de Probabilidade de Perda Iminente de Observabilidade
PMU	Phasor Measurement Unit
Pol-2383	Rede polonesa de Transmissão de 2383 barramentos
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
VNS	Variable Neighbourhood Search
WAMS	Wide Area Measurement System
Zib	Zero injection bus

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Motivação do Trabalho e Objetivos	3
1.2 Estrutura do Trabalho	4
1.3 Publicações	5
2 – Revisão Bibliográfica	7
3 – Observabilidade Numérica e a Estimação de Estado na WAMS	13
3.1 A WAMS	14
3.1.1 O Sistema SCADA e a origem da WAMS	14
3.1.2 A tecnologia dos Sincrofasores e Fatores de Instalação	17
3.1.3 Infraestrutura de Comunicação da WAMS	20
3.2 A Estimação de Estado	22
3.3 Medidas e Conjuntos Críticos	25
3.4 Indicadores de Observabilidade	27
4 – Teoria dos Grafos e a Metaheurística VNS	31
4.1 Definição e Propriedades dos Grafos	31
4.2 O Conjunto Dominante Conexo	34
4.3 Métricas de Centralidade em Grafos	37
4.4 Menores Caminhos - Algoritmo Dijkstra	38
4.5 O Algoritmo Suurballe	40
4.5.1 Algoritmo Suurballe Original de Arcos-Disjuntos	40
4.5.2 Algoritmo Suurballe Generalizado	41
4.6 A Metaheurística VNS Multi-Objetivo	43
4.6.1 A frente de Pareto em Otimização Multi-Objetivo	44
4.6.2 Implementação do Algoritmo MOVNS	44
5 – Formulação do Problema e Metodologia	47
5.1 Formulação do Problema	47
5.1.1 Alocação de PMUs em Condições Normais	48
5.1.2 Alocação de PMUs com Perda de PMUs	51
5.2 Algoritmo Multi-Objetivo de AOP	51
5.2.1 Implementação do Algoritmo VNS Multi-Objetivo	52
5.2.2 Exemplo da Implementação da Metodologia na rede IEEE-14	54
5.3 Conclusão	59

6 – Simulação e Resultados	61
6.1 Simulações em redes IEEE	61
6.1.1 A Rede IEEE-14	61
6.1.2 A Rede IEEE-118	63
6.1.2.1 Simulação considerando redes de fibra sem resiliência	63
6.1.2.2 Simulação considerando resiliência na rede de fibra	66
6.1.3 Simulações na rede IEEE-300	66
6.2 Sistemas de Medição Super-Resilientes	69
6.3 Análise dos Resultados	72
7 – Conclusão	75
Referências	77

1 Introdução

A eletricidade tornou-se já uma matéria-prima na atividade das sociedades modernas. Dela depende a funcionalidade de vários processos, serviços e produtos essenciais. Todavia, assiste-se a um contínuo aprofundamento da eletrificação na sociedade e na economia, sendo uma tendência irreversível. Sectores que antes funcionavam com outras fontes de energia, juntam-se ao crescente movimento da eletrificação. Os transportes terrestres são um exemplo claro com o advento dos veículos elétricos. Brevemente seguirá o sector dos transportes marítimos e num breve futuro algumas experiências no sector da aviação. Neste contexto, a disponibilidade e acesso às infraestruturas de eletricidade é vital e não se admite a sua privação nem por um segundo. Deste modo, as infraestruturas elétricas assumem responsabilidades, dimensões e complexidades muito elevadas. A operação de tais redes elétricas, cada vez mais complexas e que integram geração distribuída e renovável, impõe que os Sistemas de Gestão de Energia (SGE) sejam monotonicamente eficientes e resilientes a falhas.

Neste sentido, um arsenal de ferramentas e desdobramentos de diferentes soluções vem sendo idealizadas, desenvolvidas, implementadas e aprimoradas ao serviço de operadores de redes elétricas na delicada missão de garantir o fornecimento em qualidade e quantidade de energia elétrica ininterrupta. Concretamente, um SGE de um sistema elétrico credível comporta impreterivelmente um conjunto de aplicativos e softwares que tornam possível uma supervisão e controle instantâneos sobre a infraestrutura elétrica perante os vários eventos dinâmicos que podem ocorrer.

Face ao carácter dinâmico das redes elétricas, é fundamental que um sistema de medição e telemetria esteja bem implementado e permita que o operador do sistema elétrico tenha instantaneamente visibilidade geo-temporal do estado real da rede. O SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) é um sistema de controle supervísório e de aquisição de dados primordial para o funcionamento dos demais aplicativos do SGE. O SCADA baseia-se num conjunto de sensores e medidores distribuídos e alocados de forma criteriosa ao longo da rede elétrica. Ele tem a missão de coletar as medidas desses medidores e transmiti-las de forma sincronizada e veloz ao centro do SGE para posterior processamento.

Muitos avanços têm-se feito na tecnologia dos medidores e sensores. A PMU (*Phasor Measurement Units*) representa um grande passo tecnológico na melhoria do sistema de medição. As PMUs conseguem medir o fasor de grandezas elétricas e com a sincronização do GPS consegue-se uma maior qualidade de medidas elétricas e, conseqüentemente, uma melhor visualização do estado real da rede elétrica. Muitos sistemas SCADA vem

adicionado paulatinamente medidores PMUs na rede.

A tecnologia de medição de parâmetros elétricos através de PMUs possui certas características e princípios [Hajian et al. 2011], a saber:

1. Os barramentos com PMUs podem medir diretamente o fasor da tensão e da corrente das linhas (ramos) incidentes;
2. Se o fasor da tensão e da corrente de um terminal de uma linha é conhecido, então o fasor da tensão na outra extremidade pode ser calculado (pseudo-medida), assumindo que se conhece a impedância da linha (lei de Ohm);
3. Se os fasores de tensão em ambos terminais de uma linha são conhecidos, então o fasor da corrente desta linha pode ser calculado (pseudo-medida);
4. Se, de todas as linhas incidentes a um barramento de passagem (ZIB) houver uma única linha cujo fasor de corrente se desconhece, este pode ser calculado pela Lei de Corrente de Kirchhoff. ZIB (*Zero Injection Bus*) é um barramento no qual a potência líquida injetada é zero, ou seja, não há geração e nem cargas neste barramento;
5. Se o fasor da tensão de um ZIB é desconhecido, mas o fasor da tensão de todos os seus barramentos adjacentes é conhecido; então o fasor de tensão do ZIB pode ser calculado pelas equações dos nós;
6. quando um número k de ZIBs conexos formam um super nó, a voltagem dos ZIBs pode ser calculada usando o sistema de k equações (equação 1). M é o número de nós conectados ao nó i e Y_{ij} é a matriz de admitância entre os nós i e j . O número de variáveis complexas desconhecidas (voltagem nas ZIBs) é exatamente o número k de equações, o que torna possível encontrar a solução.

$$\sum_{i=1}^M Y_{ij} V_i = 0 \quad \text{para } i=1, \dots, M. \quad (1)$$

Estas regras ou princípios, trazem o benefício de redução de custos, por não ser preciso a implantação de PMUs em todos os barramentos da rede. Na Figura 1 mostra-se uma rede IEEE 14 barras, onde se confirma que com PMUs em somente quatro barramentos (2, 7, 10 e 13), assegura-se a completa observabilidade de todo o sistema, ou seja, a tensão, corrente e suas fases em todos as barras do sistema são conhecidas (medidas e/ou calculadas).

Neste sentido, estas regras desencadearam os primeiros trabalhos [Baldwin et al. 1993] de Alocação Ótima de PMUs, cujo objetivo era a minimização destas unidades e que se traduziria na minimização de custos com estas unidades. A análise topológica da

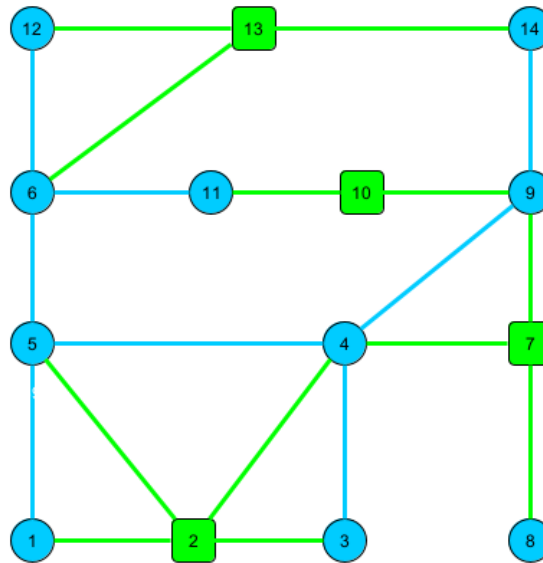


Figura 1 – Alocação de PMUs em uma rede elétrica de transmissão IEEE-14

observabilidade era muitas vezes usada na alocação dos sincrofasores, bem como vários tipos de restrições como perdas de linhas de PMUs e presença ZIB.

No entanto, outros custos para além do equipamento sincrofasor em si podem ser muito relevantes no custo total, como as infraestruturas de comunicação. Assim, alguns trabalhos recentes alargaram os contornos do problema de alocação de PMUs considerando as variáveis que influenciam os custos com as comunicações [Mohammadi et al. 2016].

Contudo, desde o advento da Estimação de Estado (EE) [Schweppe e Wildes 1970] que esta tornou-se uma ferramenta central dos sistemas de gestão de energia. A análise da observabilidade numérica no processo de EE é um requisito indispensável ao qual muitas vezes a análise topológica não é suficiente [Xu e Abur 2004]. Deste modo, muitos trabalhos de alocação de PMUs vêm usando a análise numérica da observabilidade nos problemas de otimização de PMUs, devido à sua pertinência de melhorar a planificação da instalação de PMUs na rede elétrica e de garantir o processo posterior da EE nos centros de controle [Donmez e Abur 2011]. Outros trabalhos tem-se recorrido a otimização multi-objetivo, considerando não só a minimização de custos de PMUs, mas levando em conta a precisão da Estimação de Estado [Matsukawa et al. 2019].

1.1 Motivação do Trabalho e Objetivos

Embora alguns estudos tenham introduzido indicadores de observabilidade numérica na otimização de medidores (*Remote terminal units* e/ou PMUs) em redes de potência, coloca-se a necessidade de abordar o problema de alocação de PMUs que considere conjuntamente a questão financeira das infraestruturas de comunicações e a análise numérica

da observabilidade.

Os desdobramentos do problema da Alocação Ótima de Medidores exibem atualmente muitos trabalhos que abordam vários contornos do problema, como custos com infraestrutura de comunicação, perdas de linhas e PMUs, observabilidade topológica e numérica, precisão de estimação de estado, entre outros. Contudo, ainda é preciso que a alocação de PMUs considere condições mais realistas para uma criteriosa planificação de um sistema de monitoramento. Assim, este trabalho procura abordar a alocação de PMUs considerando a viabilidade do processo de EE mas também levando em conta aspectos financeiros numa visão mais global e não reducionista da simples minimização de PMUs.

Neste trabalho, propõem-se um algoritmo de otimização multi-objetivo, considerando a minimização de custos com PMU e infraestrutura de comunicação, mas atendendo à observabilidade numérica e às condições de Estimação de Estado. Deste modo, o algoritmo é dedicado a construir uma curva de Pareto, constituída por várias soluções não-dominadas, caracterizadas por diferentes níveis de robustez do plano de medidas e custos totais inerentes, os quais atribuem ao planejador de sistemas de gestão de energia a decisão de escolher o plano que melhor se adapta às suas necessidades técnicas e restrições orçamentárias.

Assim sendo, os objetivos neste trabalho são:

- Desenvolver um algoritmo de Alocação Ótima de PMUs multi-objetivo, com base na observabilidade numérica e construir a curva de Pareto de soluções não-dominadas;
- Incorporar custos das Infraestruturas de Comunicação (IC) no algoritmo de otimização, considerando um traçado da rede de comunicação com e sem resiliência a falhas;
- Demonstrar a relevância de uma curva de Pareto com variáveis de robustez e custo na Planificação de Sistemas de Medição;
- Mostrar a escalabilidade desta técnica e aplicá-la a grandes sistemas de potência.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, revisita os principais trabalhos de otimização na alocação de PMUs;
- O Capítulo 3, Observabilidade Numérica e Estimação de Estado na WAMS, aborda o conceito da WAMS (Wide Area Measurement System) para os sistemas de potência, a observabilidade das redes elétricas e a Estimação de Estado;

- O Capítulo 4, VNS Multi-Objetivo e Teoria dos Grafos, explica os fundamentos da otimização multi-objetivo usando a metaheurística *Variable Neighbourhood Search* (VNS) e discorre sobre os principais conceitos da Teoria dos Grafos usados no algoritmo proposto;
- O Capítulo 5, Formulação do Problema e Metodologia, equaciona o problema da alocação de PMUs e propõe um método para a sua resolução;
- O Capítulo 6, Simulação e Resultados, apresenta os resultados das simulações feitas em várias redes elétricas de transmissão e mostra a aplicabilidade do método em grandes sistemas;
- O Capítulo 7, Conclusão, apresenta as conclusões do trabalho e aponta a direção de futuros trabalhos.

1.3 Publicações

Os trabalhos de pesquisa do tema produziu um trabalho aceito para publicação em 2019 e um outro submetido em 2021. São eles:

1. Cruz, M. A., Rocha, H. R., Paiva, M. H., Segatto, M. E., Camby, E., & Caporossi, G. (2019). An algorithm for cost optimization of PMU and communication infrastructure in WAMS. *International Journal of Electrical Power Energy Systems*, 106, 96-104.
2. Cruz, M. A., Rocha, H. R., Paiva, M. H., Silva, J. A. L., E., Camby, & Segatto, M. E. (2021). PMU Placement with Multi-Objective Optimization Considering Resilient Communication Infrastructure. Artigo submetido à *International Journal of Electrical Power Energy Systems*.

2 Revisão Bibliográfica

A PMU, criada em finais de 1980, representa um avanço tecnológico dos medidores convencionais que usam UTRs (Unidades de Transmissão Remota) para transmissão das medidas elétricas para os centros de despacho. Embora ainda existam muitos destes medidores convencionais (UTRs) em operação e haja muitos trabalhos de otimização da alocação dos mesmos [Rocha et al. 2013], este trabalho se restringe à esfera das PMUs.

As PMUs são atualmente a tecnologia de medição mais precisa, com carimbo de tempo de GPS, que medem e transmitem dados dos parâmetros elétricos de forma rápida. Esta característica veio viabilizar ainda mais a implementação das WAMS. Vários projetos de implantação em grande escala estão sendo realizados em todo o mundo e vários são os estudos e pesquisas de otimização da alocação destes sincrofasores [Energy e Reliability 2014, Sufyan et al. 2018].

A Alocação Ótima de PMUs tornou-se um campo de estudo de muito interesse e com vários contornos. As técnicas de resolução de problemas de otimização de PMUs são um deles. Estes dividem-se em Métodos Matemáticos Convencionais e Métodos não-convencionais [Johnson e Moger 2020]. O método a escolher na solução de problemas AOP (Alocação Ótima de PMUs) depende do problema e do resultado desejado. Os métodos matemáticos convencionais usados nos problemas AOP são geralmente empregues na busca de uma única solução ótima. A seguir listam-se os principais, usados em trabalhos de pesquisa mais recentes, embora a lista de aplicações seja bem ampla.

Em [Ahmed e Imran 2019], usou-se a Programação Linear Inteira Binária para encontrar os locais ótimos de PMUs em sistemas de potência para uma completa observabilidade, considerando contingências $N - 1$ de PMUs.

Em [Lu et al. 2018], recorreu-se à Programação Linear Inteira na construção de um modelo unificado de alocação de PMUs, onde se estudou o efeito da presença das ZIB. O modelo é testado em vários sistemas de dimensões variadas, na presença de várias situações contingenciais.

No trabalho de [Theodorakatos et al. 2015], um algoritmo baseado na Programação Quadrática sequencial é usado para descobrir os pontos ótimos de alocação de PMUs, considerando situações contingenciais de perda de medidas de PMUs e, podendo integrar particularidades como limitação da capacidade de canais de comunicação e medidas convencionais existentes. Este método ainda é comparado com a Programação Linear Inteira Binária.

Em [Almunif e Fan 2020], a Programação Linear Inteira Mista e a Programação

Não-Linear são usadas e comparadas na resolução do problema e AOP. As técnicas são simuladas nas redes IEEE de 14, 57, 118 e 300 barras, e finalmente em um sistema maior de 2383 barras para demonstrar suas eficiências.

Quanto aos métodos não-convencionais, quais sejam, os heurísticos, metaheurísticos e híbridos, caracterizam-se por permitir a busca de várias soluções a partir das quais pode ser escolhida uma solução mais adequada para uma aplicação [Johnson e Moger 2020]. No entanto, nos métodos heurísticos e meta-heurísticos não há garantia de atingir o ótimo global até que o ajuste adequado dos parâmetros seja alcançado. Este processo de ajuste pode consumir várias tentativas. Heurísticas são métodos orientados para problemas. Os métodos heurísticos são computacionalmente intensivos, pois são reajustados ao problema em questão, aproveitando ao máximo suas particularidades. As metaheurísticas vão reunindo informações ao longo do processamento para orientar o processo de pesquisa. Elas usam operações para evitar ficarem presas em um ótimo local. Os métodos híbridos resultam da conjugação dos métodos convencionais e/ou dos não-convencionais. Embora os métodos híbridos conduzam a melhores resultados devido à combinação das melhores características de dois ou mais métodos, eles podem consumir muito tempo computacional em grandes sistemas de transmissão devido à sua complexidade. Portanto, pode-se concluir que o método de resolução do problema de AOP deve ser escolhido com base na aplicação e de acordo com o resultado desejado. Os métodos heurísticos incluem a Busca da Árvore Geradora, algoritmo de Busca Binária, Busca Binária Modificada e Heurística Gulosa.

Os métodos meta-heurísticos são bem variados e alguns são obtidos com pequenas variações de outras. Nomeiam-se o *Simulated Annealing*, Algoritmo Genético, Evolução Diferencial, Otimização Enxame de Partículas, Caminho Randômico Racional, Clusterização Espectral, Otimização Colônia de Formigas, Colônia de Abelhas Artificial e Algoritmo de Competição Imperialista.

Dentre os métodos híbridos, citam-se o Algoritmo Genético de Classificação Não-Dominada, *Simulated Annealing* & Método da Árvore Geradora, Método Heurístico e Programação Linear Binária, Autômato de Aprendizagem Celular, Combinação de Algoritmo Genético e Teoria dos Grafos, Algoritmo Genético & Programação Linear Inteira Mista, Busca Híbrida baseada em Algoritmo de Busca Global e Algoritmo Híbrido combinando Otimização Enxame de Partículas e Busca Gravitacional.

Destes métodos, pode-se concluir que os convencionais consomem menos tempo computacional e apresentam uma solução ótima para cada sistema considerado. Os métodos heurísticos são computacionalmente mais intensivos e, devido à sua natureza gulosa, podem ficar presos em mínimos locais, mas podem ter um bom desempenho em alguns problemas específicos. As metaheurísticas tem a capacidade de ir coletando informações no processo de busca e são equipados com operadores que os ajudam a fugir de ótimos locais. No entanto, alcançar o ótimo global não é garantido sem um grande número de tentativas e

com parâmetros variantes. Os métodos híbridos podem proporcionar melhores resultados com a combinação de características de dois métodos, mas o tempo consumido pode ser um problema em sistemas grandes.

Nos algoritmos de AOP, a restrição mais importante é a observabilidade da rede. Este assegura que os parâmetros elétricos de todas as barras e ramos do sistema são medidos e/ou calculados. A análise da observabilidade pode ser feita ao nível topológico [Krumpholz et al. 1980] ou numérico [Xu e Abur 2004]. O trabalho desenvolvido em [Jelodar e Fini 2016] é dos poucos que faz uma análise estocástica/probabilística, embora ainda seja caracterizada como topológica ou numérica.

Desde que o primeiro trabalho de análise topológica sobre alocação de medidores convencionais foi apresentado [Krumpholz et al. 1980], muitos outros se seguiram. Este método, denominado de *Árvore Geradora de Medidas*, procura construir uma árvore T que conecta todos os nós (de uma rede) através de ramos aos quais são atribuídas 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 paulatinamente PMUs, de forma a 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 centram-se na observabilidade topológica pela vantagem de ser computacionalmente menos exigente e pela facilidade de localizar as áreas com inobservabilidade. Também nesta abordagem topológica, pode-se adicionar várias condições restritivas. Nas restrições de segurança temos a perda de PMUs [Nikkhah et al. 2018] e perda de linhas [Chakrabarti e Kyriakides 2008]. Alguns trabalhos consideram a presença de ZIB [Gou 2008] e de medidores convencionais [Kavasseri e Srinivasan 2010], os quais resultam em menor quantidade de PMUs necessários. Outra restrição pertinente é a limitação dos canais de comunicação de PMUs. [Korkali e Abur 2009] atesta que usar PMUs com mais de quatro canais de comunicação não é relevante às funções-objetivo.

Embora muitas das publicações de pesquisa sobre AOP foquem na observabilidade topológica dos sistemas, a observabilidade numérica é fundamental para permitir a análise do sistema através da estimação de estado [Donmez e Abur 2011]. E ainda porque há casos em que um sistema topologicamente observável pode não ser numericamente observável devido à singularidade da matriz de ganho [Monticelli 2000]. A observabilidade numérica contorna as fragilidades da observabilidade topológica, que consiste numa análise muito simplista e binária da observabilidade do sistema elétrico (é ou não é) e portanto não fornece muitas informações sobre a eminente perda ou não da observabilidade do sistema. Trabalhos de AOP que usam a restrição da observabilidade numérica podem incorporar

simultaneamente várias restrições como falhas de PMU e perda de linhas, limitação de canais de comunicação dos sincrofasores e existência de medidores convencionais [Manousakis e Korres 2019]. No próximo capítulo, aborda-se com mais profundidade a observabilidade numérica.

Outra distinção nos métodos de AOP são os que usam uma otimização mono-objetivo e multi-objetivo. A otimização mono-objetivo tem como principal objetivo a minimização da quantidade de PMUs, restrito a várias condições, como as citadas anteriormente. A otimização multi-objetivo tem-se mostrado muito pertinente em trabalhos recentes, dos quais destacam-se alguns a seguir.

Em [Manoharan et al. 2018] um modelo multi-objetivo é proposto o qual procura (1) atender a observabilidade do sistema com um mínimo de PMUs, (2) prever custos de comunicação relativo aos PMUs e (3) aprimorar os níveis de estabilidade de tensão. O problema é resolvido através de uma programação não-linear e testada em vários sistemas IEEE e em uma rede polonesa de 2383 barras, cujos resultados mostram a robustez e eficácia do método.

Outro trabalho visando múltiplos objetivos na otimização foi realizado por [Arpanahi et al. 2019], onde se objetiva a estabilidade do sinal no sistema de potência, a probabilidade da observabilidade do sistema e os custos totais das PMUs. Usa-se um algoritmo genético de classificação não-dominada para obter soluções de Pareto, das quais uma solução pode ser escolhida de acordo com as prioridades do gestor da rede.

Mais um trabalho de AOP multi-objetivo foi realizado em [Almasabi e Mitra 2019] com a estratégia de empregar PMUs nas proximidades de contingências de maior probabilidade, aumentando as chances de ações, tanto preventivas quanto corretivas mais eficazes.

Em [Andreoni et al. 2021] modela-se uma otimização tri-objetivo em uma rede de distribuição, também caracterizada por uma análise numérica, onde se procura minimizar (1) o número total de canais das PMUs, (2) a máxima incerteza da estimação de estado baseado unicamente em uma alta taxa de dados de PMUs e (3) a sensibilidade da estimação de estado à tolerância do parâmetro das linhas.

Outra caracterização dos trabalhos de pesquisa prende-se com o equacionamento dos custos. A implantação de PMUs em um sistema de potência vai para além do custo destes instrumentos em si. Outros custos são arrastados com as PMUs, notadamente os custos com a infraestrutura de transmissão das medidas coletadas pelos sincrofasores. Alguns trabalhos começaram a atribuir importância a este ponto, uma vez que os custos com comunicação podem apresentar um peso relevante e podem influenciar a alocação de PMUs e alargar o escopo para uma otimização de custos globais. Em [Shahraeini et al. 2012] implementa-se uma otimização multi-objetivo com o propósito de minimizar custos

com PMUs e com a infraestrutura de comunicação. Demonstram que o menor custo total nem sempre traduz-se numa solução com menor PMUs. Os subscritores [Mohammadi et al. 2016] e do trabalho de [Rather et al. 2015] incidiram ainda mais nos detalhes da infraestrutura de comunicação, ignorados no trabalho precedente, e confirmaram o peso dos custos de comunicação no posicionamento e quantidade de PMUs exigidos.

Mais recentemente, este enfoque da integração dos custos de comunicação na otimização foi também trabalhada em [Almasabi e Mitra 2018] e [Dubey et al. 2018], usando, como os três trabalhos precedentes, uma abordagem topológica da observabilidade. Em [Cruz et al. 2019] aplicou-se a Teoria dos Grafos numa metaheurística de Busca em Vizinhaça Variável para otimizar custos globais de alocação de PMUs, considerando novamente os custos de comunicação com cabos de fibra.

3 Observabilidade Numérica e a Estimação de Estado na WAMS

A operação de um sistema de transmissão de potência engloba o bom funcionamento de um conjunto de ferramentas ou subsistemas. O sistema de controle supervisorio e aquisição de dados SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) possibilita a transmissão de dados medidos pelas PMUs aos sistemas de gerenciamento de energia. Estes centros de controle rodam um conjunto de aplicativos computacionais importantes para a análise das redes elétricas. A Estimação de Estado (EE) é um destes aplicativos que procura processar os dados do sistema SCADA e assim obter em tempo de execução o estado de operação do sistema elétrico. A WAMS ou Sistemas de Medição em Grandes áreas é uma evolução do SCADA, imposta pela necessidade de responder à complexidade de sistemas elétricos em expansão e atender a maiores exigências na qualidade e oferta de potência elétrica. Neste sistema, a presença das PMUs é central, pois traz maior taxa de amostragem, maior precisão e maior sincronismo de medições, o que melhora a estimação de estado dos sistemas, que possuem carácter dinâmico.

O estado de um sistema de potência refere-se à sua condição em termos de grandezas físicas - tensão, corrente e fase - presente em um dado momento em cada um dos seus barramentos e linhas, bem como a posição do chaveamento dos interruptores. A estimação de estado é o processo de calcular e inferir da melhor forma os valores de tais grandezas e a configuração da rede. Os dados processados pela EE são usados em outras funções como a segurança e a otimização nos centros de operação.

Embora muitas das publicações de pesquisa sobre AOP foquem na observabilidade topológica dos sistemas, a observabilidade numérica é fundamental para permitir a análise do sistema através da estimação de estado [Donmez e Abur 2011]. E ainda mais porque há casos em que um sistema topologicamente observável pode não ser numericamente observável devido à singularidade da matriz de ganho [Monticelli 2000]. A observabilidade numérica contorna as fragilidades da observabilidade topológica que se restringe a uma análise muito simplista e binária da observabilidade do sistema elétrico (sim ou não), o que não oferece informações sobre a eminente perda ou não da observabilidade do sistema.

3.1 A WAMS

3.1.1 O Sistema SCADA e a origem da WAMS

O Sistema SCADA vem sendo usado nas últimas décadas com o propósito de dar visibilidade à rede. O sistema SCADA compõe-se de (1) unidades terminais remotas ou RTU (*Remote Terminal Units*), (2) infraestrutura de comunicação e (3) unidades terminais-mestre ou MTU (*Master Terminal Units*) [Roop 2015]. As RTUs são instaladas nas subestações e medem parâmetros da rede como a magnitude da tensão, potência ativa e reativa, posição do comutador e a posição do disjuntor. O sistema de comunicação pode usar as linhas de transmissão de potência ou outro, como sinais de rádio, para transmitir os dados. As MTUs são os centros de controle para onde são enviados os sinais através de um protocolo das RTUs. Os aplicativos (softwares) computacionais nas MTUs realizam a extração da fase do sinal, reduzem o erro do sinal medido e enviam os dados. O operador ainda pode visualizar informações de diferentes pontos da rede.

Contudo, o sistema SCADA apresenta algumas desvantagens:

1. Os dados medidos apresentam-se com um certo atraso temporal e a taxa de amostragem situa-se entre 2 e 10 segundos;
2. Medidas não pertencem exatamente a um dado tempo - latência dos dados;
3. Não há informação do ângulo da fase, sendo este um dado muito importante na avaliação da estabilidade do sistema de potência;
4. Não se consegue observar a dinâmica do sistema;
5. O EE pode apresentar erros devido aos dados de entrada sem sincronismo.

Estas deficiências são hoje exacerbadas pela existência de redes elétricas crescentes e mais complexas, consumos exponenciais, mercado de eletricidade competitivo e geração distribuída e renovável na rede, o que pode levar a sérios apagões. Consequentemente, o SCADA não é mais suficiente para garantir segurança e estabilidade dos sistemas de potência em constante evolução e expansão.

A potência ativa tem uma relação muito próxima com o ângulo da tensão dos barramentos. Por isso, conhecer o ângulo da corrente e tensão de um barramento é importante para o sincronismo das medidas. A chegada das PMUs facilitou esta tarefa que, juntamente com o desenvolvimento do GPS, permitiram a sincronização dos dados com uma precisão de milissegundos, uma tolerância adequada para a maioria das aplicações dos sistemas de potência.

Na Figura 2 pode-se ver os componentes e a estrutura de uma PMU. Os sinais analógicos são primeiramente importados para a PMU. As componentes de alta frequência

do sinal são removidos por um filtro *anti-aliasing* (passa-baixa). De seguida Os sinais passam por um conversor analógico-digital. A tarefa do GPS é criar sincronização de alta precisão e a unidade de bloqueio da fase serve para manter o relógio com boa precisão até que o novo sinal de GPS é recebido. Um microprocessador processa os dados digitais que os encaminham para um módulo de comunicação para que os mesmos sejam transmitidos através de um meio de transporte de dados.

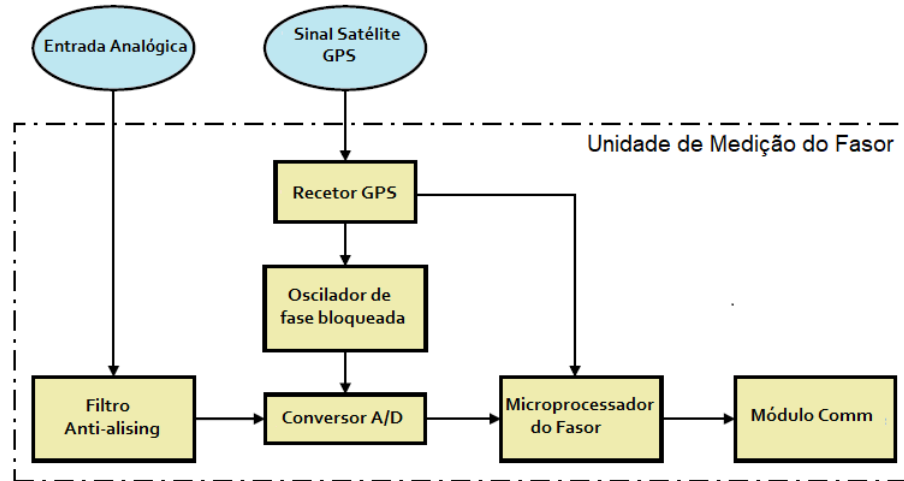


Figura 2 – Estrutura de uma PMU

Os sistemas de monitoramento em funcionamento e baseado em SCADA podem ainda melhorar seus desempenhos com a incorporação paulatina de PMUs na rede existente, complementando o trabalho das RTUs [Chen e Abur 2006].

O Sistema de Medição em Grandes Áreas, mais conhecidos por WAMS (Wide Area Measurement System) é uma evolução do sistema SCADA e vem sendo proposto de forma a contornar os problemas deste. A WAMS consiste em tecnologias de medição avançada, ferramentas de informação e infraestrutura operacional que facilitam a compreensão e o gerenciamento do comportamento cada vez mais complexo dos grandes sistemas de potência. Em sua forma atual, uma WAMS pode ser usada como uma infraestrutura autônoma que complementa o sistema de controle de supervisão e aquisição de dados (SCADA) convencional da rede. Como um sistema complementar, uma WAMS é expressamente projetado para melhorar a "consciência situacional" em tempo real do operador, necessária para uma operação segura e confiável da rede. No futuro, espera-se que as tecnologias WAMS sejam incorporadas de forma incremental ao sistema de controle real da rede. Pela sua importância atual e potencial futuro da infraestrutura WAMS, sua segurança e confiabilidade se tornaram questões de alta prioridade.

Na Figura 3 pode-se ver um modelo geral de uma WAMS. Os principais componentes da WAMS são as PMUs, o concentrador de dados dos fasores (PDC - Phasor Data Concentrator), o GPS para sincronização de tempo dos fasores, canal de comunicação, e

os aplicativos (softwares) no centro de controle.

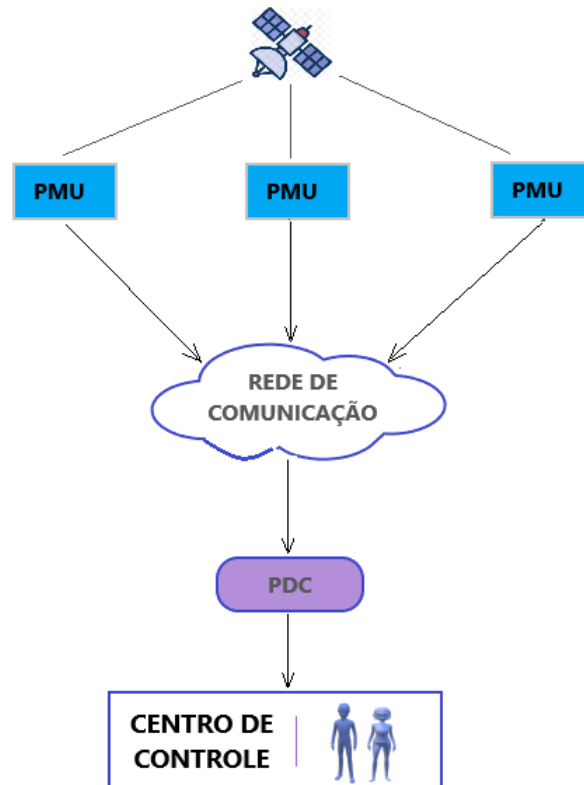


Figura 3 – Modelo Geral de uma WAMS

A WAMS se caracteriza pela alta taxa de transmissão de dados medidos pelas PMUs, que podem ser utilizados por várias aplicações para uma melhor visualização dos sistemas de potência. Na Figura 4 destacam-se os vários aplicativos que uma WAMS bem implementada pode oferecer.

Cita-se alguns dos muitos benefícios [Sufyan et al. 2018]:

- O modelo e as ferramentas analíticas têm parâmetros autênticos, portanto, produzem medições precisas para operar uma rede de maneira mais confiável;
- Melhor compreensão e resposta a vários eventos na rede. Portanto, atualiza a conscientização em tempo real do operador da rede e assim, evitasse o colapso da rede;
- Melhor visualização das oscilações de baixa frequência que surgem devido ao desequilíbrio na geração de energia e demanda de um determinado ponto operacional; Estes eventos podem levar ao colapso das tensões e provocar apagões;

- Os dados gerados podem ser utilizados no modo *offline* para estudar o comportamento do sistema de energia sob diferentes condições, como análise de carga, análise pós-despacho do sistema de energia, entre outros.



Figura 4 – Aplicativos de uma WAMS

3.1.2 A tecnologia dos Sincrofasores e Fatores de Instalação

Os componentes básicos das tecnologias dos sincrofasores são [Energy e Reliability 2013]:

1. As PMUs, que calculam e registam no tempo os fasores - estes sincrofasores medem as condições da rede. Outros equipamentos com capacidades similares às PMUs incluem os relés digitais reconicionados e os registradores digitais de falhas (DFRs) reconicionados, que normalmente são usados para registrar falhas nas linhas de transmissão, equipamentos ou outros;
2. Os PDCs - computadores com aplicativos ou programas - que recebem os dados das PMUs e outros PDCs, realizam o alinhamento temporal dos dados dos sincrofasores e os enviam para outros computadores para processamento. O PDC também executa verificações da qualidade dos dados, monitoram o funcionamento das PMUs e alimentam um arquivo de dados;
3. A rede de comunicação, de várias tecnologias e velocidades, usadas para enviar dados entre PMUs, PDCs e centros de operação;

4. Os aplicativos ou programas que usam dados dos sincrofasores para uso *online* e *offline*.

Embora a tecnologia da PMU tenha surgido em 1980, seu uso foi inicialmente limitado a projetos de pesquisa e raramente foi usado em ambiente operacional. Para este fim, a tecnologia dos sincrofasores exigem a instalação de um grande número de PMUs (de forma a criar uma "massa crítica" de sensores úteis para os operadores), um sistema de comunicação robusto, protocolos de comunicação das PMUs e softwares para tratamento dos dados.

Os custos globais de instalação de PMUs (aquisição, instalação e comissionamento) podem variar muito, desde 40.000 USD a 180.000 USD [Energy e Reliability 2014]. Estes valores dependem de muitos fatores e condições reais. Um sistema de sincrofasores que tenha a funcionalidade de tomar decisões operacionais e agir de forma automática acarreta custos dos mais elevados.

Também, outros fatores podem influenciar nos custos unitários globais de um sincrofasor, tais como:

1. Os desafios técnicos a serem ultrapassados pelo sistema de monitoramento;
2. As características dos ativos do sistema de geração e transmissão, configuração/topologia e área geográfica;
3. A filosofia do sistema de gerenciamento e seus procedimentos;
4. Infraestruturas da rede de telecomunicação e informação existentes.

Concretamente, descreve-se os fatores que afetam os custos de aquisição e instalação de PMUs:

1. Comunicações: instalação ou atualização da infraestrutura de comunicação com meios de comunicação e eletrônica que ligam as subestações umas às outras e aos centros de controle das PMUs;
2. Segurança: equipamentos e desenvolvimento de procedimentos que atendam aos requisitos de Proteção de Infraestruturas Críticas;
3. Mão-de-obra: profissionais de instalação e engenharia de suporte no projeto, execução e comissionamento das PMUs, e equipamentos e sistemas relacionados;
4. Equipamentos: componentes de hardware, como PMUs e PDCs, necessários para a construção e operação do sistema de sincrofasores.

O fator comunicação é o que mais peso tem na estrutura de custos. A PMU em si representa uma pequena parte nos custos totais de instalação do sistema de sincrofasores, muitas vezes menor que 5% [Energy e Reliability 2014]. Geralmente, os custos de cada fator serão mais ou menos elevados conforme a funcionalidade e complexidade desenhada para o sistema de sincrofasores. Quanto mais aplicativos adicionados à funcionalidade dos sincrofasores, maiores os custos. Dos aplicativos *online*, listam-se: a detecção de oscilação, monitoramento de ângulo de fase e frequência, monitoramento da estabilidade da tensão, controles, detecção de ilhamento, entre outros. Quanto aos aplicativos *offline*, destacam-se a validação do modelo, melhoria do modelo de EE, análise pós-evento e treinamento do operador.

Apresenta-se na Figura 5 uma arquitetura de PMUs de um caso particular de um operador [Company 2010], no qual usam-se, sincrofasores dedicados (PMUs autônomos), sistema de comunicação com PDCs e aplicativos nos centros de controle. Alguns PDCs são usados para partilhar dados com outros operadores, com os quais detêm uma interface física. Este operador usou cabos OPGW como meio físico para a transmissão de dados.

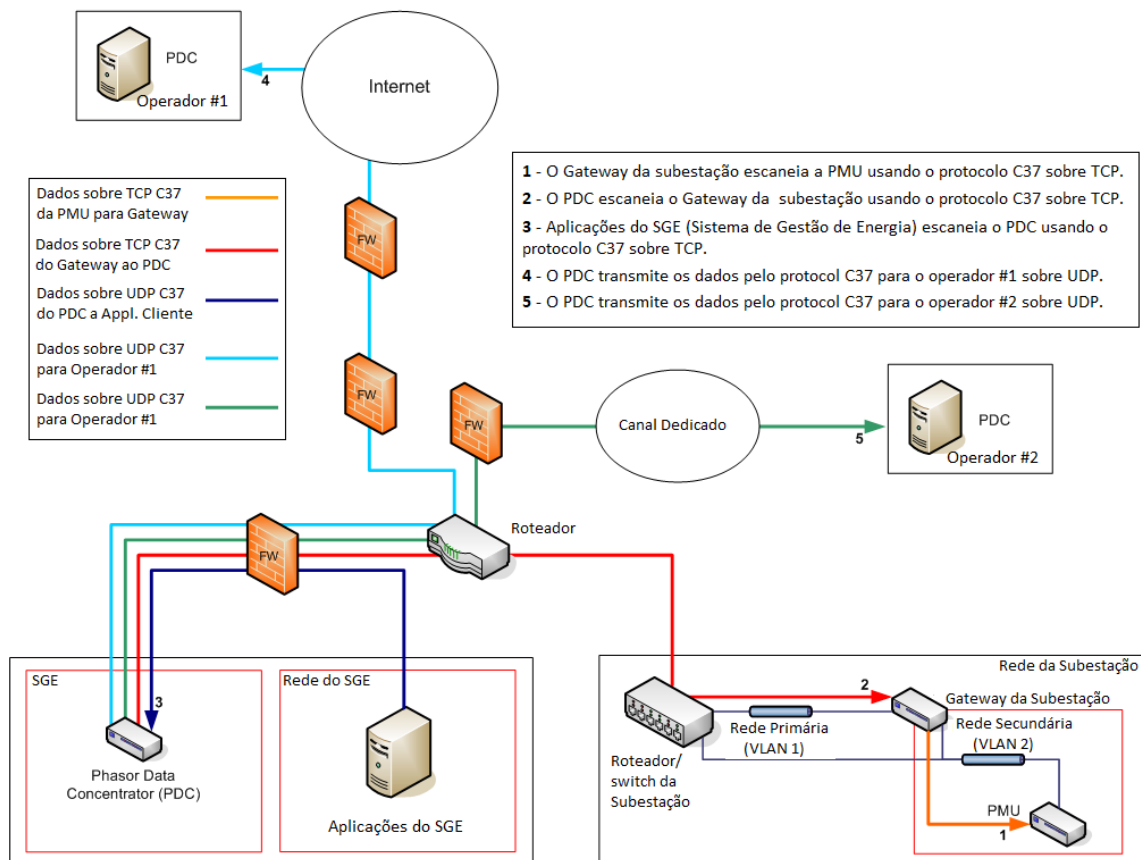


Figura 5 – Caso Particular de uma Arquitetura de Comunicação de PMUs

3.1.3 Infraestrutura de Comunicação da WAMS

A WAMS pode divergir em sua arquitetura podendo assumir uma configuração centralizada, descentralizada ou distribuída [Cruz 2016]. Adotaremos nesta tese uma arquitetura centralizada, sendo esta menos complexa na sua concepção e que se caracteriza por canalizar todos os dados medidos pelas PMUs para um centro de controle, onde se processa uma série de aplicativos, como se pode ver na Figura 6. Contudo, aplicativos e PDCs podem estar presentes de forma distribuída, o qual pode melhorar o pré-tratamento e o fluxo de dados para o PDC central.

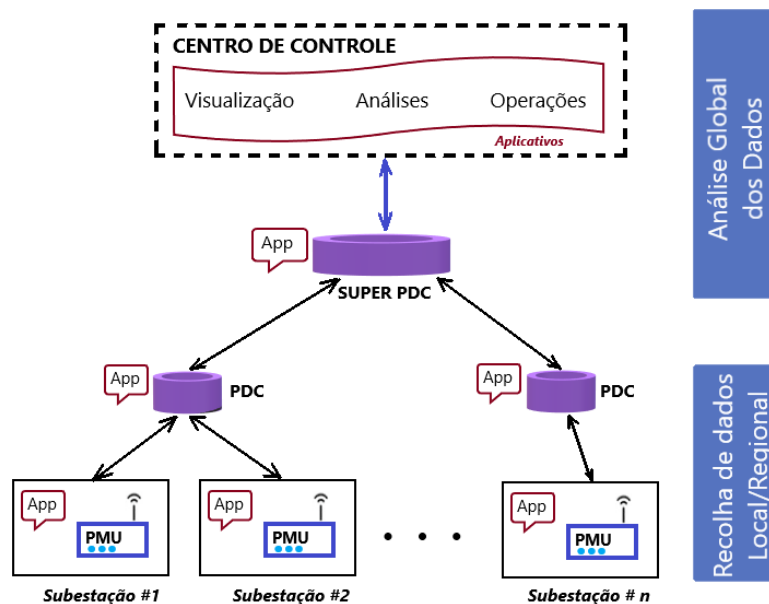


Figura 6 – Arquitetura Centralizada de uma WAMS

A implementação da WAMS requer a transferência de dados medidos por diferentes PMUs para os centros de controle e a utilização de uma infraestrutura de comunicação de alta velocidade. A esta infraestrutura é exigida um certo nível de confiabilidade e capacidade. Vários e diferentes sistemas de comunicação de alta velocidade vem sendo desenvolvidos, tais como a comunicação sobre linhas de potência PLC (Power Line Communication), a fibra ótica, rádio, micro-ondas e a transmissão de dados por satélite entre as PMUs e os centros de controle [Segatto et al. 2018]. Estas tecnologias de comunicação, com ou sem fio, tem vantagens e desvantagens. A tecnologia mais apropriada para a transferência de dados de forma segura, confiável e econômica dependerá das condições da rede elétrica.

O PLC é uma tecnologia pouco dispendiosa pois faz uso das linhas de transmissão de energia para transmitir dados. No entanto, enfrenta problemas de atenuação e distorção à medida que o sinal se propaga na rede elétrica, bem como da limitada disponibilidade

de largura de banda. Adicionalmente, a transmissão de dados pode ser interrompida em caso de falhas nas linhas de transmissão [Li et al. 2015].

A fibra ótica é uma opção muito apelativa pela grande capacidade da transmissão de dados e grande largura de banda. Tem ainda a vantagem de apresentar uma baixa latência de transmissão, pouca atenuação, e de não sofrer distorção pelos efeitos eletromagnéticos dos cabos e de fatores ambientais. A segurança nesta tecnologia é grande, mas tem a desvantagem de exigir mais tempo de instalação e mais custo de investimento [Alhelou et al. 2018].

Outras tecnologias sem fio, como o rádio e micro-ondas, exibem tempos de implementação e custos iniciais baixos, mas têm uma largura de banda baixa, para além do sinal transferido pelas PMUs sofrer interferências de dados enviados na mesma frequência de banda por outros dispositivos.

Micro-ondas é uma opção a considerar em situações que exigem transmissão de dados entre pontos relativamente distantes, e também instalação e segurança relativamente elevada. Apresenta contudo o desafio do desvanecimento do sinal e da propagação em várias direções, além do potencial decaimento do desempenho pelas condições atmosféricas.

A comunicação por satélite é outra opção de comunicação entre PMUs e centros de controle. Possui grande ponto favorável de não depender da distância entre dois pontos para a transmissão de dados, mas o custo inicial pode ser um problema. Além disso, a latência de transmissão é maior que as outras tecnologias, e a segurança da transmissão pode ser comprometida por condições atmosféricas e interferências eletromagnéticas. Na Tabela 1 discrimina-se as vantagens e desvantagens de cada uma das principais tecnologias [Alhelou et al. 2020]:

Pelos benefícios que a Fibra ótica apresenta às WAMS, no que tange à segurança da transmissão, fiabilidade e capacidade de transmissão de dados, propõe-se nesta tese integrar esta opção no problema de AOP, sendo que o problema do custo desta tecnologia será objeto de otimização no algoritmo.

Tabela 1 – Comparação de diferentes tecnologias de comunicação nas WAMS

Características	PLC	Fibra Ótica	Radio	Micro-ondas	Satélite
Tipo de conexão	com fio	com fio	sem fio	sem fio	sem fio
Segurança	baixa (erro de bit $\leq 10^{-2}$)	alta (erro de bit $\leq 10^{-15}$)	baixa (questionável)	médio (erro de bit $\leq 10^{-7}$)	médio (erro de bit $\leq 10^{-7}$)
Largura de banda	Limitada	Não Limitada	Limitada	Limitada	Limitada
Latência	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Alta
Atenuação	Alta	Quase zero	Média	Média	Média (às vezes alta)
Tempo de Implementação	Baixa	Alta	Baixa	Média	Alta
Custo de Implementação	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Muito Alta
Condições Ambientais	Pouco afetado	Não afetado	Afetado	Afetado	Afetado

3.2 A Estimação de Estado

O primeiro trabalho proposto para a construção de um EE foi apresentado por [Schweppe e Wildes 1970]. Desde então vários estudos e pesquisas [Xu e Abur 2004] aprofundaram os contornos do processo de EE, tendo em conta as suas diversas etapas e sua implementação computacional nos centros de controle dos sistemas de potência.

O Processo de EE depende de uma boa disponibilidade (redundância) de medidas. Quer isto dizer que o conjunto de medidas deve ser tal que cubra todas as barras e ramos da rede, proporcione o tratamento de dados espúrios, permita uma boa precisão nas estimativas e dê robustez ao estimador no tratamento da indisponibilidade de dados.

Contudo, a realidade dos sistemas de operação restringe muitas vezes a redundância de dados desejável, motivados por restrições financeiras de investimento, mau funcionamento dos medidores, falhas na comunicação de dados ou manutenção/reparação dos ativos.

A EE compõe-se de algumas etapas: Pré-Processamento, configuração da rede, análise de observabilidade, filtragem e análise de resíduos:

- Na etapa do Pré-Processamento, analisa-se os dados recebidos do SCADA, elimina-se medidas flagrantemente erradas e corrige-se erros de configuração da rede elétrica;
- Numa segunda etapa, um módulo computacional determina a configuração atual

da rede elétrica sob supervisão, considerando as informaoes do chaveamento de dispositivos e localizao de medidores. Obtm-se assim o modelo barra-ramo, usados pelos aplicativos de análise de redes elétricas;

- A etapa de observabilidade analisa se os dados disponíveis são suficientes para permitir a EE. Caso o sistema não for 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 da criticalidade de medidas;
- A filtragem  a etapa central e onde se computa, geralmente pelo método dos Mínimos Quadrados Ponderados, as estimativas do estado mais provável das variáveis elétricas do sistema;
- Na última etapa de Análise de Resíduos, realizam-se testes estatísticos de deteco, e identificao de erros de configurao da rede e erros grosseiros (EGs) não eliminados na primeira etapa.

A Figura 7 apresenta a sequência de etapas do processo de EE descritas anteriormente.

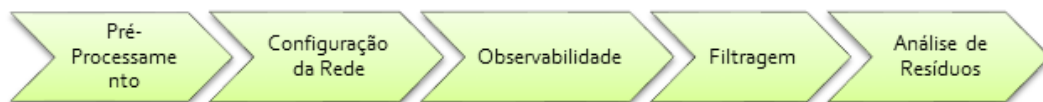


Figura 7 – Etapas da Estimacão de Estado

Nesta tese usa-se um estimador de estado linear que se caracteriza por ser mais simples e com menos custo computacional na análise da observabilidade. A estimaco de estado parte do pressuposto da seguinte equao:

$$z = H \cdot x + \epsilon \quad (2)$$

onde, se relaciona o vetor de medidas z ($m \times 1$) e o de estado operativo x ($n \times 1$) de uma determinada configurao da rede elétrica. A matriz H  a matriz Jacobiana, ($m \times n$), obtida através da linearizao das equaoes de fluxo de potência da configurao da rede, ϵ  o ruído gaussiano das medidas z , com média zero e matriz de covariância R . O método dos Mínimos Quadrados Ponderados  utilizado para minimizar a funo 3 :

$$J(x) = [z - Hx]^T R^{-1} [z - Hx] \quad (3)$$

Pretende-se obter uma estimativa \hat{x} para o estado x que minimize $J(x)$. Assim, procede-se à derivada parcial da equação 3 e computa-se o valor de \hat{x} que anula esta derivada. Assim, obtêm-se:

$$H^T R^{-1} [z - H\hat{x}] = 0 \quad (4)$$

E o valor de \hat{x} resulta na expressão 5:

$$\hat{x} = G_m^{-1} H^T R^{-1} z \quad (5)$$

onde G_m é a matriz de Ganho, $G_m = H^T R^{-1} H$.

O processo de computação da estimativa \hat{x} dependerá da inversibilidade da matriz G_m . Esta será invertível se o conjunto de medidas for suficiente, de modo a permitir a construção de uma matriz G_m não singular. Em caso afirmativo, diz-se que o sistema é numericamente observável.

Para a determinação da matriz de ganho G_m , usa-se apenas o conjunto de potência ativa - ângulo ($P-\theta$) na formação da matriz Jacobiana H e substituiu a matriz de covariância dos erros das medidas pela matriz identidade [Xu e Abur 2004].

De seguida, procede-se à filtragem das medidas pela expressão 6:

$$\hat{z} = H \cdot \hat{x} \quad (6)$$

O processo de estimação termina com o cálculo dos resíduos. Estes são analisados para a detecção e identificação de possíveis erros grosseiros nas medidas e erros na topologia da rede. O vetor de medidas residuais r é dado por:

$$r = z - \hat{z} \quad (7)$$

Calcula-se o resíduo normalizado de cada medida pela equação 8. Os erros grosseiros (EGs) são identificados pelas medidas com maior resíduo normalizado. Estes EGs devem ser eliminados ou substituídos por pseudo-medidas.

$$r_n(i) = \frac{|r(i)|}{\sqrt{E(i, i)}} \leq \gamma \quad (8)$$

em que $\sqrt{E(i, i)}$ representa o desvio padrão da i -ésima componente do vetor $r(i)$ e γ é o valor máximo acima do qual uma medida é classificada como errônea.

3.3 Medidas e Conjuntos Críticos

Uma das grandes propriedades do estimador de estado é a capacidade de detectar, identificar e corrigir medidas com erros grosseiros e, conseqüentemente, finalizar com sucesso a estimação do estado do sistema. Contudo, é necessário fornecer ao aplicativo computacional um conjunto redundante de medidas. Esta redundância é conseguida com medidas, em qualidade suficiente e bem posicionadas na rede elétrica. Como já foi mencionado anteriormente, esta avaliação é feita rotineiramente na etapa da observabilidade do processo de estimação. Igualmente, esta análise de observabilidade é útil na planificação de um novo sistema de monitoramento de um sistema elétrico.

Se o conjunto de medidas não comportar uma qualidade (posicionamento) e quantidade suficiente, a identificação e correção de erros grosseiros ficam comprometidas e por arrasto o conhecimento situacional da operação do sistema. Nestes casos, fala-se da criticalidade de medidas. Assim, mostra-se necessário garantir a redundância de medidas, ou pelo menos maximizá-lo, no sentido de garantir um bom processamento da estimação de estado.

A criticalidade de medidas de um sistema de medição traduz ou evidencia a robustez do conjunto de medidas, ou seja, é o nível de vulnerabilidade de um sistema de medição em deixar de ser observável se perder determinadas medidas ou em caso de reconfiguração da rede. Dito de outra forma, medidas individuais ou conjunto delas podem apresentar níveis inferiores de redundância, constituindo-se em medidas críticas (*Cmeds*) ou conjuntos críticos (*Cconj*s) para a observabilidade do sistema.

Em um conjunto de medidas, uma certa medida é classificada de crítica se a sua eventual ausência ou perda resultar na inobservabilidade da rede. A medida crítica é classificada como uma medida sem redundância e com o agravante de não permitir ao estimador de estado, na fase da análise dos resíduos, detetar se ela carrega erros grosseiros. Similarmente, podem existir subconjuntos de medidas cuja perda de uma das medidas torna toda as outras medidas críticas. Estes são chamados de Conjuntos críticos e, embora se possa detetar neles os erros grosseiros, não permitem a sua identificação e nem correção pelo estimador.

Portanto, a identificação de medidas e conjuntos críticos permite uma avaliação correta das condições de observabilidade de um sistema sob supervisão. A identificação de *Cmeds* e *Cconj*s usados nesta tese baseia-se nas propriedades numéricas dos resíduos da estimação [Filho et al. 2007] e são descritas a seguir:

Uma medida i é identificada como crítica se possuir resíduo e desvio padrão nulos:

$$r(i) = z(i) - \hat{z}(i) = 0 \quad (9)$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i, i)} = 0 \quad (10)$$

Cmeds não se beneficiam do processo de EE, pois não se correlacionam com qualquer medida (observação) deste processo. Ou seja, tais medidas saem do processo de EE como nele entraram - sem nenhum tratamento (mesmo contendo erros grosseiros). Um conjunto é crítico se suas medidas possuem resíduos normalizados idênticos e coeficientes de correlação unitários (máxima correlação). Considerando i e j medidas de um mesmo conjunto temos:

$$\rho_{ij} = \frac{r_N(i)}{r_N(j)} = 1 \quad (11)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{E(i, j)^2}{E(i, i)E(j, j)} = 1 \quad (12)$$

Os erros grosseiros em medidas de conjuntos críticos são detetáveis embora não identificáveis. Deste modo, se uma das medidas do *Cconj* for descartado por violação do limite para detecção de erros grosseiros, todas as restantes medidas serão consideradas suspeitas e nomeadas como medidas críticas.

A impossibilidade de se detectar e identificar erros grosseiros em *Cmeds* e *Cconjs*, torna o processo de estimação de estado mais difícil. Assim, seria importante ter um sistema de medição com um mínimo possível destas criticalidades. Uma metodologia de AOP objetivando a estimação de estado deveria ter como critério de alocação de PMUs a minimização de *Cmeds* e *Cconjs*. A seguir, apresenta-se um algoritmo numérico que usa os resíduos de estimação para identificação de *Cmeds* e *Cconjs* [Tafur 2012].

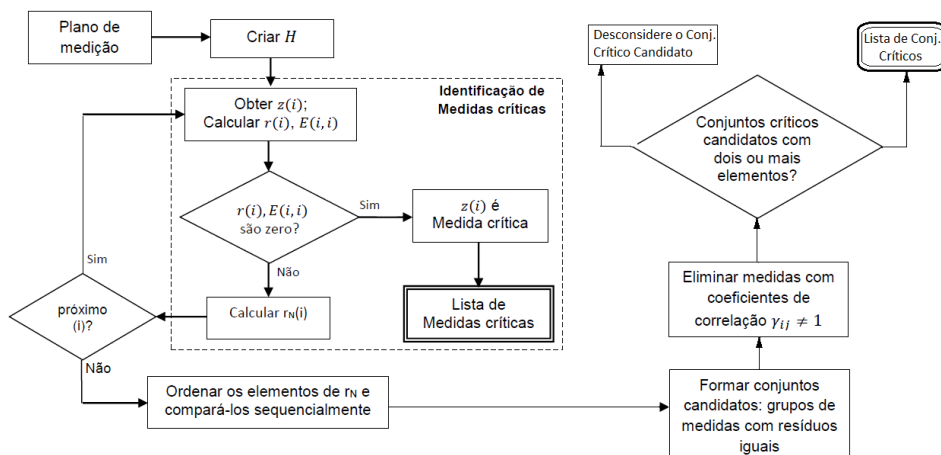


Figura 8 – Algoritmo para identificação de *Cmeds* e *Cconjs*

O algoritmo tem os seguintes passos:

- Construir a matriz Jacobiana H_a para a configuração da rede de interesse. Definir valores para o vetor das medidas ativas z_a ;
- Numa primeira etapa, para cada medida ativa $z_a(i)$, calcular $E_a(i,i)$ e $r_a(i)$. De seguida, verificar se tais valores são nulos. Em caso afirmativo, declarar $z_a(i)$ como *Cmed*;
- Na segunda fase, para cada medida ativa não declarada como *Cmed*, calcular o correspondente resíduo normalizado r_{an} e formar uma lista ordenada destas medidas com os valores de r_{an} . Desta lista, constituir grupos de medidas que tenham resíduos normalizados correspondentes iguais. Declarar tais grupos como candidatos a *Cconjs*. Em seguida, calcular a matriz Γ_a e verificar se as medidas integrantes de cada conjunto-candidato a *Cconj* apresentam correlação unitária. Em caso afirmativo, declarar cada conjunto-candidato como *Cconj* de fato. Caso contrário, retirar de cada conjunto-candidato as medidas associadas a coeficientes $\gamma_{ij} \neq 1$. O conjunto-candidato que tiver pelo menos um par de medidas com correlação unitária será declarado como *Cconj*.

Este algoritmo foi incorporado no trabalho de [Rocha et al. 2013] na proposta de uma metodologia de planeamento de sistemas robustos de medição de sistemas de potência e sem a presença de medidas críticas.

3.4 Indicadores de Observabilidade

Pelo exposto anteriormente, o plano de medição pode ser classificado quando ao grau de redundância que comporta nas suas medidas através da análise da criticalidade presente nas medidas, i. e., pela quantidade de *Cmeds* e *Cconjs* presentes no conjunto de medidas e por consequência, reflete-se no nível de aptidão de observar-se a rede ou de estimar-se o seu estado. Esta classificação pode ser feita consoante a quantidade de *Cmeds* e *Cconjs* presentes.

A quantidade de *Cmeds* e *Conjs* presentes nas medidas refletem o quão provável é que a rede elétrica se torne totalmente inobservável (perda de medida crítica) e que o poder corretivo do estimador de estado se torne inviável.

Assim, pode-se dizer que a robustez de um plano de medidas se traduz no grau de observabilidade da rede, podendo ser classificada como de forte ou fraca observabilidade. Um sistema de fraca observabilidade (pouco robusto) é àquele em que o grau de presença de medidas críticas e conjuntos críticos é elevado, compromete a precisão do EE (pode nem ser executado) e em caso de indisponibilidade de medidas pode perder-se totalmente a observabilidade da rede.

Uma proposta interessante introduzida em [Tafur 2012] foi quantificar a condição de observabilidade através destes indicadores. Estes indicadores seriam muito úteis em:

- Avaliar mais precisamente o impacto da configuração da rede e localização de medidores na observabilidade do sistema;
- Avaliar o risco (segurança) até então não alcançada, em situações trazidas por criticalidades, normalmente vistas como um problema qualitativo;
- Facilitar comparações de diferentes sistemas de medição quanto à sua capacidade de cobertura;
- Auxiliar no planejamento/reforço de sistemas de medição, de modo a atender níveis de redundância adequados.

Nesta tese, propõe-se usar estes indicadores no algoritmo de otimização de PMUs multi-objetivo, no sentido de encontrar soluções que maximizem o grau de observabilidade da rede a par de minimizar os custos globais. Descreve-se abaixo dois indicadores, que caracterizarão a robustez de um plano de medições, quantificando um risco de perda de observabilidade. Estes indicadores são calculados quando a medida, selecionada de forma aleatória, se torna indisponível. Esta condição é denominada crítica e representada por Cr .

a) PiO - Probabilidade de Perda Iminente da Observabilidade

Este indicador retrata a probabilidade da rede se tornar inobservável se ocorrer Cr . E as chances desta situação ocorrer está proporcionalmente ligada ao número de C_{meds} ($N_{C_{meds}}$) existentes no conjunto total de medidas, pois a perda de uma ou mais medidas críticas torna a rede totalmente inobservável. Considera-se que qualquer medida, dentre as m medidas, tem a mesma chance de tornar-se indisponível. Assim, o indicador é calculado pela equação 13:

$$PiO = P(\text{inobservabilidade}|Cr) = \frac{N_{C_{meds}}}{m} \times 100\% \quad (13)$$

Quanto maior é este indicador menos robusto é o sistema, mais provável é a perda total de observabilidade e menos confiável é o sucesso da EE (menos capacidade de corrigir erros grosseiros nas medidas). Este indicador é usado para quantificar a robustez “ $m-1$ ” do sistema de medição.

b) PaC - Probabilidade de Aumento da Criticalidade

A condição Cr impõe também uma tendência crescente do risco de inobservabilidade, pois medidas críticas adicionais podem aparecer quando a medida tornada indisponível

é um elemento de $Cconjs$. A probabilidade do aumento de $Cmeds$ está relacionada à quantidade de medidas no $Cconjs$ (denominado M_{Cconjs}) e é expresso pela equação 14.

$$PaC = P(\text{novos } Cmeds|Cr) = \frac{M_{Cconjs}}{m} \times 100\% \quad (14)$$

Este indicador vai de 0% quando não há nenhum $Cconjs$ até 100% quando todas as medidas pertencem a um único $Cconjs$. Quanto maior é o valor de PaC , mais susceptível à perda de observabilidade fica o sistema de monitorização.

4 Teoria dos Grafos e a Metaheurística

VNS

O primeiro artigo escrito sobre a Teoria dos Grafos data de 1736 por Leonhard Eulerem sobre As Sete Pontes de Königsberg. Nos últimos 30 anos, intensificaram-se diversos trabalhos sobre o tema e confirma-se a sua importância na resolução de vários problemas em áreas diversas da engenharia e da ciência como física e química, ciência da computação, linguística, ciências sociais, biologia, matemática, entre outros.

Particularmente, os conceitos de grafos vem sendo aplicados em muitos problemas de alocação de medidores convencionais e de PMUs em redes elétricas [Filho et al. 1990, Haynes et al. 2002, Meghanathan 2015, Liu et al. 2016]. Neste capítulo, introduzem-se os principais conceitos da Teoria dos grafos e da metaheurística usados na otimização neste trabalho.

4.1 Definição e Propriedades dos Grafos

Um grafo G é um par de dois conjuntos (V, E) , onde V é um conjunto de vértices e E é um conjunto de pares de vértices chamados de arestas. Cada aresta $e \in E$ está associada a dois vértices v_1 e v_2 de V denotado por $e = (v_1, v_2)$. Neste caso, diz-se que v_1 é adjacente (ou vizinho) a v_2 , ou que um é incidente ao outro. A notação padrão para o conjunto de vértices é $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ e para o conjunto de arestas é $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$.

Na Figura 9, ilustra-se a representação de um grafo particular com seus vértices e arestas.

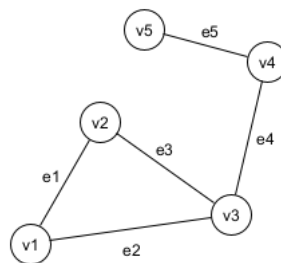


Figura 9 – Grafo genérico com 5 vértices e 5 arestas.

Uma aresta e do conjunto E é definida por um par de vértices não ordenado, denominado as extremidades de e . Na Figura 9 a aresta e_1 conecta os vértices v_1 e v_2 , dizemos que estes vértices são adjacentes, ou incidentes a e_1 ou ainda que e_1 é incidente aos vértices v_1 e v_2 .

Os grafos são uma abstração comum para representar uma estrutura de informações e dados. Alguns exemplos incluem: linhas aéreas de uma companhia, onde os vértices são as cidades de partida e chegada dos aviões e as arestas são as rotas que ligam as cidades; redes de interação de proteínas, onde os vértices são proteínas e as bordas representam interações entre proteínas; e redes sociais, onde os nós são pessoas e as arestas representam amigos. Similarmente, uma rede elétrica de potência pode ser representado por um grafo $G = (V, E)$ no qual os vértices representam os barramentos elétricos e as arestas representam as linhas de transmissão que conectam os barramentos.

Muitos trabalhos de AOP que usam a análise topológica da observabilidade fazem uso da representação em grafos do sistema elétrico para modelar o problema de otimização. Nesta tese, embora se faça uso da observabilidade numérica como critério de busca de soluções, recorre-se aos conceitos de grafos para melhorar a eficiência do algoritmo.

A identidade de um grafo é definida por vários parâmetros. Listam-se a seguir alguns:

- O número de vértices de um grafo é denominado a ordem n do grafo. No grafo representado anteriormente a ordem $n=5$;
- O grau de um vértice é definido como o número de vértices que lhe são incidentes ou adjacentes. No grafo exemplificado o grau do vértice v_3 é igual a 3;
- Uma rota em um grafo é uma sequência de vértices e arestas que unem estes vértices. O comprimento de uma rota é o número de arestas que possui. Se a rota começa e termina num mesmo vértice, diz-se que a rota é fechada. As rotas podem ser classificadas como *caminho* quando nela não se repetem vértices ou *ciclo* quando a rota é fechada e também onde não se repetem vértices;
- Um grafo é conexo se existe pelo menos um caminho entre qualquer par de vértices; doutra forma, diz-se desconexo;
- Uma árvore é um grafo onde não existem ciclos;
- Um subgrafo é um grafo conseguido pela remoção de alguns vértices e/ou arestas de um grafo original. Na Figura 10 apresenta-se um subgrafo obtido do grafo da Figura 9 pela remoção da aresta e_1 .

Representação Matricial de grafos

Os grafos podem ser representados na forma matricial por uma matriz quadrada denominada de *Matriz de Adjacência*. Nesta matriz, as linhas e colunas representam os vértices do grafo. Um número "1" na posição (i, j) significa que os vértices i e j são adjacentes (existe uma aresta que conecta os dois). Se $G=(V, E)$ é um grafo não direcionado

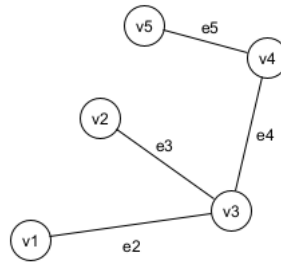


Figura 10 – Subgrafo obtido do grafo anterior pela remoção da aresta entre v_1 e v_2

e com N elementos, a matriz de adjacência $A=[a_{ij}]_{N \times N}$ é uma matriz cujos elementos são definidos a seguir:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o vértice } i \text{ está conectado com } j; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (15)$$

No caso do grafo da Figura 9, constrói-se a seguinte matriz de adjacência:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Uma característica da matriz de adjacência é ser sempre simétrica com a diagonal nula, se o grafo for não direcionado.

A representação matricial do grafo é bastante conveniente pois permite o cálculo matemático de várias métricas do grafo. Por exemplo, O grau de um vértice i , denotado por $deg(v_i)$, pode ser calculado através da matriz de adjacências do grafo pela adição de todos os valores da coluna ou linha i . Matematicamente pode-se escrever a equação 16:

$$deg(v_i) = \sum_{j=1}^N [a]_{ij} \quad (16)$$

Um problema pode ser modelado como um grafo com pesos diferentes nas arestas. O peso nas arestas pode traduzir distâncias de linhas numa rede elétrica ou de telecomunicações ou representar fluxo de veículos numa rede rodoviária. A Figura 11 mostra o mesmo grafo original, mas com pesos nas arestas.

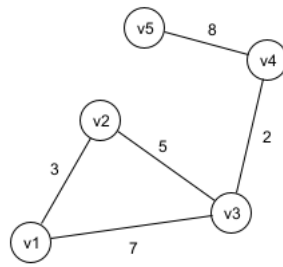


Figura 11 – Grafo ponderado.

Neste caso, de forma análoga pode-se construir a matriz de adjacências ponderada, no qual os pesos das arestas entre os vértices aparecem nas linhas e colunas correspondentes na matriz.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 7 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 7 & 5 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2 O Conjunto Dominante Conexo

O conjunto dominante (CD) de um grafo $G=(V,E)$ é um subconjunto D contido em V tal que cada elemento de V ou pertence a D ou é vizinho de algum elemento de D . O número dominante $\gamma(G)$ é o número de elementos do menor conjunto dominante do grafo. Quando se requer que o subgrafo induzido pelos vértices de D seja conexo, tem-se um conjunto dominante conexo (CDC).

Na Figura 12, mostra-se uma representação em grafo da rede IEEE 14 barras e a identificação de um conjunto dominante deste grafo e do respectivo conjunto dominante conexo. Como se constata da figura, o CD é constituído de quatro elementos $\{2,7,10,13\}$. Ao tentar conectar estes vértices com vértices e arestas, obtêm-se o subgrafo definido em b) pelos vértices $\{2,4,7,9,10,13,14\}$ e pelas cinco arestas representadas à tracejado, ou seja, obtêm-se um CDC.

É preciso dizer que 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, como roteamento de redes sem fio [Ding et al. 2010] ou definição de arquitetura SDN da Internet das Coisas [Bendouda et al. 2018].

No caso dos problemas AOP, o CD mostrado na Figura 12, em representação do grafo da rede IEEE14, é análogo ao posicionamento necessário de PMUs em barramentos que

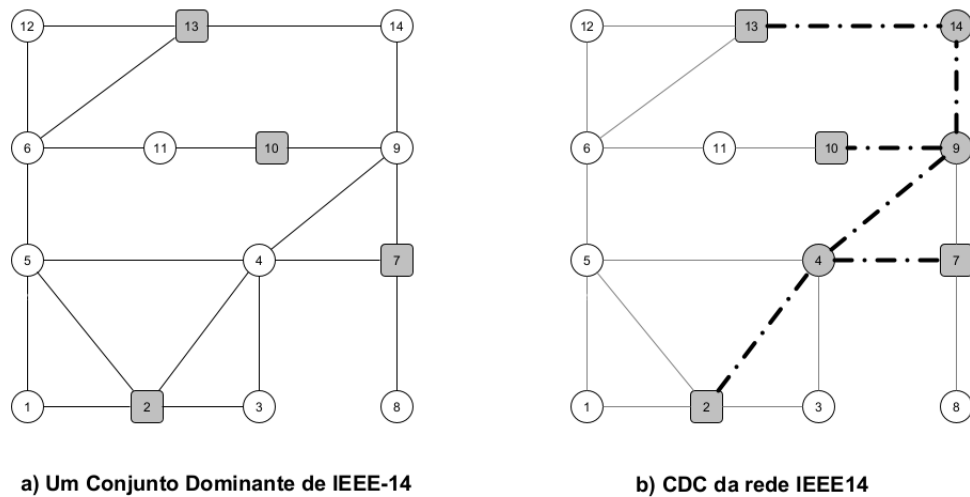


Figura 12 – Exemplo de um grafo e seu respectivo CDC

garantam a observabilidade topológica da rede, enquanto que o CDC em b) representaria as PMUs e outras barras de passagem necessárias para construir uma rede de fibra ótica ou *OPGW* (*Optical Ground Wire*) de comunicação entre as quatro PMUs alocadas. A formulação do problema de AOP como um problema de minimização de um *CDC* foi usada na dissertação de [Cruz 2016] para resolver o problema de minimização de custos totais no desenho de um sistema de medição de uma WAMS, composto por PMUs e uma rede de comunicação em cabos *OPGW*. Pretende-se, também nesta tese, integrar esta formulação e metodologia no algoritmo multi-objetivo proposto e aplicá-la na minimização de uma das funções-objetivo.

O número dominante $\gamma(G)$ é o número de elementos do menor conjunto dominante do grafo. O desafio em muitos trabalhos é minimizar a cardinalidade deste conjunto, a fim de obter um conjunto dominante conexo mínimo. O número dominante conexo $\gamma_c(G)$ é o menor número de elementos do conjunto dominante conexo.

O problema da busca do *CDCM* é, em geral, um problema NP-difícil. No trabalho de [Guha e Khuller 1998], compara-se duas abordagens para resolver o problema. Uma delas consiste em construir o *CDCM* em duas fases: primeiramente encontra-se o *CDM* e, numa segunda fase, conecta-se os elementos desse conjunto através da construção de uma árvore de Steiner [Siebert et al. 2020]. A segunda técnica foi usar um algoritmo guloso para construir o *CDCM* em uma única fase, pelo crescimento de uma árvore que começa pelo vértice de maior grau.

A abordagem de encontrar o *CDCM* em duas fases vem sendo usada cada vez mais [Liu et al. 2016] e é o mais indicado para o problema AOP nesta tese, pois a solução deve identificar o número e posicionamento de PMUs - que corresponde ao *CDM* - e também definir a rede de comunicações, que corresponde ao *CDCM*. Outra razão para se adotar a

estratégia das duas fases são as várias condições restritivas e contingenciais que contornam a definição do problema de alocação, como perdas de PMUs e de linhas, presença de *ZIB* entre outros, que podem dificultar a modelagem do problema de AOP como um complexo *CDCM*.

A proposta desta tese de desenhar sistemas de medição resilientes, relaciona-se com a imposição de contingências na perda de PMUs e falhas em trechos de cabos da rede de comunicação está intimamente relacionado com o problema de encontrar um conjunto 2-dominante 2-conexo (*C2D2C*), também da teoria dos grafos [Shang et al. 2007]. Um conjunto 2-dominante (*C2D*) de grafo $G = (V, E)$ é um subconjunto D contido em V tal que cada elemento de V ou é vizinho de dois elementos quaisquer de D ou, pertence a D e é vizinho de um elemento de D . Um *C2D2C* é um subgrafo conexo que liga todos os nós do *C2D*. Se o problema é ter tolerância a falhas em PMUs e na rede de comunicação e minimizar ao mesmo tempo os custos, então tal problema pode ser modelado como o de encontrar um *C2D2C* mínimo.

Se o problema de AOP possui uma restrição de garantia de resiliência na rede de transmissão de dados por cabos de fibra ótica, busca-se então construir uma rede de comunicações *OPGW* com redundância, ou seja, o *CD2C*. A Figura 13 mostra um *CD2C* na rede IEEE-14. Se o tracejado representa a rede *OPGW* de comunicação, uma falha em qualquer dos ramos não desconectaria imediatamente a comunicação das PMUs, pois haveria sempre uma segunda conexão. Não é este o caso da rede de comunicação sem resiliência mostrada na Figura 12(b) onde a falha em qualquer ramo da fibra (linhas tracejadas) desconectaria uma PMU da rede de comunicação.

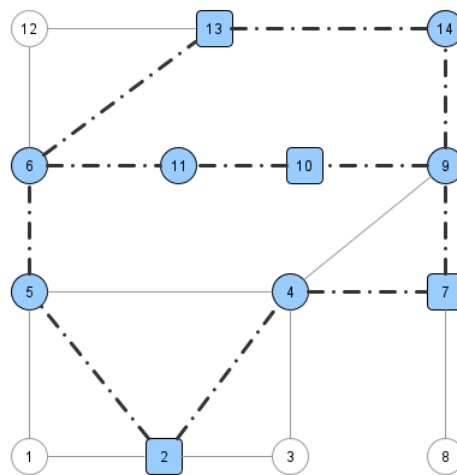


Figura 13 – Conjunto Dominante 2-Conexo

4.3 Métricas de Centralidade em Grafos

Em um grafo, um conjunto de medidas ou métricas podem ser calculados, os quais caracterizam o grafo como um todo ou seus elementos individualmente. Na seção anterior definiu-se alguns básicos como, o número de vértices e arestas de um grafo, o grau de um vértice e ordem de um grafo. No entanto, existem diversas outras métricas, dos quais destaca-se, pela utilidade nesta tese, as métricas de centralidade. A centralidade é um conceito muito importante para a identificação de nós importantes em um grafo ou de quão central é o nó em um grafo. Uma das métricas de centralidade mais básicas é o grau, definido na seção anterior. Outra métrica central muito útil é a centralidade de Intermediação (*Betweenness*). O trabalho de [Meghanathan 2015] mostrou que dentre outras as métricas de centralidade, estas duas, o grau e a intermediação, eram mais eficazes na busca de um CDCM de um grafo.

Outra métrica, originalmente introduzida em [Cruz 2016], é a centralidade da Dominância. Esta foi usada, juntamente com a centralidade de Intemediação num algoritmo de AOP. Em seguida, define-se estas duas métricas:

A Centralidade da Intermediação ou *Betweenness Centrality* (BWC)

A medida de centralidade de Intermediação ou *Betweenness Centrality* (BWC) de um vértice i traduz a sua relevância em conectar vários vértices e vários caminhos no grafo. A $BWC(i)$ é proporcional a $mc(i)$ que é o número de vezes que o vértice i faz parte de um caminho mais curto entre quaisquer pares de vértices no grafo. O vértice 3 é o que apresenta maior valor mc ($mc(3)=4$), ou seja, existem 4 caminhos, entre pares de vértices origem-destino que passam pelo vértice 3 (vértice intermediário dos caminhos). Este valor elevado de mc do vértice 3 mostra a importância deste vértice no grafo, pois a sua eliminação desconectaria muitos caminhos possíveis. Se o grafo representasse uma rede de transmissão de potência, o barramento 3 seria de capital importância para a conectividade da rede e o transporte de potência. Por outro lado, se o barramento 5 falhasse, não comprometeria a conectividade dos nós restantes da rede - a sua BWC é a mais baixa.

O número de caminhos mais curtos a partir de um nó j para todos os outros nós k em um grafo não-direcional pode ser determinado através da execução do algoritmo Busca Primária em Largura (BFS - *Breadth First Search*). O BFS é um algoritmo simples de busca em um grafo e constitui-se um arquétipo para outros algoritmos tais como Árvore Geradora de Prim, *Dijkstra* e Menores Caminhos Simples [Cormen 2009].

Centralidade da Dominância

A Centralidade da Dominância foi originalmente introduzida em [Cruz 2016] onde

se mostrou mais eficaz na determinação de um conjunto dominante mínimo (traduzido em menor número de PMUs) que a centralidade do grau. A ideia principal para sua criação foi que para conseguir-se um conjunto dominante mínimo, os seus elementos (os vértices) deveriam combinar duas características:

1. Ter uma centralidade de grau elevado, ou seja, ser vizinho ou cobrir muitos vértices;
2. E que os vértices vizinhos (que lhe são adjacentes) apresentem um baixo valor do grau.

Estas duas desejadas características de um vértice foram expressas na equação 17 e denominado de *dominância de um vértice*:

$$dom(v_i) = deg(v_i) - \frac{\sum_{j=1}^N deg(v_j) \cdot [a]_{ij}}{deg(v_i)} \quad (17)$$

onde, $deg(v_i)$ é o grau do vértice i e $[a]_{ij}$ é o elemento (i,j) da matriz de adjacência, definido anteriormente. A equação mostra o primeiro termo, depois da igualdade, como o grau do vértice que subtrai um segundo termo que é uma média dos graus dos seus vértices adjacentes. Ou seja, quanto maior o grau do vértice e menor a média dos graus dos vértices adjacentes, maior será a dominância deste vértice.

4.4 Menores Caminhos - Algoritmo Dijkstra

O algoritmo Dijkstra resolve o problema de encontrar os menores caminhos de um vértice (fonte) para todos os demais vértices em um grafo $G = (V, E)$ nos casos onde todas as arestas tem pesos não negativos. É um algoritmo muito citado e recomendado em problemas que envolvem a definição de menores caminhos [Mirino et al. 2017] e também foi o algoritmo escolhido para definir a rede de comunicações em trabalhos anteriores [Mohammadi et al. 2016, Cruz et al. 2019]. Nesta tese também será integrado ao problema de otimização.

O algoritmo Dijkstra mantém um conjunto S de vértices cujos pesos finais dos menores caminhos da fonte s foram já determinados. O algoritmo seleciona de forma repetida o vértice $u \in (V - S)$ com o menor caminho estimado, adiciona u a S e "relaxa" todas as arestas que saem de u . Na implementação a seguir, usa-se uma fila Q de mínima propriedade de vértices, ordenados pelos seus valores d (distância).

O processo de relaxamento de um vértice (u, v) consiste em testar se se pode melhorar o caminho mais curto até v , passando pelo vértice u . Em caso positivo, atualiza-se $d[v]$ (caminhos mais curtos) e $\pi[v]$ (vértices predecessores de v).

Algorithm 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

```

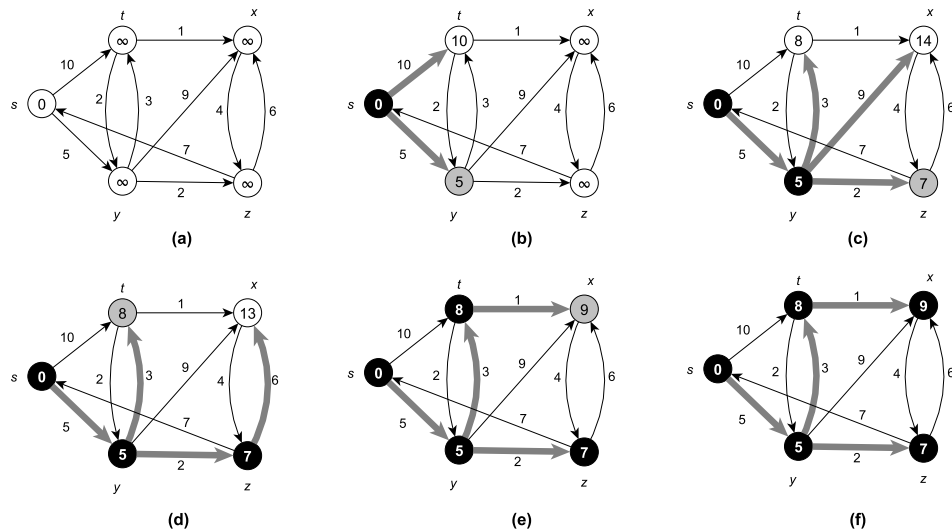


Figura 14 – A execução do Algoritmo Dijkstra. A fonte s é o vértice mais à esquerda. A estimação dos caminhos mais curtos é mostrada dentro dos vértices; as arestas em cinza indicam valores precedentes. Vértices em preto estão no conjunto S e os brancos estão na fila min-prioridade $Q = V - S$. (a) Situação antes da primeira iteração do *loop* nas linhas 4-8. O vértice em cinza tem o menor valor d e é escolhido como vértice u na linha 5. (b)-(f) As situações após cada iteração sucessiva do *loop*. O vértice cinza em cada situação é escolhido como vértice na linha 5 da próxima iteração. Os valores d e π em (f) são os valores finais.

O algoritmo Dijkstra relaxa as arestas como se mostra na Figura 14. A linha 1 inicializa os valores d e π e a linha 2 inicializa o conjunto S em vazio. O algoritmo mantém a invariante (ou métrica) $Q = V - S$ no começo de cada iteração do *loop* (linhas 4-8). A linha 3 inicializa a fila Q (mínima prioridade) com todos os vértices de V ; como neste momento $S = \emptyset$, a invariante é verdadeira depois da linha 3. Cada vez que se executa o *loop*, um vértice u é extraído de $Q = V - S$ e adicionado a S , e assim mantém-se o invariante (a primeira vez que este *loop* é executado $u=s$). O vértice u tem o caminho

mais curto estimado de qualquer vértice em $V - S$. Então, as linhas 7-8 relaxam cada aresta (u, v) que parte de u , e atualiza-se a estimativação $d[v]$ e $\pi[v]$ se o caminho mais curto para v pode ser melhorado ao passar por u . Observa-se que os vértices nunca são inseridos em Q depois da linha 3 e que cada vértice é extraído de Q e adicionado a S uma única vez, de forma que o *loop* das linhas 4-8 é iterado $|V|$ vezes. Este algoritmo é dito ser guloso porque sempre escolhe o vértice de $V-S$ mais "próximo" para ser adicionado a S .

4.5 O Algoritmo Suurballe

O Algoritmo Suurballe foi concebido por John W. Suurballe e publicado em 1974 [Suurballe 1974]. O propósito do algoritmo é encontrar dois menores caminhos disjuntos entre dois pares de vértices, usando o algoritmo Dijkstra duas vezes. A estratégia passa por rodar o Dijkstra na primeira vez e encontrar o primeiro menor caminho. De seguida faz-se uma modificação no grafo original, atribuindo-se outros pesos nas arestas e forçando que a segunda rodada do Dijkstra escolha um caminho diferente do primeiro.

O Algoritmo Suurballe tem muita utilidade em problemas onde se requer resiliência em rotas, por exemplo, em redes de comunicação [Kuipers 2012]. Nesta tese, propõe-se integrar este algoritmo na otimização visando construir uma solução de PMUs com infraestrutura de comunicação resiliente a falhas, ou seja, que a comunicação por cabos de fibra ótica entre as PMUs e o PDC se faça por dois caminhos disjuntos possíveis. De seguida se descreve o algoritmo:

4.5.1 Algoritmo Suurballe Original de Arcos-Disjuntos

Seja um grafo G , onde cada aresta (m, n) tem peso w não negativo, ou seja, $w(m, n) \geq 0, \forall (m, n)$. Além disso, defina $d(i, j)$ como o menor caminho entre os nós (i, j) de G . Dado um par de nós origem e destino (s, d) , o algoritmo de Suurballe realiza as seguintes operações:

1. Executa o algoritmo Suurballe enraizado em o e encontra uma Árvore Mínima T ;
2. Atribui um novo peso às arestas de G dado por: $w(m, n)' = d(s, m) + w(m, n) - d(s, n)$. Assim obtém-se um grafo modificado $G(s)$.
3. Inverte o sentido das arestas direcionadas no caminho mínimo (s, d) em $G(s)$.
4. Roda novamente o Dijkstra e encontra um novo Caminho Mínimo (s, d) no grafo modificado $G(s)$.
5. Gera um subgrafo unindo os 2 caminhos mínimos (s, d) , no grafo original e no modificado, retirando arestas opostas (a origem de uma é o destino da outra).

O subgrafo resultante é composto de dois caminhos arco-disjuntos entre (s,d) em G , sendo que o comprimento total deste subgrafo é o mínimo. E assim termina o algoritmo.

A Figura 15 ilustra a execução do algoritmo em um grafo para obter um par de caminhos arco-disjuntos do nó A para o nó F.

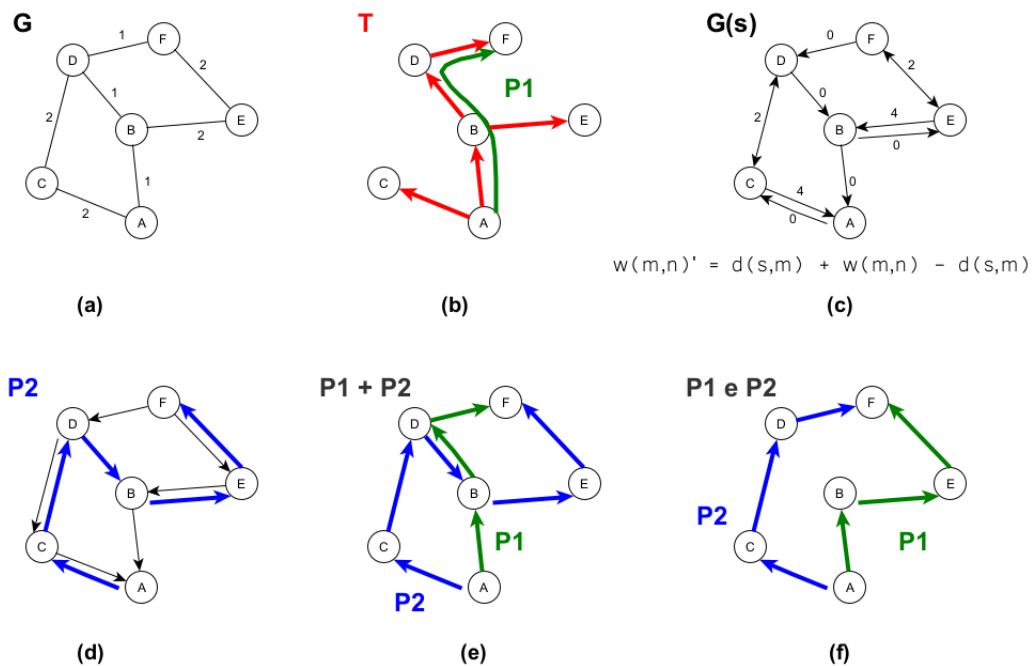


Figura 15 – Exemplo de funcionamento do algoritmo de Suurballe. Em (a) tem-se o grafo G com arestas ponderadas. Em (b) a árvore geradora mínima T e o primeiro menor caminho $P1$ (em verde). Em (c) tem-se o grafo modificado $G(s)$ e em (d) o menor caminho $P2$, encontrado sobre $G(s)$. Em (e) os dois caminhos obtidos são confrontados, eliminando-se as arestas opostas. Obtendo-se assim a solução ótima apresentada em (f).

4.5.2 Algoritmo Suurballe Generalizado

Na secção anterior descreveu-se o Algoritmo Suurballe de Arcos-disjunto mas que podem compartilhar vértices. Uma versão do Suurballe para Nós-Disjuntos foi publicada por [Suurballe e Tarjan 1984], ou seja, buscar dois caminhos que não compartilhem nós. Esta versão é obtida por uma ligeira modificação no Algoritmo Suurballe de Arcos-Disjuntos:

Cada vértices é dividido em dois, um nó de entrada e um nó de saída, e insere-se uma aresta falsa entre elas. Em seguida, separam-se as arestas originais entre elas, deixando um com todas as adjacências de entrada do vértice original, e outro com todas as adjacências de saída. Então, aplica-se neste grafo modificado a versão original do Suurballe (arco-disjunto) e no final retira-se as arestas falsas, unindo novamente as arestas divididas.

Pode-se ainda pensar numa terceira versão e mais generalizado Algoritmo Suurballe, conferindo mais flexibilidade ao mesmo ao permitir que os dois caminhos possam, em caso de impossibilidade de encontrar dois caminhos mínimos totalmente disjuntos, compartilhar alguns nós ou arestas necessárias. Esta generalização foi proposta por [Lima 2015] no planejamento de redes óticas de transporte.

O Algoritmo consiste em (como no caso anterior) modificar o grafo de uma certa maneira, antes de aplicar o Suurballe original. A seguir se descrevem os passos deste Suurballe Generalizado que obtém dois caminhos disjuntos, mas permitindo compartilhar o mínimo possível de nós e arestas:

- a) Dividir cada vértice v de G em dois vértices v_{in} e v_{out} , obtendo um grafo G' ;
- b) Adicionar em G' uma aresta falsa e_v para cada v , originada em v_{in} e incidindo em v_{out} ;
- c) As arestas originalmente incidentes em v agora passam a incidir em v_{in} ;
- d) As arestas que tinham origem em v agora passam a ter origem v_{out} ;
- e) Criar p cópias de cada aresta em G' ;
- f) As cópias das arestas falsas v recebem peso $X = \sum_{e \in E} w(e)$;
- g) As cópias das arestas originais recebem peso $Y = X \cdot \sum_{v \in E} p$;
- h) Executar o Suurballe para G' ;
- i) Nos caminhos obtidos sobre G' , as cópias de cada aresta original devem ser unidas de volta, e cada e_v (ou cópia) significa uma passagem por v .

A Figura 16 descreve como se gera o grafo modificado para o algoritmo de Suurballe Generalizado. Nesta figura ilustra-se como se processa a modificação em um vértice, sendo que este processo é replicado em cada vértice do grafo.

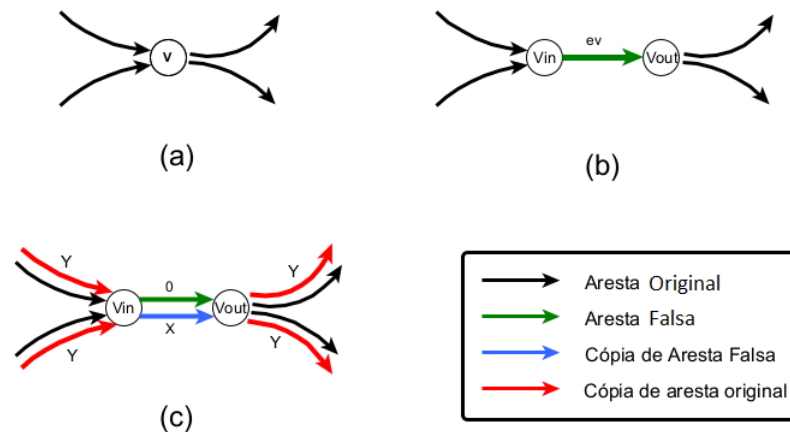


Figura 16 – Exemplo da criação do grafo modificado. Em a) um vértice v com suas arestas; em b), v é duplicado em $[v_{in}]$ e $[v_{out}]$, as arestas repartidas entre esses dois vértices e uma aresta falsa é adicionada entre os dois; em c) são adicionadas cópias de todas as arestas. A cópia de aresta falsa recebe peso X e as demais cópias recebem peso Y .

Este algoritmo de Suurballe Generalizado será integrado no algoritmo de otimização proposto nesta tese para o caso de planificação de uma rede de comunicação das PMUs com resiliência a falhas. Esta versão de Suurballe é mais adequado porque em muitas redes de particular configuração pode não existir caminhos totalmente disjuntos entre dois pontos.

4.6 A Metaheurística VNS Multi-Objetivo

Nesta seção introduz-se a metaheurística VNS (*Variable Neighbourhood Search*) ou busca em vizinhança variável e que se pretende usar numa otimização multi-objetivo nesta tese. O VNS foi originalmente introduzida por [Mladenović e Hansen 1997] e baseia-se no conceito da mudança contínua de vizinhanças no processo de busca de melhores soluções. Mostra ser um método simples e eficaz na resolução de problemas de otimização [Hansen et al. 2010].

O VNS apoia-se no método de vizinhanças variáveis:

- Considera um conjunto de vizinhanças $\{N^1, N^2, \dots, N^{k_{\max}}\}$ parametrizados pelo índice k ;
- Quanto maior for k , maiores e mais afastadas serão as vizinhanças. A ideia consiste em deslocar-se de vizinhanças mais próximas para as mais afastadas, buscando-se fugir de ótimos locais;
- Muda-se de vizinhança ($k \leftarrow k + 1$) sempre que se está "preso" em uma solução;

- Um mínimo local de uma vizinhança não é forçosamente de uma outra vizinhança;
- Em caso de sucesso (redução de f), retorna-se para N^1 ;
- Normalmente, permite-se vários ciclos de $k=1$ à $k = k_{max}$.

Esta metaheurística foi pioneiramente aplicada num problema AOP pelos autores [Cruz et al. 2019], mostrando escalabilidade e flexibilidade em várias redes e restrições contingenciais.

4.6.1 A frente de Pareto em Otimização Multi-Objetivo

Nos Problemas de Otimização Multi-Objetivo implicam muitas vezes construir um conjunto de soluções ótimas e não uma única, pois as funções-objetivo podem ser conflitivas. Neste caso, fala-se de soluções da curva de Pareto. Assim, define-se alguns conceitos:

A dominância de Pareto: um conjunto de vetores $\vec{a} = \{ a_1, a_2, \dots, a_k \}$ é dito dominar $\vec{b} = \{ b_1, b_2, \dots, b_k \}$ ou $\vec{a} \leq \vec{b}$, se $a \leq b$ para cada $j \in \{1, 2, \dots, k\}$ e, $a_j < b_j$ ao menos por um valor de j .

O conjunto ótimo de Pareto para qualquer problema de otimização multi-objetivo é o conjunto P^* de vetores $\vec{x} \in \Omega$ onde não há nenhum vetor $\vec{x}' \in \Omega$, que torne a desigualdade $\vec{f}(\vec{x}') \leq \vec{f}(\vec{x})$ verdadeira.

A curva de Pareto de qualquer otimização multi-objetivo é o conjunto PF^* de vetores $\vec{f}(\vec{x})$ correspondente a cada $\vec{x} \in P^*$. Ou seja, a curva de Pareto é o conjunto de vetores funções no espaço de soluções que representa o compromisso para os diferentes objetivos. Na otimização multi-objetivo é necessário encontrar o conjunto ótimo de Pareto de soluções - P^* - no espaço das variáveis de decisão que resulte no conjunto da curva de Pareto, PF^* , no espaço dos objetivos. O conceito da curva de Pareto é mostrada na Figura 17.

4.6.2 Implementação do Algoritmo MOVNS

O surgimento de vários problemas de otimização multi-objetivo motivaram a adaptação da metaheurística VNS para abarcar tais situações. Assim, o VNS multi-objetivo aqui designado por MOVNS, foi primeiramente desenvolvido por Geiger [Geiger 2008] e vem sendo usado e adaptado em vários problemas de otimização, como a alocação de nós numa rede [Abdelkhalek et al. 2015] ou o roteamento de veículos [Reyes-Rubiano et al. 2020].

O algoritmo MOVNS diferencia-se do algoritmo VNS tradicional mono-objetivo ao optar por fazer uma seleção aleatória das vizinhanças e uma seleção arbitrária

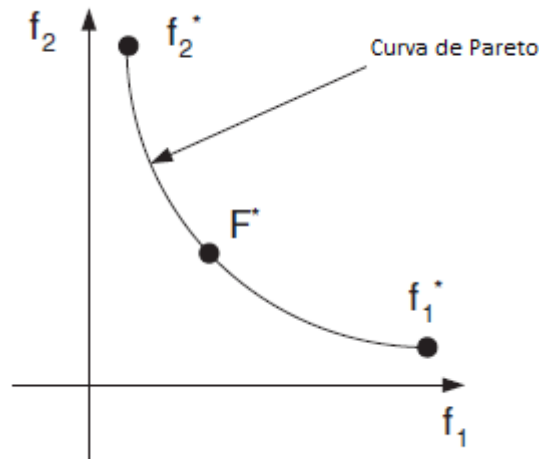


Figura 17 – A Curva de Pareto

das soluções-base dentre as soluções não-dominadas ainda não visitadas. Dito de outra maneira, antes de conduzir a busca na vizinhança, a solução-base é selecionada aleatoriamente do conjunto de soluções dos quais nenhuma busca na vizinhança foi ainda executada e, em seguida, uma das vizinhanças definidas é arbitrariamente selecionada e aplicada à solução selecionada. Após cada busca na vizinhança, o conjunto atual de soluções não-dominadas (aproximação da frente de Pareto) é atualizada.

Nesta tese, usa-se um algoritmo MOVNS adaptado do algoritmo de Geiger para resolver um problema de otimização de alocação ótima de PMUs e com três funções-objetivo. Um pseudo-código do algoritmo MOVNS é apresentado abaixo. No algoritmo, usa-se uma heurística gulosa para gerar uma solução inicial. Um conjunto D de soluções não-dominadas é inicializada com esta primeira solução. Usa-se duas estruturas de vizinhança ($N1$ e $N2$) para gerar novas soluções (soluções vizinhas). Em cada iteração do algoritmo, uma solução-base não-dominada é aleatoriamente selecionada de D . Estas soluções são marcadas como visitadas e não podem ser selecionadas nas próximas iterações. Das soluções-base, soluções vizinhas são geradas usando uma vizinhança N_i escolhida randomicamente. O conjunto D é atualizado com soluções $s \in N_i$. A solução s é adicionada ao conjunto D se $s \notin D$ e se não for dominada por nenhuma outra solução de D . As soluções de D dominadas por s são removidas de D . O algoritmo pára quando atinge um critério de parada definido.

Algorithm 2 Pseudo-código da Metaheurística MOVNS

Require: Soluções Iniciais $\{s_1, s_2, s_3\}$, k_{max} , número de estruturas de vizinhança N_i ,
Condição_Parada.

```

1:  $D \leftarrow$  conjunto de soluções não-dominadas obtidas  $s_1, s_2, s_3$ 
2: while Condição_Parada não é atingida do
3:    $k \leftarrow 1$ ;
4:   repeat
5:     Selecionar aleatoriamente uma solução não visitada das soluções-base  $s \in D$ 
6:     Assinalar  $s$  como solução visitada
7:     Selecionar aleatoriamente uma estrutura  $N_i$ 
8:      $s' \leftarrow$  Perturbação( $s, N_i(s), k$ )
9:      $s'' \leftarrow$  Busca_local( $s'$ )
10:    for Para cada  $s'' \in N_i$  do
11:      Avaliar a Solução  $s''$ 
12:       $D \leftarrow$  soluções não dominadas de  $D \cup s''$ 
13:    end for
14:     $s, k \leftarrow$  Mudar_Vizinhança( $s, s'', k$ );
15:  until  $k = k_{max}$ 
16:  if se todas as soluções de  $D$  estão visitadas then
17:    Remover todas as assinalações
18:  end if
19: end while
20: return  $D$ ;
```

5

Formulação do Problema e Metodologia

Neste capítulo, apresenta-se os contornos do problema de otimização de PMUs numa rede de potência e o algoritmo proposto para a resolução do problema em causa.

5.1 Formulação do Problema

O presente trabalho propõe-se resolver o problema da alocação ótima de PMUs numa rede elétrica de transmissão. Na planificação de um sistema de medição e monitoramento de uma rede elétrica deve-se determinar uma quantidade e distribuição de PMUs tal que permita a correta estimação do estado do sistema de potência. Contudo, os operadores das redes estão, por questões económicas e de restrição orçamentária, limitados a um valor de financiamento do investimento. No mundo real e na hora de investir, os decisores dos sistemas de potência se confrontam com a realidade de encontrar um ponto de equilíbrio entre um nível de robustez aceitável do plano de medição e a disponibilidade financeira. Ou por outra perspectiva, saber qual o plano de medição pode-se implementar perante um teto máximo do recurso financeiro.

É nesta perspectiva que se propõe o problema da planificação do sistema de medição de uma WAMS, que visa dois grandes objetivos: minimizar os custos financeiros totais do investimento e maximizar a robustez do sistema de medição. Na minimização dos custos financeiros, procura-se abranger todos os custos com a instalação de equipamentos e os custos com as infraestruturas de comunicação (IC). Nos custos de equipamentos, incluem-se as PMUs, os PDC, os *switches* e roteadores nos barramentos. Os custos com a IC referem-se aos custos com cabos OPGW necessários para interligar todas os barramentos com PMUs. Os cabos OPGW são instalados sobre a rede elétrica, considerando-se um sistema de transmissão independente e numa arquitetura centralizada [Gore e Kande 2015] e com vários concentradores de dados de PMUs. Considera-se que os custos de PDCs associados e aplicativos integrados no custo unitário das PMUs.

Consequentemente a minimização dos custos financeiros vai além da simples minimização de unidades de medição fasoriais, sendo que alguns trabalhos mostraram que ao levar em consideração os custos das IC, a otimização dos custos requereria

um número de PMUs maior que se fosse considerado simplesmente os medidores [Shahraeini et al. 2012], [Cruz et al. 2019].

Adicionalmente, o outro objetivo é a maximização do grau de observabilidade do sistema de forma a tornar a Estimacão de Estado o mais confiável possível. Isto só pode ser avaliado através de uma análise numérica da observabilidade. A observabilidade topológica constitui um dos requisitos da otimização, mas o grau de observabilidade fica na esfera da função-objetivo. Para isso, consideram-se dois indicadores que traduzem o grau de observabilidade do sistema. Estes são o *Pio* e o *PaC*, associados ao *Cmed* e *Cconj*, respectivamente, e apresentados anteriormente. Quanto menor estes valores, mais robusto é o sistema e mais fiável poderá ser a EE. Portanto, a proposta deste trabalho visa resolver o problema de otimização multi-objetivo da alocação de PMUs e que visa minimizar os custos totais do plano de medição numa WAMS e maximizar o grau de observabilidade numérica, através da minimização da ocorrência de medidas e conjuntos críticos. Em seguida, apresenta-se o problema com as funções-objetivo e correspondentes restrições.

- a) Função-objetivo 1: *Minimizar os Custos Totais* da WAMS. Estes Custos Totais englobam os custos com PMUs e os custos com a IC;
- b) Função-objetivo 2: *Minimizar medidas criticas, Cmed*;
- c) Função-objetivo 3: *Minimizar conjuntos criticos, Cconj*;
- d) Restrição (1): diz respeito aos requisitos de desempenho. Considera-se dois casos: requisito de observabilidade em condições normais, requisito de observabilidade na presença de perda de uma única PMU. As soluções são simuladas separadamente para cada um destes casos;
- e) Restrição (2): os cabos OPGW devem interligar todas as PMUs. Considera-se dois casos também: (1) rede de cabos com configuração de árvore (sem resiliência a falhas) e (2) a rede de cabos resiliente a falhas (sempre há dois caminhos de cabos para transmissão de dados).

Nas próximas seções, discutem-se estes requisitos de desempenho.

5.1.1 Alocação de PMUs em Condições Normais

Em seguida, apresenta-se a formulação do problema de otimização multi-objetivo considerando condições normais de operação, ou seja, sem perda de PMUs.

A formulação do problema é dada pelas funções-objetivo 18, 19, 20 e pelas restrições 21 á 29:

$$\mathbf{Min} FO_1 = \left(\sum_{i=1}^N cp_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (cf \cdot [ap]_{ij} + cr \cdot x_i) \cdot [y]_{ij} \right) \quad (18)$$

$$\mathbf{Min} \quad FO_2 = \left(\sum_{i=1}^N Cmed_i \right) \quad (19)$$

$$\mathbf{Min} \quad FO_3 = \left(\sum_{i=1}^N Cconj_i \right) \quad (20)$$

sujeito a

$$A \cdot X \geq [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (21)$$

$$\det(H^T R^{-1} H) \neq 0. \quad (22)$$

$$\forall j \in V, x_j + \sum_{ij \in E} x_i \geq 1 \quad (23)$$

$$x_f = 1 \quad (24)$$

$$\forall S \subseteq V, \sum_{ij: i \in S, j \in V \setminus S} y_{ij} \geq 1 \quad (25)$$

$$\forall S \subseteq V, \sum_{ij: i, j \in S} y_{ij} \leq |S| - 1 \quad (26)$$

$$\forall i, j \in V, y_{ij} \leq x_i \quad (27)$$

$$\forall i, j \in V, y_{ij} \leq x_j \quad (28)$$

$$\forall i, j \in V, y_{ij} \leq e_{ij} \quad (29)$$

A função-objetivo 18 trata da minimização dos custos de PMUs (primeiro somatório) e de IC (segundo somatório). No segundo somatório, o primeiro termo representa o custo de elementos ativos, como *switches* e roteadores instalados nos barramentos; o segundo termo representa os custos do comprimento dos cabos OPGW. As funções-objetivo 19 e 20 referem-se à minimização de medidas e conjuntos críticos de forma a maximizar o grau de observabilidade numérica.

Nas equações 21 e 22 se assegura que são atendidas a observabilidade topológica e numérica respectivamente. As equações (23) à (29) estão relacionadas com as restrições de conjunto dominantes da teoria do gráfico. A restrição 24 define a

localização do PDC. A Restrição 25 assegura que os cabos OPGW devem ligar todos os barramentos com PMU. O parâmetro S é o conjunto de todos os barramentos ligados pela rede OPGW. A restrição 26 impõe que a rede de comunicação tenha uma configuração em estrutura de árvore. Considera-se nesta otimização que os caminhos da rede de comunicação (cabos OPGW) são construídos nas linhas de rede elétrica que ligam toda a PMU a um grande PDC central, numa arquitetura central da WAMS. E as últimas três restrições são usadas para verificar se os arcos selecionados existem no gráfico inicial ($e_{ij} = 1$ se e somente se a aresta ij estiver no gráfico inicial), e que um arco só é selecionado se as suas duas extremidades estiverem no conjunto dominante.

No caso de se desejar uma rede de comunicação com resiliência, que garanta que uma PMU continue a comunicar os seus dados em caso de falha em um ramo do cabo de fibra ótica, substitui-se a equação 26 por 30.

$$\forall w \in V \setminus \{f\}, \forall S \subseteq V \setminus \{w\}, \sum_{ij:i \in S, j \in V \setminus S \cup \{w\}} y_{ij} \geq 1 \quad (30)$$

A restrição 30 induz uma comunicação de rede fiável que é resistente contra uma única falha num ramo OPGW, uma vez que duas ligações OPGW disjuntas são estabelecidas entre qualquer barramento com PMU e outros dois.

As demais variáveis são definidas a seguir:

N é o número de nós da rede;

cp_i é o custo de instalação da PMU na barra i da rede;

$x_i \in \{0,1\}$, sendo 1 quando uma PMU é alocada no barramento i e 0 caso contrário;

cr é o custo dos equipamentos ativos, como roteadores e switches. Considera-se que todos os barramentos com PMUs terão tais equipamentos;

cf é o custo de cabos OPGW por km;

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

$y_{ij} \in \{0,1\}$. Recebe o valor 1 se uma linha existente $\{i,j\}$ que conecta dois barramentos é selecionada para integrar a rede de cabos de comunicação OPGW;

X é o vetor da localização de PMUs, cujos elementos x_i foram definidos anteriormente;

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

5.1.2 Alocação de PMUs com Perda de PMUs

Nos sistemas de potência podem ocorrer perdas ou falhas de PMUs. Neste caso, o sistema pode se tornar inobservável para a EE. Para resguardar-se desta situação ou diminuir a probabilidade do sistema perder a total observabilidade com a falha de uma PMU, o processo de otimização é alterado para garantir que todos os barramentos sejam observados por pelo menos dois PMUs, o que concede maior robustez ao sistema de medição contra a perda singular de qualquer PMU. Assim, o problema anterior é ligeiramente reformulado para este caso, substituindo-se unicamente a restrição da equação 21 (requisito de observabilidade em condições normais) pela equação 31 (requisito contra perda de PMU), o qual garante que todo barramento é observado por pelo menos duas PMUs.

$$A \cdot X \geq [2 \ 2 \ 2 \ \dots \ 2]^T \quad (31)$$

Nesta situação e segundo a definição de Cmeds, a solução a ser encontrada se caracterizará pela ausência de medidas críticas. Realça-se também que em todas as formulações pode-se considerar também a presença de ZIB (barras de passagem).

5.2 Algoritmo Multi-Objetivo de AOP

Nesta secção descreve-se o algoritmo de otimização multi-objetivo de alocação de PMUs. Como anteriormente descrito, procura-se minimizar três funções-objetivo. A primeira função-objetivo visa minimizar os custos totais e as duas outras visam maximizar o grau de observabilidade através da minimização das medidas críticas e conjuntos críticos. Discute-se aqui, como se dá o mecanismo individual na minimização de cada função objetivo e, em seguida, a integração de todos estes mecanismos no VNS multi-objetivo.

A minimização da primeira função-objetivo, que se divide em minimizar custos de PMUs e de IC (cabos OPGW), é por si só um problema de otimização combinatória e relaciona-se, como se referiu na secção 4.2, ao problema do Conjunto Dominante Conexo Mínimo da teoria dos grafos. Em [Meghanathan 2015], mostrou-se que métricas como *Betweenness Centrality* e grau são eficientes na determinação de um CDCM, sendo que a *Betweenness Centrality* tem melhor desempenho. No trabalho de [Cruz et al. 2019] implementou-se com muito sucesso duas métricas da teoria dos grafos, a *dominância* e a *Betweenness Centrality*, na resolução do problema de construir um CDCM.

No entanto, o problema aqui proposto consiste em encontrar um CDC de custo mínimo, pois as arestas e vértices do grafo têm pesos diferentes (neste caso custos

diferentes) o que é um pouco diferente do conceito do termo "mínimo" do CDCM que visa minimizar globalmente a cardinalidade dos elementos (vértices e arestas) desse subgrafo. Assim, o modelo proposto terá como base o problema de construção de um CDCM, com ligeiras adaptações. Esta otimização foi muito bem implementada no trabalho de [Cruz et al. 2019] e será também aqui aproveitada.

Assim, a minimização dos custos totais consistirá em determinar um CDCM [Liu et al. 2016] em duas fases:

- 1ª fase: Determinar um conjunto dominante mínimo possível (alocação ótima de PMUs);
- 2ª fase: Conectar o conjunto dominante mínimo (construção da rede OPGW de comunicação das PMUs).

Prefere-se esta estratégia de duas fases por ser mais adequada à natureza do problema que pode exigir que o conjunto dominante atenda diferentes casos de requisitos de desempenho, como robustez do sistema de medição (perda de PMUs) e presença de ZIB. A segunda fase depende da primeira, ou seja, a determinação do conjunto dominante influencia no resultado final do conjunto dominante conexo. De forma a otimizar este processo, usa-se duas métricas, *Betweenness Centrality* e *Dominância*, de forma a determinar um conjunto dominante que resultará na minimização do conjunto dominante conexo. No problema concreto das redes elétricas, o processo de busca prioriza a escolha de PMUs que melhor resultem tanto na minimização de PMUs como distâncias da rede OPGW.

A *dominância* é um novo conceito de métrica de um grafo desenvolvido em [Cruz 2016] e que visa melhorar a minimização de PMUs na 1ª fase e tornar o algoritmo mais eficiente. Esta métrica explora o conceito do conjunto dominante mínimo e contribui para diminuir o número de PMUs necessários.

O problema de otimização combinatória apresentado assemelha-se ao problema de construir um CDCM (um problema NP-difícil); por isso é usado uma metaheurística na implementação do algoritmo. A metaheurística VNS apresentada no seção 4.6 é utilizada no processo de busca.

5.2.1 Implementação do Algoritmo VNS Multi-Objetivo

A seguir se apresenta o fluxograma do algoritmo de otimização multiobjetivo e se descreve o mesmo.

- a) Primeiramente, dado uma determinada rede elétrica, usa-se a teoria dos grafos para calcular a matriz de adjacência desta rede (ou grafo), as métricas de centralidade do grau, a *betweenness* e a *dominância* de cada barramento da rede.

- Introduz-se também os custos unitários das PMUs (que integra os roteadores, *switches*, PDC e outros componentes) e da fibra OPGW;
- b) Um PDC central é alocado num barramento-base - correspondente ao nó do grafo com maior valor de *betweenness* - e predefine-se uma rede de comunicação que liga este barramento com todos os outros. Um algoritmo - Dijkstra ou Suurballe Generalizado - é chamado para definir esta rede, consoante a restrição de construir-se uma rede de comunicação sem ou com resiliência;
 - c) *Solução Inicial*: usa-se um método guloso para construir uma primeira solução inicial através da análise da observabilidade topológica. Assim, escolhe-se 33% (este valor é citado em [Baldwin et al. 1993]) dos barramentos com maiores métrica de *dominância* para alocar PMUs. Aloca-se PMUs também em todos os barramentos adjacentes a barras terminais e, por fim, verifica-se quais barramentos ainda não são observados ou cobertos por PMUs e aloca-se unidades fasoriais ao mesmo. Para o caso de otimização com restrição de perda de PMUs, a solução inicial é mais simples e atribui-se PMUs em todos os barramentos;
 - d) Após a alocação das PMUs, usa-se os subgrafos de Dijkstra ou Suurballe definidos anteriormente e retira-se dos mesmos todos os nós (barramentos) que não são necessários para conectar as PMUs. Obtém-se outro subgrafo - é o conjunto dominante conexo mínimo. Este CDCM define as PMUs e distâncias da rede de comunicação. Com estes dados, computa-se os custos das PMUs e dos cabos. Por outro lado, chama-se o algoritmo de cálculo das *Cmeds* e *Conjs* e computa-se os indicadores (*PiO* e *PaC*) relacionados aos mesmos;
 - e) *Perturbação*: O ciclo de procura de outras soluções começa com a escolha aleatória de uma solução existente e de uma estrutura de vizinhança. Definem-se duas estruturas de vizinhança: (1) inserção de PMUs entre barramentos de maior *betweenness* e (2) *dominância*. Assim, escolhe-se uma solução existente e uma estrutura de vizinhança arbitrária e modifica-se a solução pela introdução de mais PMUs nos barramentos. A quantidade e locais dependem do parâmetro k da perturbação. Este passo não é determinístico mas probabilístico;
 - f) *Busca Local*: Faz-se uma ligeira adaptação neste processo ao introduzir-se uma rotina opcional de busca local no sentido de ampliar ainda mais o leque de soluções não-dominadas. A decisão de realizar-se ou não a busca local é decidida aleatoriamente. A busca local caracteriza-se por retirar nós do CD (retirar PMUs dos barramentos) que tenham métricas de valores mais baixos (*betweenness* ou *dominância*) e assegurando que a sua retirada resulte em uma solução viável (garantia de observabilidade). No caso de sistemas de medição resilientes (situações contingenciais de perda de PMU e falhas em ramos de cabos

de comunicação OPGW), deve-se garantir que a retirada de PMUs no processo de busca, só é confirmada se os barramentos que este observava continuam a ser cobertos por pelo menos duas outras PMUs e que o mesmo é observado por duas PMUs;

- g) Após a obtenção de cada nova solução - barramentos com PMUs - chama-se o subgrafo Dijkstra ou Suurballe (conforme o caso) para processar um novo subgrafo pela retirada de nós não necessários, como feito na solução inicial. Calculam-se os custos totais de PMUs e fibra, e indicadores de observabilidade;
- h) Com esta solução caracterizada, passa-se para a fase de avaliação, ou seja, se existe alguma solução no conjunto de soluções não-dominadas que domina esta nova solução. Basicamente, procura-se avaliar se existe uma solução não-dominada que apresente melhores valores nas três funções-objetivo da solução nova encontrada. Em caso negativo, aceita-se esta nova solução no conjunto de soluções não-dominadas, contribuindo para a definição da curva de Pareto. Em caso positivo, reinicia-se o processo de perturbação com um parâmetro k maior. Este processo se repete até atingir um critério de parada.

Estes são os fundamentos do funcionamento do algoritmo multi-objetivo em condições normais (situações contingenciais sem perda de PMUs). Quando há presença de ZIB (barras de passagem) o algoritmo usa, também na alocação de PMUs, as regras 4-6 vista na seção 2.

O algoritmo MOVNS, com as suas adaptações para os diferentes requisitos, usa a *dominância* tanto na solução inicial como na perturbação e, a combinação *dominância-betweenness* na busca local.

5.2.2 Exemplo da Implementação da Metodologia na rede IEEE-14

Nesta subsecção mostra-se o funcionamento do algoritmo na otimização de um sistema de medição com PMUs, em condições normais e sem presença de barras de passagem no sistema IEEE de 14 barras (ver Fig. 19).

(1): Das características desta rede se extrai as suas métricas em grafo conforme mostra a Tabela 2:

Tabela 2 – Métricas da Rede IEEE-14 extraídas da Figura 19

Nós da rede	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Grau	2	4	2	5	4	4	3	1	4	2	2	2	3	2
dominância	-2,0	0,8	-2,5	1,6	0,3	1,3	-0,3	-2,0	1,0	-1,0	-1,0	-1,5	0,3	-1,5
betweenness	0	1,2	0	1,0	0,7	0,7	0,9	0	0,5	0	0	0	0,1	0,1

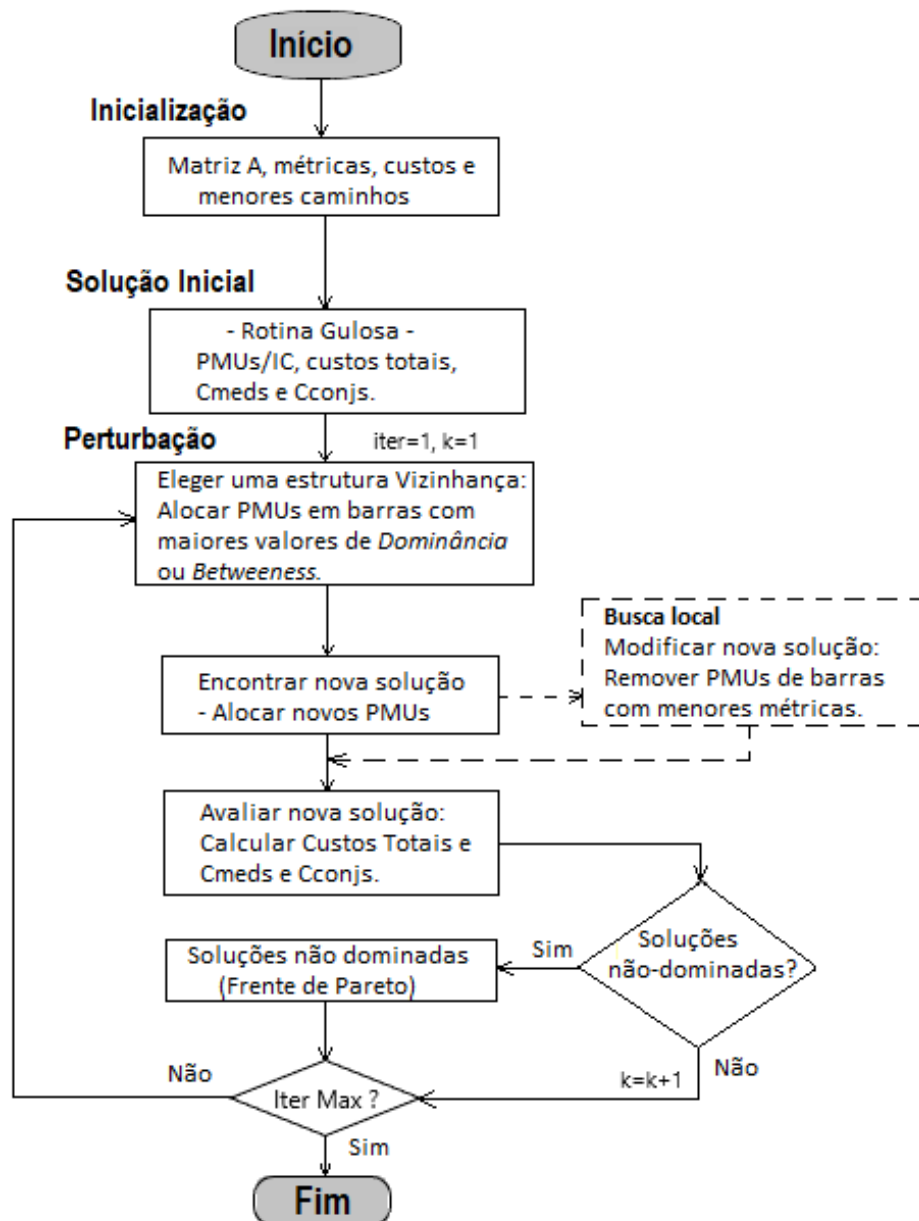


Figura 18 – Fluxograma do algoritmo VNS Multi-Objetivo

Muitos trabalhos anteriores citam custos unitários para PMUs, canais adicionais de PMUs, PDCs, filtros e roteadores, os quais consideram nas simulações para obter custos totais na alocação de PMUs. Em [Almasabi e Mitra 2018] considera-se custos unitários de \$40.000 para PMUs, \$2.380 de custos adicionais para instalação de transformadores de corrente e potência (se necessário), \$7,500 por cada PDC e \$2.414 por cada milha de cabo de fibra ótica. No trabalho de [Chatterjee 2021], o custo total da instalação de uma única PMU foi valorada em \$43.000, o hardware da PMU em \$2.170, o custo de canal adicional em \$217 e o PDC em \$8.000.

Estes trabalhos contudo, citam o relatório do Departamento de Energia Americano [Energy e Reliability 2014] que financiou a instalação de PMUs a nove operado-

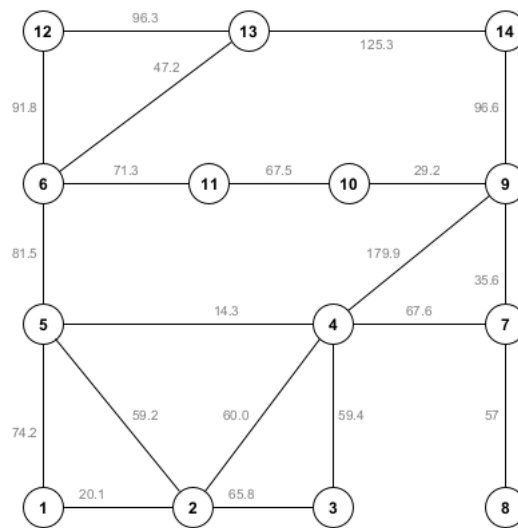


Figura 19 – Rede de Transmissão IEEE-14 e distâncias entre nós

res de redes elétricas. Analisando-se este relatório, entende-se que as realidades e necessidades específicas de cada operador afetam muito os custos de instalação de sistemas de monitoramento baseado em sincrofasores. Dentre os operadores beneficiados, o projeto aprovado para o operador ATC (American Transmission Company) é muito orientador quanto ao contexto deste trabalho. O operador ATC apresenta um custo total por unidade de PMU próximo de outros seis operadores e tem a particularidade de ter-se beneficiado de outro financiamento para a instalação de cabos de fibra ótica para suportar a transmissão de dados entre PMUs.

Assim, considera-se esta estrutura de custos bem realista neste trabalho de tese, que reflete a arquitetura de comunicação das PMUs e PDCs, com todos os equipamentos adicionais necessários, tais como roteadores, filtros, transformadores de corrente e tensão exigidos, aplicativos necessários, mão de obra de instalação, entre outros. O custo total de uma unidade PMU e que integra todos estes equipamentos e aspectos é de \$54.319. O cabo de fibra ótica vale \$4.930/km, de acordo com o projeto [Energy e Reliability 2013].

Pré-definição de Menores Caminhos O algoritmo chama uma rotina (Dijkstra ou Suurballe) para definir os menores caminhos sobre o qual se definirá a rede de comunicação. No caso de ser a rotina Dijkstra, define-se então um subgrafo (árvore) da rede original como se pode ver na Figura 20. Estes menores caminhos são calculados a partir do vértice com maior *Betweenness*, o vértice 4.

Solução Inicial

(2): Escolher 33% dos nós com maior *dominância* e alocar PMU: {2, 4, 6, 9}.

(3): Analisar os nós vizinhos aos nós terminais e alocar PMU: {7}.

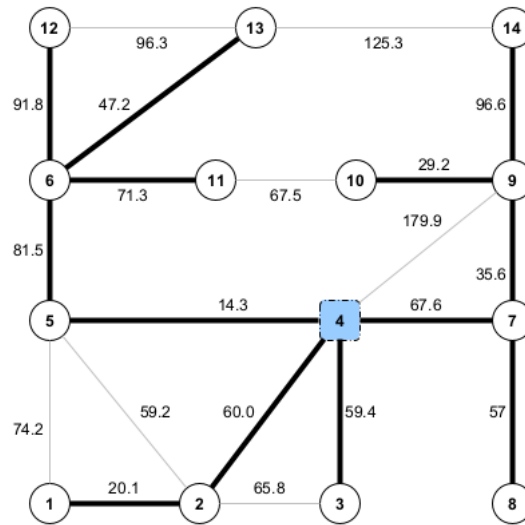


Figura 20 – Subgrafo definido pela rotina Dijkstra (enraizado em 4)

(4): Verificar se topologicamente esta é uma solução válida. Neste caso é observável topologicamente!

Os vértices $\{2, 4, 6, 7, 9\}$ definem um conjunto dominante (Figura 21), ou seja, são as barras onde se alocam PMUs.

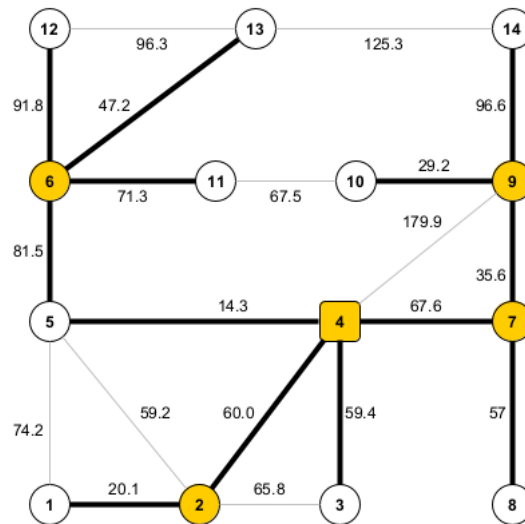


Figura 21 – Solução inicial: alocação de PMUs (vértices em amarelo)

(5) Definidas as PMUs e a rede de menores caminhos (subgrafo definido por Dijkstra), analisa-se que nós do subgrafo podem ser removidos sem comprometer a conexão das PMUs. Desta operação, define-se o CDCM que se traduz na definição das PMUs e a rede de comunicação mínima (259.03 Km) entre elas (Figura 22). Calcula-se os custos totais desta solução considerando-se o custo unitário de uma PMU de 54.319 USD e custo de cabo OPGW de 4.930 USD/km.

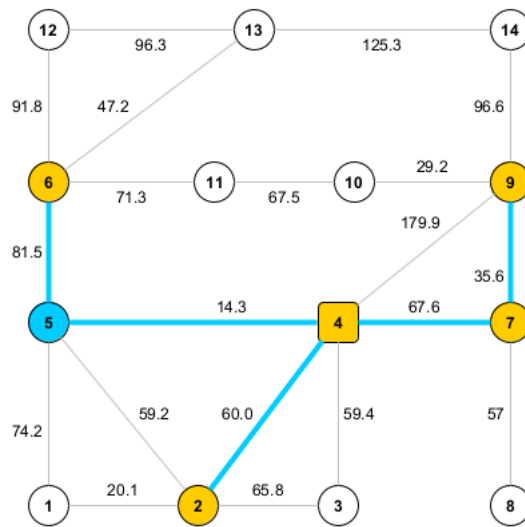


Figura 22 – Solução inicial: PMUs e rede de comunicação

(6) Para finalizar a caracterização da solução inicial, roda-se o algoritmo para o cômputo das C_{meds} e C_{conjs} , obtendo-se respectivamente 7 e 2. O número de medidas para este caso de 5 PMUs é 25. Os indicadores PiO e PaC são obtidos pela divisão das medidas críticas pelo número de medidas.

Tabela 3 – Solução Inicial - resultados

Solução	NrPMUs	$\$(\times 10^6)$	Cmeds	Cconjs	PiO	PaC
Solução Inicial	5	1.54	7	2	28%	8%

Busca de Novas soluções

(7) A Perturbação é feita pela introdução de novos elementos no CD, i. e., alocando novos PMUs nos barramentos. A seleção dos vértices a escolher é probabilístico mas priorizando nós com maiores valores das métricas *Dominância* ou *Betweenness*, de forma alternada a cada iteração. O número destes novos elementos depende proporcionalmente do parâmetro k . Neste caso, seleciona-se aleatoriamente os elementos entre os que tem maior *Betweenness* - o vértice 5 e 10 são selecionados. À rede de comunicação é adicionada o ramo 9-10 para ligar o novo PMU 10 (Figura 23) . Os custos totais são atualizados e os C_{meds} e $Conjs$ são calculados novamente. O número de medidas com estes 6 PMUs totaliza 33. Os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Solução Inicial e Perturbação - resultados

Solução	NrPMUs	$\$(\times 10^6)$	Cmeds	Cconjs	PiO	PaC
Solução Inicial	5	1.54	7	2	28%	8%
Perturbação	7	1.80	4	3	12.1%	9.1 %

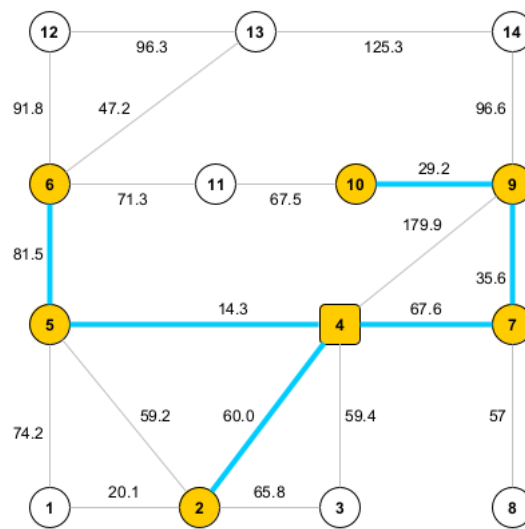


Figura 23 – Perturbação - Obtenção de Nova Solução

Como esta solução não é dominada pela primeira, pois apresenta um dos objetivos C_{meds} menor que a solução inicial, ela fica registada como uma das soluções de Pareto. Este processo continua até um critério de parada, obtendo-se várias soluções não dominadas de Pareto.

5.3 Conclusão

Este capítulo formulou o problema de Alocação Multi-Objetivo de PMUs numa rede elétrica e propôs um algoritmo VNS multi-objetivo para a sua resolução. O algoritmo usa conceitos de grafos na implementação de procedimentos eficientes no processo de busca de soluções não-dominadas e assim construir a curva de Pareto das soluções. O algoritmo é construído de forma a adaptar-se a várias condições e restrições. No próximo capítulo, simula-se este algoritmo em redes elétricas conhecidas.

6

Simulação e Resultados

Neste capítulo, apresentam-se várias simulações do algoritmo multi-objetivo em redes elétricas conhecidas, como as redes IEEE, na presença de várias condições e restrições. Adicionalmente, mostra-se a sua grande escalabilidade em redes maiores como o IEEE 300 barras e as de grandes dimensões como a rede polonesa de 2383 barras e a rede brasileira de 5771 barras.

Os custos unitários de alguns parâmetros são àqueles citados no capítulo anterior. As simulações foram realizadas num computador com processador *Intel Pentium Dual CPU E2220 2.4 GHz* e memória de 4 GB e nas simulações de sistemas de grande porte foi usado um computador mais potente com processador *Common KVM 2.5 GHz* e memória de 92.7 GB.

Os resultados são apresentados em gráficos, onde se mostram em cada caso, o conjunto das soluções não-dominadas ou as soluções ótimas de Pareto.

6.1 Simulações em redes IEEE

6.1.1 A Rede IEEE-14

O algoritmo foi simulado na rede IEEE-14 barras e os resultados são mostrados na Tabela 5, onde se listam várias soluções ótimas de Pareto em condições normais e sem presença de ZIB. Na segunda coluna, enumeram-se o número de PMUs alocadas e o total de medidas obtidas com estas PMUs. A terceira coluna lista os investimentos em milhões de USD necessários para cada um dos planos de medição encontrados. O investimento considera os custos com PMUs, os diversos equipamentos necessários para a transmissão de dados (PDCs, *routers* e aplicativos) e a infraestrutura de fibra ótica necessária. Na quarta e quinta colunas, mostram-se os indicadores calculados e as respectivas medidas críticas e conjuntos críticos (entre parêntesis).

Por exemplo: na primeira linha, com 5 PMUs alocadas nos barramentos {4, 5, 6, 7, 9}, consegue-se 25 medidas, nos quais oito são medidas críticas e quatro pertencem a conjuntos críticos. Neste plano de medição, se ocorrer uma perda de uma das 25 medidas, a probabilidade de se perder a observabilidade do sistema é 32% (8/25) e a probabilidade de ver aumentado as medidas críticas é de 4%. Se deste investimento de 1,25 milhões se passar para um plano de investimento de 2,49 milhões (plano de medida nr. 8), pode-se obter mais garantia contra falhas, ou seja, a probabilidade

Tabela 5 – Rede IEEE14: Otimização Multi-objetivo de PMUs

Sol.	Nr. PMU /med.	USD (x10 ⁶)	PiO (Cmed)	PaC (Cconj)	PMUs
1	5/25	1,25	32%(8)	4%(1)	4 5 6 7 9
2	6/28	1,45	21,4%(6)	7,1%(2)	4 5 6 7 9 10
3	7/33	1,80	12,1%(4)	9,1%(3)	2 4 5 6 7 9 10
4	7/34	1,89	8,8%(3)	11,8%(4)	2 4 5 6 7 9 13
5	8/36	2,20	11,1%(4)	5,6%(2)	2 4 5 6 7 9 10 11
6	8/37	2,30	2,7%(1)	13,5%(5)	2 4 5 6 7 9 11 13
7	9/38	2,48	7,9%(3)	5,3%(2)	2 4 5 6 7 8 9 10 11
8	9/40	2,49	2,5%(1)	10%(4)	2 4 5 6 7 9 10 11 13
9	9/39	2,58	0%(0)	12,8%(5)	2 4 5 6 7 8 9 11 13
10	10/42	2,77	0%(0)	9,5%(4)	2 4 5 6 7 8 9 10 11 13
11	11/45	3,28	0%(0)	6,7%(3)	2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
12	12/48	3,43	0%(0)	4,2%(2)	1 2 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13
13	12/49	3,50	2,0%(1)	2%(1)	1 2 3 4 5 6 7 9 10 11 12 13

do sistema ficar inobservável com a perda de uma medida é de 2,5%, embora a probabilidade de ocorrer aumento de medidas críticas (só há uma medida crítica) seja de 10%. Considera-se que medidas críticas sejam mais graves que conjuntos críticos. Para além disso, mesmo que não se percam medidas, no plano oitavo, há mais garantia em obter-se uma boa estimacão de estado, pois só em uma medida crítica e quatro medidas pertencentes a conjuntos críticos não seria possível ao EE corrigir erros grosseiros.

Todas as treze soluções são não-dominadas e por isso pertencem a uma curva ou superfície de Pareto de soluções não-dominadas. A Figura 24 ilustra uma superfície côncava ajustada aos treze pontos.

Para uma melhor visualização, mostra-se também a curva de Pareto em duas variáveis (custo x PiO), com os pontos sendo discriminados por cores na variável PaC (Cconjs). Pode parecer que há soluções que dominam outras mas não é o caso. Por exemplo, ao analisar os dois pontos destacados no retângulo, constata-se que o ponto alaranjado (solução #4) representa uma solução que tem menor medidas críticas e menor custo que a solução azulada (solução #5) mas esta segunda apresenta menor indicador PaC entre os dois.

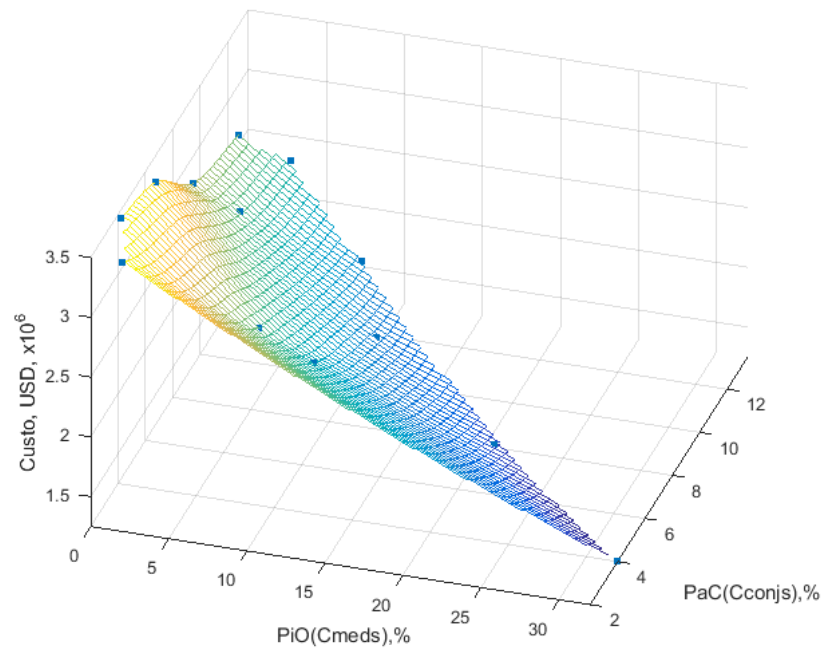


Figura 24 – Superfície de Pareto - Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE14

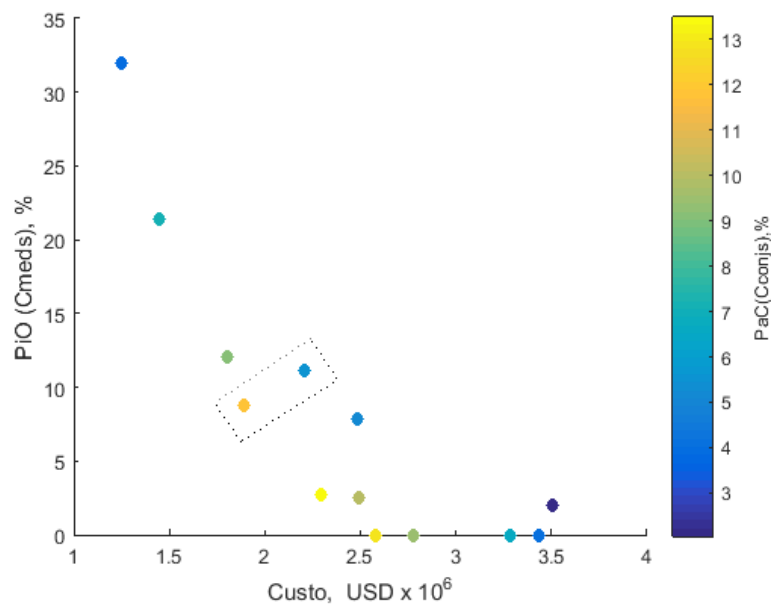


Figura 25 – Curva de Pareto - Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE14

6.1.2 A Rede IEEE-118

6.1.2.1 Simulação considerando redes de fibra sem resiliência

Nesta subseção, executam-se as simulações construindo a rede de comunicação em fibra ótica entre PMUs sem proteção contra falhas. A rede de fibra tem uma estrutura em árvore, ou seja, uma distância total mínima possível. O algoritmo Dijkstra é

usado nesta simulação para encontrar os menores caminhos para construção desta rede. Não há portanto resiliência a falhas nos ramos de fibra ótica que comunicam das PMUs para o o PDC central ou centro de controle.

Outra simulação do algoritmo foi realizada sobre a rede IEEE-118 barras, considerando-se barras de passagem (ZIB) os barramentos $\{5,9,30,37,38,63,64,68,71,81\}$. A Figura 26 mostra os resultados, em condições normais (sem perda de PMU) e a construção de uma rede de fibra em estrutura de árvore (sem resiliência a falhas). O primeiro gráfico (de cima) ilustra 243 soluções não-dominadas encontradas, caracterizadas pelo custo de investimento e os indicadores PiO e PaC . Constata-se que quanto mais investimento se faz mais robusto é o plano de medições, i. e., menos $Cmeds$ e $Cconjs$ tem-se nas medidas coletadas pelas PMUs e mais confiável e factível é a EE. O gráfico mostra um cotovelo interessante, o que realça que aumentar o investimento até cerca dos 15 milhões de unidades monetárias consegue-se uma boa redução das $Cmeds$ no plano de medições. Mesmo neste ponto ou área, pode-se escolher uma solução com um $PiO(Cconjs)$ mais favorável. Acima dos 15 milhões de USD, o benefício não é muito acentuado face ao esforço financeiro feito, ou seja, a partir deste ponto, a reta imaginária é pouco inclinada.

No segundo gráfico (de baixo), mostra-se a relação das medidas críticas, conjuntos críticos e quantidade de PMUs (em percentagem do máximo possível - 118 neste caso) para cada uma das 245 soluções. Quanto mais PMUs instalados, menos $Cmeds$ e $Cconjs$ se encontram nas medidas. Também verifica-se que à medida que a quantidade de PMUs aumentam, as $Cmeds$ diminuem mas as $Cconjs$ aumentam, até uma certa quantidade de PMUs, a partir do qual, as $Cconjs$ passam tendencialmente a diminuir com as $Cmeds$.

Uma característica relevante do algoritmo com base no VNS é a flexibilidade de poder ajustar o parâmetro Δk e assim conseguir mais ou menos quantidade de soluções não-dominadas. O parâmetro Δk é quem define a amplitude da perturbação e da busca local. Quanto maior é este valor, maior será o incremento no valor k , ou seja, mais distante é a nova vizinhança para busca de novas soluções pelo VNS. Na Figura 27 compara-se três simulações feitas sobre a rede IEEE-118, onde se ilustra que simulações feitas com diferentes parâmetro Δk resultam em curvas de Pareto com mais ou menos soluções. Contudo, a forma das curvas não mudam, o que é uma garantia da manutenção da eficiência do algoritmo na obtenção da curva de Pareto.

Na Tabela 6 mostra-se uma lista mais extensa de simulações feitas para diferentes Δk e os resultados obtidos. Comprova-se em geral, quanto maior é o Δk menos soluções são encontradas. Mas deve-se sublinhar que o tempo computacional desce também consideravelmente. As duas últimas colunas mostram as soluções mais extremas em termos de custo e os respectivos indicadores PiO e PaC . Contudo, em todas as

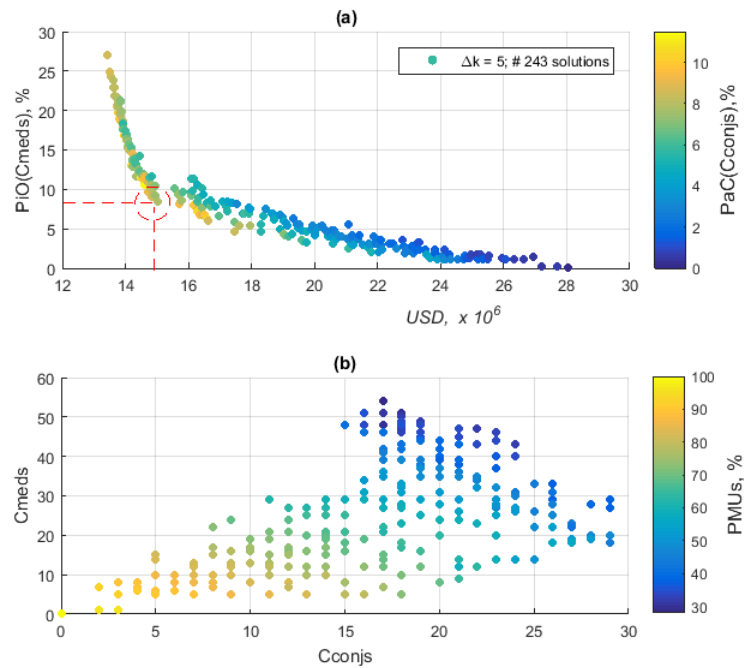


Figura 26 – Curva de Pareto - Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE118. (a) indicadores versus custo total, (b) indicadores (valores absolutos) versus % de barramentos com PMUs instalados

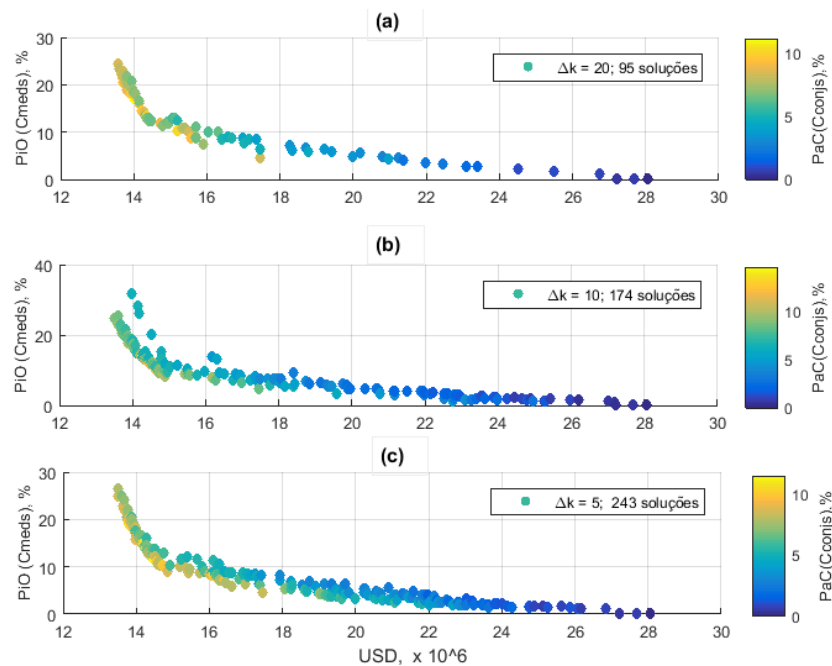


Figura 27 – Otimização Multi-Objetivo de PMUs na Rede IEEE118 - Comparação de várias simulações com valores de parâmetro diferente

simulações, estes pontos extremos são bem similares ou mesmo iguais, o que confirma que estas simulações, embora com densidade de soluções diferentes, conseguem varrer a mesma amplitude de valores das funções-objetivo.

Em suma, o que se depreende é que o algoritmo tem a a flexibilidade de realizar

uma busca por soluções mais exaustiva (e com mais esforço computacional) ou uma busca com menos esforço computacional e por consequência menos soluções. Esta propriedade do algoritmo é muito útil no ajuste de parâmetros para simulações em grandes redes. Devido ao carácter combinatório do problema, o conjunto de soluções não-dominadas possíveis pode ser muito grande e assim exigir um tempo computacional impraticável em buscas mais refinadas de soluções. A escolha de um valor Δk adequado nestas situações traduz-se num compromisso entre um esforço computacional aceitável e a obtenção de uma quantidade de soluções adequada.

Tabela 6 – Rede IEEE14: Comparação entre simulações com diferentes Δk

Sol.	Δk	Nr. Soluções	Sol. Mais custosa	Sol. Mais econômica
1	5	245	(28,1;0%;0%)	(13,5;24,9%;8,8%)
2	10	133	(28,1;0%;0%)	(13,5;24,9%;8,8%)
3	15	122	(28,1;0%;0%)	(13,5;24,9%;8,8%)
4	20	99	(28,1;0%;0%)	(13,6;24,9%;8,8%)
5	25	81	(28,1;0%;0%)	(13,0;24,9%;8,8%)
6	30	56	(28,1;0%;0%)	(13,6;27%;8,5%)

6.1.2.2 Simulação considerando resiliência na rede de fibra

Diferente da outra seção, as soluções encontradas constroem uma rede mais densa e com mais conexões, conferindo uma robustez "m-1" contra falhas nos cabos OPGW. O algoritmo Suurballe é chamado nas simulações para construir esta rede resiliente, o qual caracteriza-se por ter uma configuração em que dois caminhos de fibra ligam cada barramento com PMU e o PDC central.

Na Figura 28, 194 soluções são encontradas na simulação da rede IEEE-118 barras para uma rede de comunicação resiliente a falhas. Como era previsível, o custo de investimento destas soluções é bem maior comparado com o caso de exigência de redes de comunicação mais simples ou sem resiliência. Neste caso, a solução mais econômica começa em torno de 28 milhões de dólares, cerca de 50% acima das soluções mais econômicas com rede OPGW sem resiliência.

6.1.3 Simulações na rede IEEE-300

A rede IEEE-300 barras foi usada para validar o algoritmo. Esta rede, representada na Figura 29 é menos conectada que a rede IEEE-118 barras e com mais barras terminais.

No primeiro gráfico da Figura 30 mostra-se os resultados da curva de Pareto para soluções de um plano de medidas com uma rede de comunicação sem resiliência.

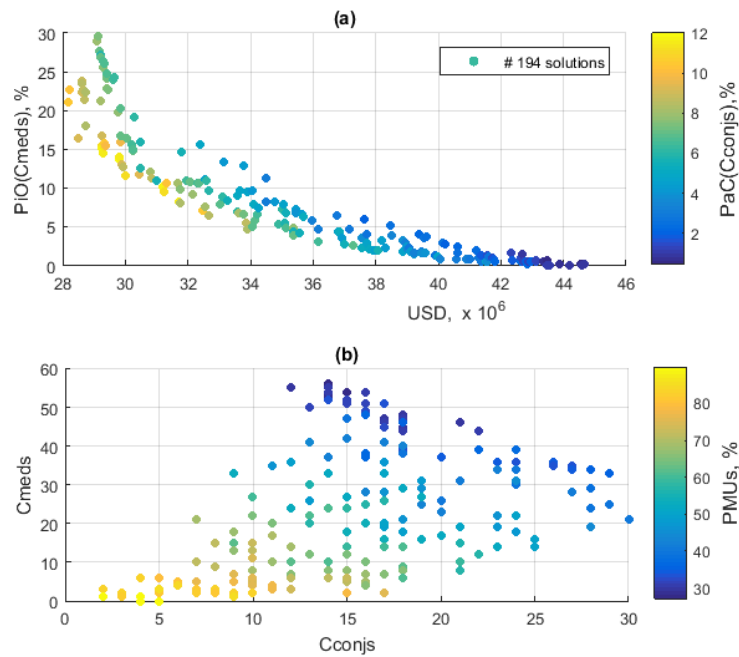


Figura 28 – Simulação na Rede IEEE118 - soluções com rede de comunicação resiliente. (a) indicadores versus custo total, (b) indicadores (valores absolutos) versus % de barramentos com PMUs instalados

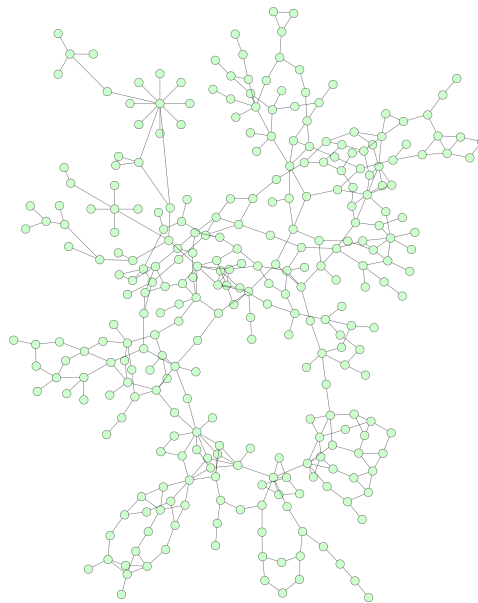


Figura 29 – Representação da Rede IEEE 300 barras

Comprova-se novamente que pode-se conseguir um custo-benefício muito bom, com uma escolha adequada no plano de medições. Por exemplo, com 50 milhões de USD consegue-se vários planos de medição com benefícios muito diferentes no nível de robustez da observabilidade e do sucesso da EE. Também pode-se ter uma boa redução nas medidas críticas e conjuntos críticos até 90 milhões de dólares de investimento. Investir para além deste limite não é recomendado pelo magro benefício obtido.

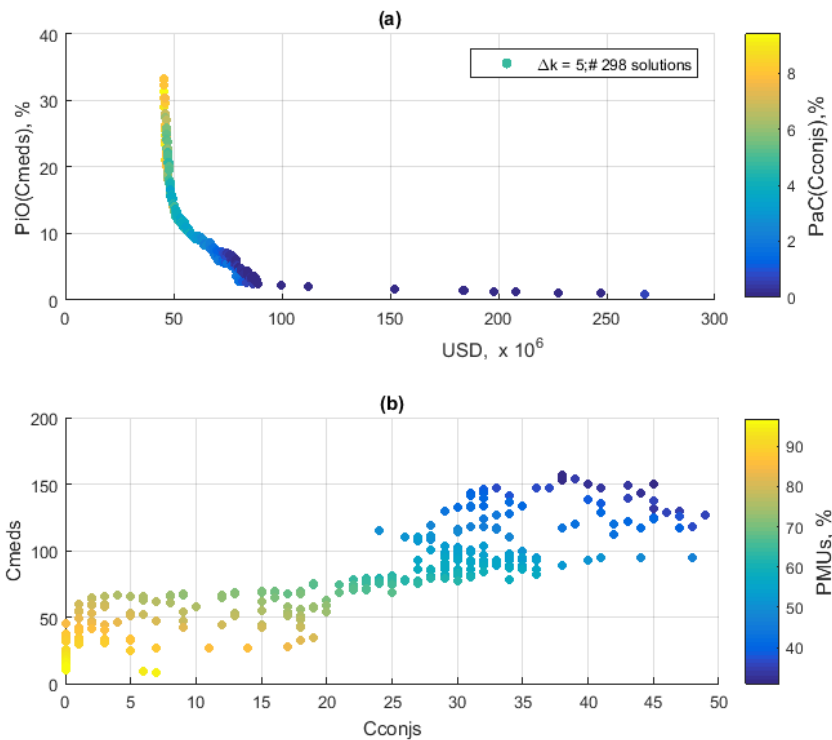


Figura 30 – Rede IEEE300 - Soluções de Pareto com Rede OPGW sem resiliência. (a) indicadores versus custo total, (b) indicadores (valores absolutos) versus % de barramentos com PMUs instalados

Numa outra perspectiva desta mesma simulação será a análise do peso dos custos de PMU em relação aos custos totais. A Figura 31 responde precisamente esta questão e comprova que os custos com a infraestrutura de comunicação (concretamente os cabos OPGW) representam mais de 85% dos custos totais, em média. Contudo, se se considerar individualmente as soluções que possuem mais de 90% dos barramentos com PMUs, os custos com PMU são inferiores aos 15% podendo atingir os 6% dos custos totais. Isto se deve ao facto dos custos da rede de comunicação crescerem muito mais que os custos com PMUs ao se ultrapassar mais os 90% de barramentos com PMUs. Ou seja, conectar com cabos OPGW os últimos barramentos, os quais são provavelmente barramentos terminais, especialmente se forem ramos compridos, pode acarretar custos incrementais exponenciais. É por isso que pode-se optar por infraestruturas de comunicação com base em satélites quando se quer transferir dados de barramentos terminais com ramos muito extensos [Company 2010].

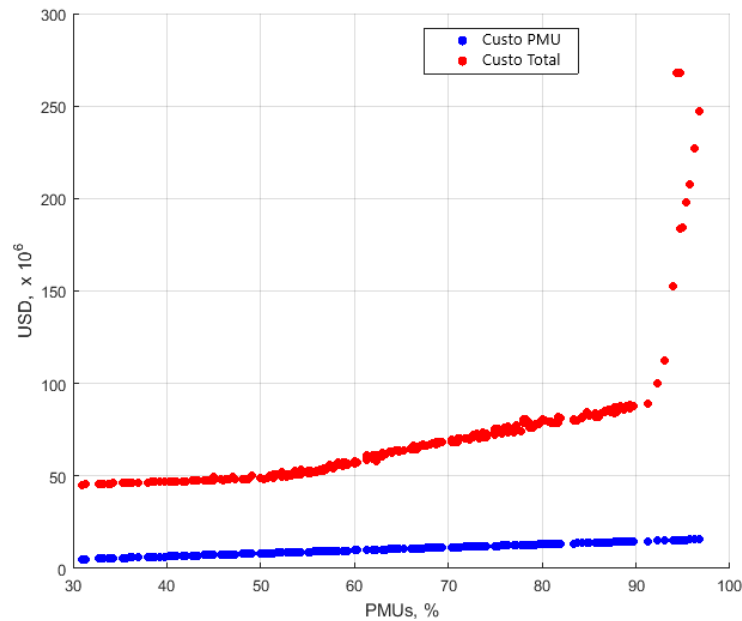


Figura 31 – Frente de Pareto - peso de custos PMU nos custos totais, IEEE-300

6.2 Sistemas de Medição Super-Resilientes

Nesta seção apresentam-se soluções de Sistemas de Medição Super-Resilientes. Estes são entendidos como aqueles que apresentam uma robustez dual, ou seja, simultaneamente na perda de PMUs e na falha de ramos de cabos OPGW, embora tenham sido vistos individualmente na seção anterior.

Serão considerados simulações na rede IEEE-300 e duas redes de grandes dimensões, a rede polonesa de 2383 barramentos (Polish-2383) e a rede brasileira com 5771 subestações (BR-5771). O esforço computacional, como é expectável, é muito grande, uma vez que avaliar uma solução encontrada quanto aos C_{meds} e C_{conj} s envolve a computação de inversão de matrizes bem grandes. Para estes casos, e como se tinha mencionado anteriormente, o parâmetro Δk será ajustado para um valor maior, de forma a limitar a granulometria de soluções e manter o esforço computacional em um nível razoável. Duas simulações são realizadas para cada uma destas redes, considerando soluções com redes de comunicação com e sem resiliência, como foi considerado nas outras redes.

A rede Polish-2383 é uma rede DE transmissão de potência de 2383 barramentos e usado na literatura para validação de algoritmos de AOP. Na Figura 32 pode-se ver uma representação da mesma.

A rede transmissão brasileira é uma rede muito extensa que se estende por 145.000 km e que se caracteriza por operar linhas em tensão elétrica superior a 230 mil Volts. Na Figura 33 pode-se ver uma representação da mesma.

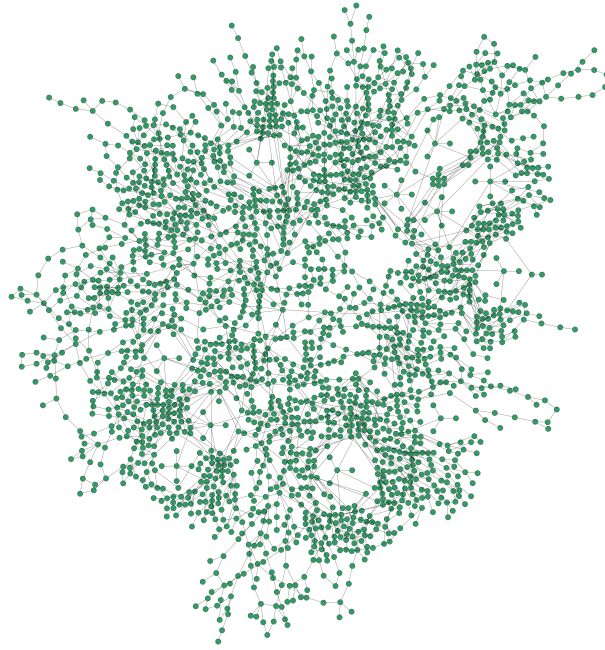


Figura 32 – Representação da Rede polish-2383



Figura 33 – Sistema Brasileiro de Transmissão

Para a simulação considerou-se 5771 barramentos deste sistema, numa extensão total de 116.000 km [(EPE)]. Na Figura 34 mostra-se uma representação esquemática da conexão destes barramentos.

A Figura 35 apresenta as soluções não dominadas de sistema de medição robusto

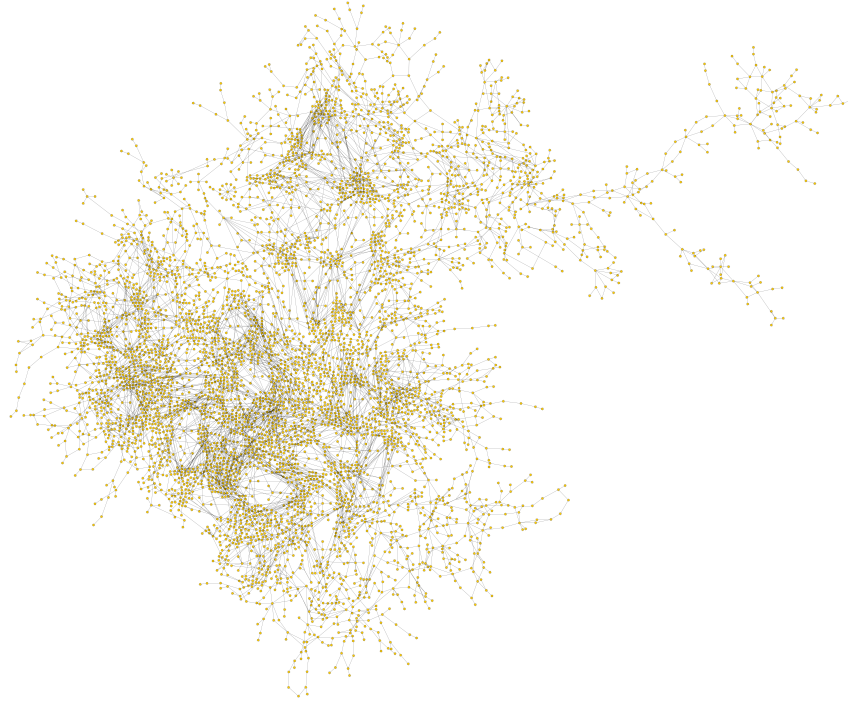


Figura 34 – Representação da Rede Brasileira com 5771 barramentos

para os três grandes sistemas. Cada solução em cada caso não apresenta qualquer medida crítica, poucos *Cconjs* (refletido no baixo indicador *PaC*) e uma rede de transmissão de dados PMU bem conectada e resiliente a falhas em ramos do cabo OPGW. Pode notar-se que a dotação mínima de PMU necessária é de cerca de 70% ou superior (BR-5771 tem mais ramos terminais e longos) a fim de evitar qualquer presença de *Cmeds*. Mas os elevados valores de investimento devem-se ao custo da rede de comunicação, que na rede IEEE-300 representa 95,7% do custo total, contra 85% que tinha no cenário em que não era exigida resiliência. No entanto, estes valores dependem da particularidade de cada rede e das distâncias envolvidas.

Tabela 7 – Peso das PMUs no Custo Total (redes de comunicação com resiliência)

Rede	dist(km)	km/barras	\$PMU,%
IEEE-300	71855	239,5	4,2
Pol-2383	103701	43,5	20,4
BR-5771	116000	20,1	44,7

Algumas redes apresentam um peso das PMUs no custo total maior que noutras, como se constata na tabela 7. Isto deve-se à particularidade das redes, sendo que umas são mais conexas que outras e as distâncias envolvidas são diferentes. Em princípio, quanto maior a distância entre os barramentos mais longos são os cabos OPGW para conectar as PMUs. A rede IEEE-300 é o que apresenta em média ramos mais longos e por isso também apresenta o maior peso de custos de comunicação (menor peso de custos de PMUs) no custo total face à rede polonesa ou brasileira.

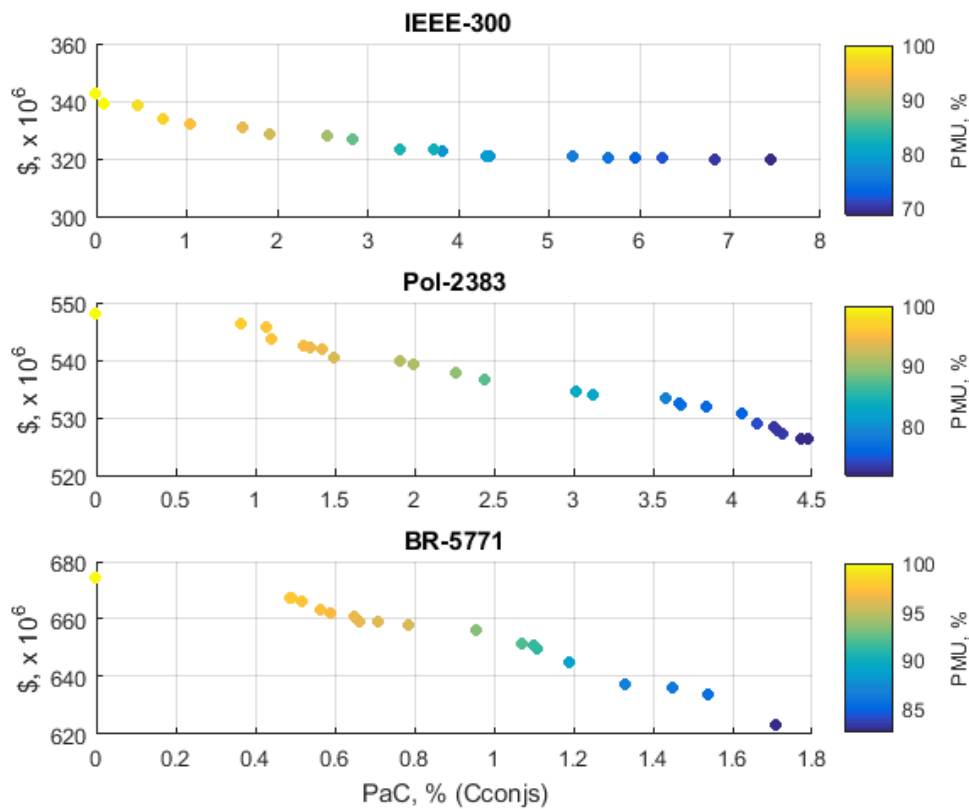


Figura 35 – Curva de Pareto - Sistemas Super-Resilientes. Simulação em três sistemas diferentes

Na rede brasileira, o custo das PMUs é muito expressivo (44,7%) pois as distâncias médias são bem menores que as outras redes.

6.3 Análise dos Resultados

Os resultados mostram que o algoritmo foi bem sucedido na capacidade de gerar em cada caso simulado, um conjunto de soluções não dominadas suficientes para gerar a curva de Pareto, mesmo em redes muito pequenas como o IEEE de 14 barras. Como era de se esperar, quando a rede é maior, o conjunto das soluções aumenta também, embora não linearmente devido à configuração diferente de cada rede no que tange à sua conectividade. O algoritmo mostrou a sua relevância, pois com um mesmo valor de investimento pode-se obter ganhos diferentes (mais robustez nas medidas), consoante a alocação de PMUs. As diferentes simulações também mostram uma certa similaridade nos gráficos obtidos, i. e., uma correlação mais forte no início entre o investimento e os indicadores (principalmente o PiO) e uma flexão na curva a partir de um certo ponto, traduzida numa inclinação da curva de pontos. Finalmente constatou-se que os custos diretos com PMUs tem um peso menor no custo total, sendo o maior peso atribuído à rede de cabos OPGW que fazem a comunicação das

PMUs.

7

Conclusão

Neste trabalho introduziu-se um novo algoritmo de otimização multi-objetivo de alocação de PMUs em redes de transmissão de potência. A busca de um bom plano de medição para um Sistema de Transmissão depende das necessidades operacionais e do contexto econômico e financeiro da entidade que opera o Sistema de Gerenciamento de Energia. É neste sentido que o algoritmo proposto produziu não uma solução mas um conjunto de soluções não-dominadas (curva de Pareto), possibilitando desta forma ao planejador do sistema de medição a possibilidade de escolher a melhor solução que melhor se ajusta à sua realidade.

No processo de busca do algoritmo, os objetivos estabelecidos são a minimização de custos totais e a maximização da robustez de medidas. Os custos totais se caracterizam pelos custos das PMUs, equipamentos necessários e também os custos da infraestrutura física de instalação dos cabos OPGW de comunicação de dados. Relativamente à rede de comunicação, o algoritmo apresenta soluções sem e com resiliência na infraestrutura de comunicação. Quanto ao grau de robustez do plano de medidas este está relacionado à maior ou menor probabilidade do sucesso no processo de Estimativa de Estado. Para isso, usa-se a análise numérica da observabilidade e computam-se indicadores que caracterizam este grau de robustez, os quais são usados no processo de busca de soluções diversas.

Esta estratégia de apresentar soluções de uma curva de Pareto, considerando custos totais e indicadores de observabilidade numérica nunca foi implementada na literatura e mostra-se muito relevante para futuros desenvolvimentos de pesquisa.

Simulações são implementadas em várias redes, pequenas e grandes, os quais revelam um comportamento típico no conjunto das soluções. Até um certo nível de investimento financeiro, os ganhos na robustez do plano de medidas obtido são mais pronunciados. A partir de um certo montante os benefícios obtidos não são tão encorajadores do investimento. Por outro lado, com um mesmo investimento pode-se obter soluções diferentes, em termos de medidas e conjuntos críticos, o que mostra a relevância do algoritmo na disposição de soluções não-dominadas.

Outra particularidade é o maior peso que os custos das infraestruturas de comunicação (cabos OPGW) têm em comparação aos custos de PMUs e seus acessórios. Algumas redes, os custos com PMUs não ultrapassam os 20%, sendo o maior valor de 47,5% (rede brasileira). No entanto, no caso de se exigir resiliência na rede de comunicação,

os custos de investimento são ainda mais elevados, e a contribuição da infraestrutura de comunicação no custo total pode ultrapassar os 84%.

Apesar do esforço computacional, o algoritmo mostrou a sua flexibilidade em ajustar alguns parâmetros da metaheurística na simulação em redes maiores, mantendo o tempo computacional dentro de limites razoáveis e preservando a qualidade das soluções da curva de Pareto.

Neste quesito, um dos trabalhos futuros será o uso da análise topológica da rede na identificação posicional de medidas e conjuntos críticos de forma a melhorar o processo de busca com menos esforço computacional. Desta forma, o conjunto de soluções encontradas em redes de grandes dimensões será maior. Outro campo de pesquisa futura será o estudo de outras soluções tecnológicas de comunicação de forma a diminuir os custos totais, uma vez que estes são bem expressivos nos sistemas de supervisão. Também, pretende-se no futuro integrar os dois indicadores num só, de forma a traduzir melhor os riscos de observabilidade. Por último, a simulação da alocação de PMUs em redes com sistema convencionais pré-existentes é outra possibilidade.

Referências

- Abdelkhalek et al. 2015 ABDELKHALEK, O.; MASRI, H.; KRICHEN, S. An adaptive variable neighborhood search for solving the multi-objective node placement problem. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**, Elsevier, v. 47, p. 189–196, 2015. Citado na página 44.
- Ahmed e Imran 2019 AHMED, M. M.; IMRAN, K. An optimal pmu placement against n-1 contingency of pmu using integer linear programming approach. In: IEEE. **2019 International Conference on Applied and Engineering Mathematics (ICAEM)**. [S.l.], 2019. p. 127–132. Citado na página 7.
- Alhelou et al. 2020 ALHELOU, H. H.; ABDELAZIZ, A. Y.; SIANO, P. **Wide area power systems stability, protection, and security**. [S.l.]: Springer, 2020. Citado na página 21.
- Alhelou et al. 2018 ALHELOU, H. H.; HAMEDANI-GOLSHAN, M.-E.; ZAMANI, R.; HEYDARIAN-FORUSHANI, E.; SIANO, P. Challenges and opportunities of load frequency control in conventional, modern and future smart power systems: a comprehensive review. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 10, p. 2497, 2018. Citado na página 21.
- Almasabi e Mitra 2018 ALMASABI, S.; MITRA, J. Multistage optimal pmu placement considering substation infrastructure. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IEEE, v. 54, n. 6, p. 6519–6528, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 55.
- Almasabi e Mitra 2019 ALMASABI, S.; MITRA, J. A fault-tolerance based approach to optimal pmu placement. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 10, n. 6, p. 6070–6079, 2019. Citado na página 10.
- Almunif e Fan 2020 ALMUNIF, A.; FAN, L. Optimal pmu placement for modeling power grid observability with mathematical programming methods. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Wiley Online Library, v. 30, n. 2, p. e12182, 2020. Citado na página 7.
- Andreoni et al. 2021 ANDREONI, R.; MACII, D.; BRUNELLI, M.; PETRI, D. Tri-objective optimal pmu placement including accurate state estimation: The case of distribution systems. **IEEE Access**, IEEE, v. 9, p. 62102–62117, 2021. Citado na página 10.
- Arpanahi et al. 2019 ARPANAHI, M. K.; ALHELOU, H. H.; SIANO, P. A novel multiobjective opp for power system small signal stability assessment considering wams uncertainties. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 16, n. 5, p. 3039–3050, 2019. Citado na página 10.
- Baldwin et al. 1993 BALDWIN, T. L.; MILI, L.; BOISEN, M. B.; ADAPA, R. 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 3 vezes nas páginas 2, 9 e 53.

- Bendouda et al. 2018 BENDOUDA, D.; RACHEDI, A.; HAFFAF, H. Programmable architecture based on software defined network for internet of things: connected dominated sets approach. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier, v. 80, p. 188–197, 2018. Citado na página 34.
- Chakrabarti e Kyriakides 2008 CHAKRABARTI, S.; KYRIAKIDES, E. Optimal placement of phasor measurement units for power system observability. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 23, n. 3, p. 1433–1440, 2008. Citado na página 9.
- Chatterjee 2021 CHATTERJEE, S. Cost assessment of different smp strategies considering network contingencies with mbsos. **Soft Computing**, Springer, v. 25, n. 6, p. 4899–4905, 2021. Citado na página 55.
- Chen e Abur 2006 CHEN, J.; ABUR, A. Placement of pmus to enable bad data detection in state estimation. **Power Systems, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1608–1615, 2006. Citado na página 15.
- Company 2010 COMPANY, N. W. G. M. A. T. **American Transmission Company Smart Grid Investment Grant Overview**. 2010. <https://www.naspi.org/sites/default/files/2016-10/atc_kleitsch_sgig_overview_20101005.pdf>. Acessado: 2021-08-28. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 68.
- Cormen 2009 CORMEN, T. H. **Introduction to algorithms**. [S.l.]: MIT press, 2009. Citado na página 37.
- Cruz 2016 CRUZ, M. **Otimização da Alocação de PMUs numa Rede Elétrica com Infraestruturas de Comunicação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 20, 35, 37 e 52.
- Cruz et al. 2019 CRUZ, M. A.; ROCHA, H. R.; PAIVA, M. H.; SEGATTO, M. E.; CAMBY, E.; CAPOROSSO, G. 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 6 vezes nas páginas 11, 38, 44, 48, 51 e 52.
- Ding et al. 2010 DING, L.; GAO, X.; WU, W.; LEE, W.; ZHU, X.; DU, D. Z. Distributed construction of connected dominating sets with minimum routing cost in wireless networks. In: **Distributed Computing Systems (ICDCS), 2010 IEEE 30th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 448–457. ISSN 1063-6927. Citado na página 34.
- Donmez e Abur 2011 DONMEZ, B.; ABUR, A. A computationally efficient method to place critical measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 2, p. 924–931, May 2011. ISSN 0885-8950. Citado 3 vezes nas páginas 3, 9 e 13.
- Dubey et al. 2018 DUBEY, R.; POPOV, M.; MURO, J. d. J. C. Cost effective wide area measurement systems for smart power network. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, IEEE, v. 5, n. 3, p. 85–93, 2018. Citado na página 11.
- Energy e Reliability 2013 ENERGY, O. o. E. D. U. S. Department of; RELIABILITY, E. **Synchrophasor Technologies and their Deployment in the Recovery Act Smart Grid Programs**. 2013. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/10/f33/Synchrophasor_Report_08_09_2013_DOE_2_version_0.pdf>. Acessado: 2021-08-28. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 56.

- Energy e Reliability 2014 ENERGY, O. o. E. D. U. S. Department of; RELIABILITY, E. **Factors affecting PMU installation costs**. 2014. <<https://www.energy.gov/oe/downloads/factors-affecting-pmu-installation-costs-october-2014>>. Acessado: 2021-08-18. Citado 4 vezes nas páginas 7, 18, 19 e 55.
- (EPE) (EPE), M. d. M. e. E. Empresa de P. E. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Citado na página 70.
- Filho et al. 1990 FILHO, M. B. D. C.; SILVA, A. M. L. da; FALCAO, D. M. Bibliography on power system state estimation (1968-1989). **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 3, p. 950–961, Aug 1990. ISSN 0885-8950. Citado na página 31.
- Filho et al. 2007 FILHO, M. D. C.; SOUZA, J. S. D.; SCHILLING, M. T. Handling critical data and observability. **Electric Power Components and Systems**, Taylor & Francis, v. 35, n. 5, p. 553–573, 2007. Citado na página 25.
- Geiger 2008 GEIGER, M. J. **Randomised Variable Neighbourhood Search for Multi Objective Optimisation**. 2008. Citado na página 44.
- Gore e Kande 2015 GORE, R.; KANDE, M. Analysis of wide area monitoring system architectures. In: **Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1269–1274. Citado na página 47.
- Gou 2008 GOU, B. Generalized integer linear programming formulation for optimal pmu placement. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 23, n. 3, p. 1099–1104, Aug 2008. ISSN 0885-8950. Citado na página 9.
- Guha e Khuller 1998 GUHA, S.; KHULLER, S. Approximation algorithms for connected dominating sets. **Algorithmica**, Springer, v. 20, n. 4, p. 374–387, 1998. Citado na página 35.
- Hajian et al. 2011 HAJIAN, M.; RANJBAR, A. M.; AMRAEE, T.; MOZAFARI, B. Optimal placement of pmus to maintain network observability using a modified bps algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 33, n. 1, p. 28–34, 2011. Citado na página 2.
- Hansen et al. 2010 HANSEN, P.; MLADENOVIC, N.; PÉREZ, J. A. M. Variable neighbourhood search: methods and applications. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 175, n. 1, p. 367–407, 2010. Citado na página 43.
- Haynes et al. 2002 HAYNES, T. W.; HEDETNIEMI, S. M.; HEDETNIEMI, S. T.; HENNING, M. A. Domination in graphs applied to electric power networks. **SIAM Journal on Discrete Mathematics**, SIAM, v. 15, n. 4, p. 519–529, 2002. Citado na página 31.
- Jelodar e Fini 2016 JELODAR, M. T.; FINI, A. S. Probabilistic pmu placement considering topological change in high voltage substations. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 82, p. 303–313, 2016. Citado na página 9.
- Johnson e Moger 2020 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, p. e12698, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.

- Kavasseri e Srinivasan 2010 KAVASSERI, R.; SRINIVASAN, S. K. Joint optimal placement of pmu and conventional measurements in power systems. In: IEEE. **Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems**. [S.l.], 2010. p. 3449–3452. Citado na página 9.
- Korkali e Abur 2009 KORKALI, M.; ABUR, A. Placement of pmus with channel limits. In: IEEE. **2009 IEEE power & energy society general meeting**. [S.l.], 2009. p. 1–4. Citado na página 9.
- Krumpholz et al. 1980 KRUMPHOLZ, G. R.; CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W. Power system observability: A practical algorithm using network topology. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-99, n. 4, p. 1534–1542, July 1980. ISSN 0018-9510. Citado na página 9.
- Kuipers 2012 KUIPERS, F. A. An overview of algorithms for network survivability. **ISRN Communications and Networking**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2012, 2012. Citado na página 40.
- Li et al. 2015 LI, H.; BOSE, A.; VENKATASUBRAMANIAN, V. M. Wide-area voltage monitoring and optimization. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 7, n. 2, p. 785–793, 2015. Citado na página 21.
- Lima 2015 LIMA, F. de L. **Estratégias para o Planejamento de Redes Óticas de Transporte**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Agosto 2015. Citado na página 42.
- Liu et al. 2016 LIU, X.; WANG, W.; KIM, D.; YANG, Z.; TOKUTA, A. O.; JIANG, Y. The first constant factor approximation for minimum partial connected dominating set problem in growth-bounded graphs. **Wireless Networks**, Springer, v. 22, n. 2, p. 553–562, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 52.
- Lu et al. 2018 LU, C.; WANG, Z.; MA, M.; SHEN, R.; YU, Y. An optimal pmu placement with reliable zero injection observation. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 54417–54426, 2018. Citado na página 7.
- Manoharan et al. 2018 MANOHARAN, H.; SRIKRISHNA, S.; SIVARAJAN, G.; MANOHARAN, A. Economical placement of pmus considering observability and voltage stability using binary coded ant lion optimization. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Wiley Online Library, v. 28, n. 9, p. e2591, 2018. Citado na página 10.
- Manousakis e Korres 2019 MANOUSAKIS, N. M.; KORRES, G. N. Optimal allocation of phasor measurement units considering various contingencies and measurement redundancy. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 69, n. 6, p. 3403–3411, 2019. Citado na página 10.
- Matsukawa et al. 2019 MATSUKAWA, Y.; WATANABE, M.; MITANI, Y.; OTHMAN, M. L. Multi-objective pmu placement optimization considering the placement cost including the current channel allocation and state estimation accuracy. **Electrical Engineering in Japan**, Wiley Online Library, v. 207, n. 2, p. 20–27, 2019. Citado na página 3.
- Meghanathan 2015 MEGHANATHAN, N. Use of centrality metrics to determine connected dominating sets for real-world network graphs. In: **Information Technology**

- **New Generations (ITNG), 2015 12th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 243–248. Citado 3 vezes nas páginas [31](#), [37](#) e [51](#).
- Mirino et al. 2017 MIRINO, A. E. et al. Best routes selection using dijkstra and floyd-warshall algorithm. In: IEEE. **2017 11th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS)**. [S.l.], 2017. p. 155–158. Citado na página [38](#).
- Mladenović e Hansen 1997 MLADENOVIĆ, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997. Citado na página [43](#).
- Mohammadi et al. 2016 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, Jan 2016. ISSN 1949-3053. Citado 3 vezes nas páginas [3](#), [11](#) e [38](#).
- Monticelli 2000 MONTICELLI, A. Electric power system state estimation. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 88, n. 2, p. 262–282, 2000. Citado 2 vezes nas páginas [9](#) e [13](#).
- Nikkhah et al. 2018 NIKKHAH, S.; AGHAEI, J.; SAFARINEJADIAN, B.; NOROUZI, M.-A. Contingency constrained phasor measurement units placement with n-k redundancy criterion: a robust optimisation approach. **IET Science, Measurement & Technology**, IET, v. 12, n. 2, p. 151–160, 2018. Citado na página [9](#).
- Rather et al. 2015 RATHER, Z. H.; CHEN, Z.; THØGERSEN, P.; LUND, P.; KIRBY, B. Realistic approach for phasor measurement unit placement: Consideration of practical hidden costs. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 1, p. 3–15, Feb 2015. ISSN 0885-8977. Citado na página [11](#).
- Reyes-Rubiano et al. 2020 REYES-RUBIANO, L.; CALVET, L.; JUAN, A. A.; FAULIN, J.; BOVÉ, L. A biased-randomized variable neighborhood search for sustainable multi-depot vehicle routing problems. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 26, n. 3, p. 401–422, 2020. Citado na página [44](#).
- Rocha et al. 2013 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 2 vezes nas páginas [7](#) e [27](#).
- Roop 2015 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 [14](#).
- Schweppe e Wildes 1970 SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power system static-state estimation, part i: Exact model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-89, n. 1, p. 120–125, Jan 1970. ISSN 0018-9510. Citado 2 vezes nas páginas [3](#) e [22](#).
- Segatto et al. 2018 SEGATTO, M. E. V.; ROCHA, H. R. de O.; SILVA, J. A. L.; PAIVA, M. H. M.; CRUZ, M. A. d. R. S. 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 [20](#).

- Shahraeini et al. 2012 SHAHRAEINI, M.; GHAZIZADEH, M. S.; JAVIDI, M. H. Co-optimal placement of measurement devices and their related communication infrastructure in wide area measurement systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 3, n. 2, p. 684–691, June 2012. ISSN 1949-3053. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 48.
- Shang et al. 2007 SHANG, W.; WAN, P.; YAO, F.; HU, X. Algorithms for minimum m-connected k-tuple dominating set problem. **Theoretical Computer Science**, Elsevier, v. 381, n. 1-3, p. 241–247, 2007. Citado na página 36.
- Siebert et al. 2020 SIEBERT, M.; AHMED, S.; NEMHAUSER, G. A linear programming based approach to the steiner tree problem with a fixed number of terminals. **Networks**, Wiley Online Library, v. 75, n. 2, p. 124–136, 2020. Citado na página 35.
- Sufyan et al. 2018 SUFYAN, M. A. A.; ZUHAIB, M.; SEFID, M.; RIHAN, M. Analysis of effectiveness of pmu based wide area monitoring system in indian power grid. In: IEEE. **2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)**. [S.l.], 2018. p. 1–6. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 16.
- Suurballe 1974 SUURBALLE, J. Disjoint paths in a network. **Networks**, Wiley Online Library, v. 4, n. 2, p. 125–145, 1974. Citado na página 40.
- Suurballe e Tarjan 1984 SUURBALLE, J. W.; TARJAN, R. E. A quick method for finding shortest pairs of disjoint paths. **Networks**, Wiley Online Library, v. 14, n. 2, p. 325–336, 1984. Citado na página 41.
- Tafur 2012 TAFUR, J. E. V. **Indicadores de observabilidade para estimação de estado em sistemas de potência**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Fluminense, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- Theodorakatos et al. 2015 THEODORAKATOS, N. P.; MANOUSAKIS, N. M.; KORRES, G. N. A sequential quadratic programming method for contingency-constrained phasor measurement unit placement. **International Transactions on Electrical Energy Systems**, Wiley Online Library, v. 25, n. 12, p. 3185–3211, 2015. Citado na página 7.
- Xu e Abur 2004 XU, B.; ABUR, A. Observability analysis and measurement placement for systems with pmus. In: **Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES**. [S.l.: s.n.], 2004. p. 943–946 vol.2. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 24.
- Xu e Abur 2004 XU, B.; ABUR, A. Observability analysis and measurement placement for systems with pmus. In: CITESEER. **IEEE PES power systems conference and exposition**. [S.l.], 2004. v. 2, p. 943–946. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 22.