

Minimizando o custo global de Infraestrutura de Comunicação e alocação de PMUs em WAMS: uma abordagem via grafos

Vanessa B. Boone,* Marco A. R. S. Cruz,** Marcia H. M. Paiva,*
Helder R. O. Rocha*

* *Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil,*
(*e-mail: vanessabboone@hotmail.com, marcia.paiva@ufes.br,*
helder.rocha@ufes.br)

** *Universidade Técnica do Atlântico, Cabo Verde,*
(*e-mail: madrsc@yahoo.com*)

Abstract: In this paper, we present a new method for the design of WAMS (Wide Area Measurement Systems). State estimation is responsible for processing measurements in real time and providing a complete and secure database for Wide Area Measurement Systems, therefore the power system is increasingly dependent on PMU measurements. The high cost of the communication infrastructure together with the cost of the PMU encouraged the development of new PMU placement solutions in order to ensure the observability of the system. The new methodology has an emphasis on optimizing the cost of the communication infrastructure, so that the smallest number of PMUs satisfies the condition of a lower total cost. Our results show the effectiveness of the proposed methodology when compared to research in recent previous works. The simulations were performed using IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 and IEEE-300 standards.

Resumo: Neste artigo, apresenta-se um novo método para o projeto de Sistemas de Medição de Área Ampla (*Wide Area Measurement Systems - WAMS*) baseadas em PMUs (*Phasor Measurement Unit*) para redes elétricas. A estimação de estado é responsável por processar medições em tempo real e fornecer um banco de dados completo e seguro para tomada de decisão nas redes elétricas e esse processo só é válido se existir uma quantidade suficiente de PMUs alocadas na rede. O elevado custo da infraestrutura de comunicação adjunto do custo das PMUs incentivou a elaboração de novas técnicas de alocação de PMUs de modo a assegurar a observabilidade total da rede. Este artigo propõe uma nova metodologia que possui ênfase em otimizar o preço da infraestrutura de comunicação, de modo que o menor número de PMUs satisfaça a condição de um menor custo total. Os resultados mostram a eficácia da metodologia proposta quando comparada com pesquisas anteriores recentes. As simulações foram realizadas utilizando os padrões IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300.

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

Palavras-chave: Sistemas de Medição de Área Ampla, Unidades de Medição Fasoriais, Otimização, Teoria dos grafos e Observabilidade do Sistema de Potência.

1. INTRODUÇÃO

É de conhecimento geral, que no Brasil, quando os reservatórios das hidrelétricas estão ao nível crítico, ocorre a redução da produção de energia elétrica e como consequência o aumento da utilização de energia elétrica proveniente de termoeletricas para suprir a demanda. A energia gerada por usina termoeletrica é mais cara e provoca um aumento na conta de energia do consumidor. Uma solução viável é a ampliação da geração de energias renováveis para garantir a segurança energética e diminuir o preço da energia elétrica.

A operação de tais redes elétricas que integram geração distribuída e renovável, impõe que os Sistemas de

Gerenciamento de Energia (SGE) sejam uniformemente competentes e resilientes. Assim, deve-se implementar um monitoramento eficaz para assegurar controle, proteção e intervenção remota dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Os sistemas inteligentes auferem eficiência e automatismo e também possuem a capacidade de identificar, quase que instantaneamente, problemas no SEP. Além disso, esses sistemas inteligentes de medição e controle são constituídos de unidades de medição fasoriais (*Phasor Measurement Units - PMUs*), fundamentais para assegurar confiabilidade nas medições dos SEP.

A PMU é um dispositivo que fornece dados sincronizados em tempo real de tensão e corrente em uma barra do sistema (Xu and Abur, 2004). Esses medidores quando

existem em quantidades suficientes garantem a Estimacão do Estado (EE) do SEP, uma ferramenta essencial para validao do monitoramento de sistemas de potência, permitindo assim, uma rápida reao na decisão de medidas preventivas visto que  possível detectar e corrigir erros nas medioes (Gómez and Rios, 2013), (de Oliveira Rocha et al., 2013). PMU é um importante equipamento de medio de Sistemas de Medio de rea Ampla (*Wide-area Measurement System - WAMS*) (Fan et al., 2018), (Hayerikhiyavi and Dimitrovski, 2021).

A WAMS consiste em tecnologias de medio avançada, ferramentas de informao 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 autnoma que complementa o sistema de controle de supervisão e aquisio de dados (SCADA) convencional da rede. Os principais componentes da WAMS são as PMUs, o concentrador de dados dos fasores (*Phasor Data Concentrator - PDC*), o (*Global Positioning System - GPS*) para sincronizao de tempo dos fasores, canal de comunicao, e os aplicativos (*softwares*) no centro de controle (Appasani and Mohanta, 2018).

Os dados sincronizados e medidos pelas PMUs são enviados via rede de comunicao para o PDC que tem a funo de organizá-los com base no registro de tempo do GPS (Joshi and Verma, 2021) e transmiti-los para o centro de controle do SEP para a EE. A infraestrutura de comunicao é o que tem mais peso no preço integral do sistema.

Vários e diferentes sistemas de comunicao de alta velocidade vem sendo desenvolvidos, tais como a comunicao sobre linhas de potência PLC (*Power Line Communication*), a fibra tica, rdio, micro-ondas e a transmissão de dados por satélite entre as PMUs e os centros de controle (Segatto et al., 2018). Estas tecnologias de comunicao, com ou sem fio, tem vantagens e desvantagens. A tecnologia mais apropriada para uma transferência de dados segura, confiável e econmica dependerá das condioes da rede elétrica.

A infraestrutura abordada neste artigo é o OPGW (*Optical Power Ground Wire*) por ter altas taxas de transferência de dados. O OPGW contm uma estrutura tubular com fibra tica, rodeada por camadas de fio de ao e alumínio. As funoes do OPGW são as de aterramento e de transmissão de dados em alta velocidade. Em consequência de ser muito eficiente para a transmissão de dados e livre de influências eletromagnéticas o OPGW é utilizado com muita frequência nas redes elétricas inteligentes (Ghasemkhani et al., 2016).

Pode-se afirmar que não  econmico fornecer PMUs em todas as barras da rede (Pal et al., 2017). O ideal é distribuir PMUs de tal forma que a rede se torne observável e as PMUs sejam conectadas por cabos OPGW. Assim, este artigo propõem Alocao ótima de PMUs (AOP) e da Infraestrutura de Comunicao (IC) das redes IEEE através da teoria de grafos, ao elaborar a construo de um conjunto dominante conexo mínimo das redes IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300. A construo do

conjunto dominante conexo mínimo é focada em minimizar o preço da infraestrutura de comunicao de modo que o conjunto dominante conexo mínimo satisfaça a condio de menor custo total.

2. ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE TOPOLÓGICA NO SEP

Analisar a condio de observabilidade de um SEP é determinar se  possível executar a EE utilizando as medidas disponíveis respeitando os tipos e locais na configurao da rede. A análise da observabilidade topológica é denominada rvore Geradora de Medidas, ou seja, pesquisa como gerar uma rvore T que conecta todos os nos de uma rede pelos 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 alocao de PMUs, seguindo basicamente o conceito de rvore Geradora de Medidas e outros conceitos da teoria dos grafos como subgrafo e cobertura de nos. Assim, a metodologia consiste em introduzir PMUs, com o propósito de fazer crescer o subgrafo de medidas pela introduo de PMUs, aumentando a cobertura dos nos, até obter a árvore geradora de medidas. A maioria dos trabalhos centra-se na observabilidade topológica pela vantagem de ser computacionalmente menos exigente e pela facilidade de localizar as áreas com inobservabilidade.

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

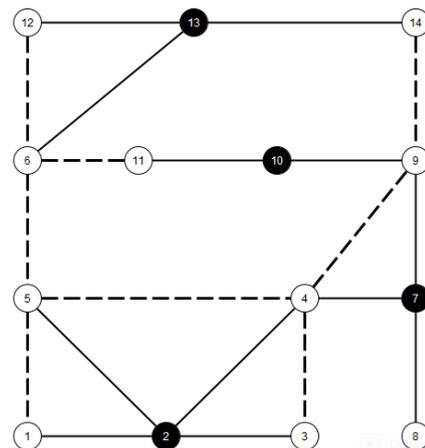


Figura 1. Alocao de PMUs na rede elétrica IEEE-14

É possível concluir então, que com somente quatro barra-mentos em 2, 7, 10 e 13, assegura-se a completa observa-bilidade de todo o sistema, ou seja, a tensão, corrente e suas fases em todas as barras do sistema são conhecidas (medidas e/ou calculadas).

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

3. CONCEITOS DE TEORIA DOS GRAFOS APLICADOS A AOP

Um grafo $G(V, E)$ é um conjunto de vértices e arestas, sendo V o conjunto de vértices e E o conjunto de arestas. Pode-se representar um grafo com n vértices através de uma matriz de adjacência $A(G) = [a_{ij}]$ de dimensão $n \times n$ de modo que o valor a_{ij} esclarece sobre como os vértices v_i e v_j estão relacionados, ou seja, se v_i e v_j são adjacentes ou não. Quando o grafo é simples, não direcionado e não ponderado, os elementos a_{ij} da matriz tem valor igual a 1 se v_i e v_j são adjacentes e 0 caso contrário. Se o grafo for ponderado, os elementos a_{ij} contém o peso dessa mesma aresta, ao invés de 1 quando houver uma aresta entre v_i e v_j .

Consoante a teoria dos grafos, o grau de um vértice em um grafo não direcionado é definido como o número de arestas incidentes ao vértice, ou seja, o número de vértices adjacentes. Os vértices terminais são aqueles com grau igual a 1, logo são adjacentes a apenas um vértice.

3.1 Conjunto Dominante

Um conjunto S de vértices em um grafo $G(V, E)$ é um conjunto dominante (CD) se todo vértice de G ou pertence a S , ou é adjacente a algum vértice em S (Guha and Khuller, 1998). Pode-se aplicar a elaboração de conjunto dominante para colocação de dispositivos de monitoramento, como câmeras de vigilância e até mesmo alarmes de incêndio (Henning and Rad, 2012).

3.2 Conjunto Dominante Mínimo

Quando o conjunto de vértices em um grafo é mínimo de modo que cada vértice do grafo pertence a este conjunto ou é adjacente a um vértice que lhe pertence, pode-se afirmar que esse conjunto de vértices é um conjunto dominante mínimo (CDM).

3.3 Conjunto Dominante Conexo

Um conjunto dominante é dito conexo (CDC) quando o subgrafo induzido pelos seus vértices é conexo. A construção de um conjunto dominante conexo é muito empregada em redes de sensores sem fio (Yu et al., 2013) e (Tosun and Haytaoglu, 2018), backbone virtual (Yin et al., 2011), (Bai et al., 2020) e sistemas de monitoramento de energia elétrica (Dorfling and Henning, 2006), (Stephen et al., 2015) e (Liao et al., 2015).

3.4 Conjunto Dominante Conexo Mínimo

Quando o conjunto de vértices em um grafo é mínimo e o subgrafo induzido pelos seus vértices é conexo, então pode-se dizer que o conjunto dominante é um conjunto dominante conexo mínimo (CDCM).

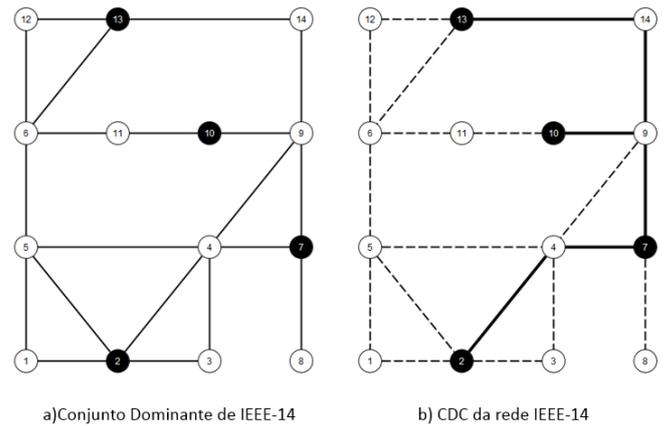


Figura 2. Exemplo de um grafo e seu respectivo CDC

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. No caso dos problemas AOP, o CD mostrado na Figura 2, em representação do grafo da rede IEEE-14, é análogo ao posicionamento necessário de PMUs em barramentos que garantam a observabilidade topológica da rede, enquanto o CDC em b) representaria as PMUs e outras barras de passagem necessárias para construir uma rede de fibra ótica entre as quatro PMUs alocadas.

3.5 A métrica centralidade de intermediação

Em um grafo, um conjunto de métricas podem ser calculadas, os quais caracterizam o grafo todo ou seus elementos individualmente. A *betweenness centrality* (BWC) ou centralidade de intermediação de um vértice v é uma delas e representa a influência total que o vértice v tem nas comunicações entre cada par de vértices em um grafo G , admitindo que a informação flui pelos caminhos mais curtos (Dinler and Tural, 2018).

A *betweenness centrality* é determinada como a proporção entre o número de menores caminhos que um vértice pertence e o número total de menores caminhos entre todas as combinações de pares de vértices.

3.6 Algoritmo de Dijkstra

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

3.7 Algoritmo de Kruskal

É um algoritmo bastante utilizado em teoria dos grafos que pesquisa uma árvore geradora mínima para um grafo conexo ponderado. Dado um grafo $G = (V, E)$ não direcionado ponderado com N vértices e uma lista de arestas, uma árvore geradora mínima (*Minimum Spanning Tree* - MST) é um subconjunto de arestas que conecta todos os vértices para originar um grafo acíclico e com peso

total mínimo das arestas (Qiao and Créput, 2019) . O algoritmo *Kruskal Minimum Spanning Tree* possui tempo computacional $O(|E|\log|V|)$.

4. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A formulação do problema examina a abrangência de todos os gastos com a instalação de equipamentos e os custos com as infraestruturas de comunicação. Nos preços de equipamentos, incluem-se as PMUs, os PDCs, os *switches* e roteadores nos barramentos. Os custos com a IC referem-se aos custos com cabos OPGW necessários para interligar todas as barras com PMUs. Os cabos OPGW são instalados sobre a rede elétrica, considerando-se um sistema de transmissão independente e numa arquitetura centralizada. O problema é declarado nas equações (1) - (4):

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^n cp_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (cf \cdot d_{ij} + cr \cdot x_i) \cdot y_{ij} \right) \quad (1)$$

sujeito a:

$$A \cdot X \geq b = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1]^T \quad (2)$$

$$\sum_{ij \in E} y_{ij} = n - 1 \quad (3)$$

$$\sum_{ij \in E: i \in S, j \in S} y_{ij} \leq |S| - 1, \forall S \subseteq V \quad (4)$$

Onde

- n é o número de barras na rede;
- cp_i é o custo de alocação de PMU na barra i ;
- cf é o custo de OPGW por km;
- cr é o custo dos dispositivos ativos, como roteadores e *switches*, alocados em todas as barras com PMUs;
- X é o vetor de decisão binária para a colocação de PMU cujos elementos x_i são definidos como um se uma PMU for colocada na barra i , e zero em caso contrário;
- A é a matriz de adjacência da rede.
- d_{ij} é a distância em Km entre as barras i e j ;
- y_{ij} assume o valor 1 se uma linha existente for selecionada para integrar a rede de comunicação OPGW;

Na função objetivo (eq. 1) o primeiro termo visa minimizar o custo total relacionado às PMUs e o segundo termo o custo da infraestrutura de comunicação. O custo da infraestrutura de comunicação tem dois componentes: um está relacionado a elementos ativos, como *switches* e roteadores e o outro está relacionado à implantação do OPGW, proporcional ao comprimento dos cabos implantados.

A restrição (2) garante a observabilidade do sistema de potência em condições normais se b for um vetor unitário de comprimento n . As restrições (3) e (4) garantem uma topologia em árvore para a rede de comunicação das PMUs. Por isso, a equação (3) impõe um número de arestas y_{ij} que é uma unidade menor que o número de vértices n , e a equação (4) garante que não haja ciclo, impondo que

qualquer subconjunto S de vértices deve ter no máximo $n - 1$ arestas.

5. METODOLOGIA

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

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

As distâncias entre as barras são definidas como os pesos. Foi criada uma razão do somatório dos pesos de cada vértice pelo grau, para contribuir na seleção de vértices que possibilitam um menor custo de OPGW. Essa razão foi fundamental tanto para a escolha quanto para a eliminação de alguns vértices do conjunto dominante.

A métrica ponderada e sua média aritmética são apresentadas respectivamente nas equações (5) e (6):

$$\text{ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{pesos}_i}{\text{grau}} \quad (5)$$

A definição da média aritmética da métrica ponderada é:

$$\text{media} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{ponderada}_i}{n}, \quad (6)$$

sendo o valor de n igual ao número de barras do sistema.

Existe um critério para a seleção dos vértices escolhidos para serem dominantes ao utilizar a métrica ponderada. A média aritmética dessa métrica é calculada para identificar os vértices que possuem um valor bastante inferior à média.

Para os sistemas testados neste trabalho, foi escolhido empiricamente o valor de 58 % da média aritmética para que os vértices fossem verificados. Após a verificação os vértices que tiverem *betweenness* diferente de zero e forem adjacentes a vértices que possuem os valores mais elevados de *betweenness* serão selecionados. Isso tudo porque se observou que vértices nessas condições colaboraram para a obtenção de um conjunto dominante conexo com um somatório de pesos mínimo.

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

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

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

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

$$(\text{cálculo da equação 5}) < 0,58 * (\text{cálculo da equação 6}) \neq 0.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Um modo de compreender melhor como ocorre essa seleção de vértices para o conjunto dominante em cada etapa é utilizar a rede IEEE-30 como exemplo. A Figura 3 representa a simulação da rede IEEE-30, as linhas destacadas representam as fibras ópticas e os vértices pretos são os vértices onde as PMUs foram colocadas.

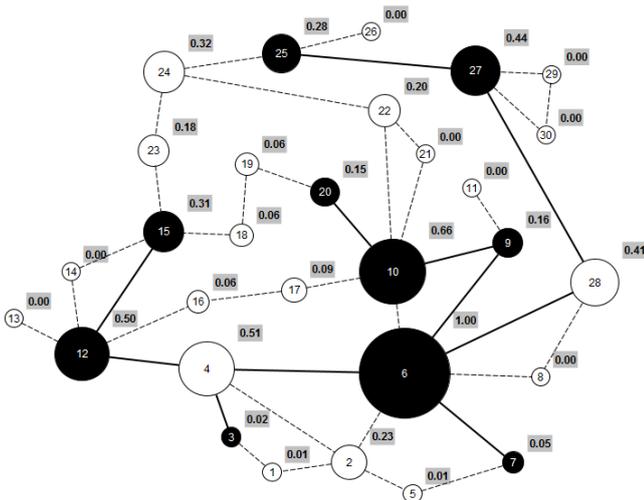


Figura 3. Betweenness em cada vértice da rede IEEE-30

Conforme pode-se observar, a Figura 3 possui os valores de *betweenness* de cada nó da rede IEEE-30 facilitando o entendimento da seleção dos nós ao conjunto dominante conexo.

Os vértices 9, 12 e 25 foram selecionados na etapa 2, que escolhe como dominantes os nós adjacentes aos que tem grau igual a 1. A etapa 3 possui a condição descrita anteriormente e os vértices 1, 3, 7, 8, 19 e 21 satisfazem a condição, porém apenas os valores 3 e 7 foram selecionados como dominantes porque são adjacentes aos três vértices com maior valor de *betweenness* que são os vértices 4, 6 e 10 e, além disso, tem o valor de *betweenness* diferente de zero. O vértice 8 é adjacente ao 6 e 10 enquanto o vértice 21 é adjacente ao 10, porém tanto o 8 quanto o 21 tem o valor de *betweenness* igual a zero e por esse motivo não foram escolhidos como dominantes. Os vértices 1 e 19 como não são adjacentes aos nós 6, 10 e 4, também não foram selecionados. Na etapa 4 os vértices selecionados foram 6, 10, 15, 20 e 27.

6. TESTES E RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se as simulações do algoritmo proposto para as redes de transmissão: IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300 barras.

Com a finalidade de estabelecer as distâncias das linhas para cada rede, determinou-se que todas as linhas de transmissão têm o mesmo condutor e configuração. Assim, as distâncias relativas entre todas as barras são extraídas da matriz de admitância do sistema (Washington, 1999). Devido ao propósito de comparação de resultados, consideraram-se os custos do PMU e do OPGW, conforme os valores descritos na Tabela 1.

Tabela 1. Tabela com custo de PMU e OPGW

Equipamento	Custo
PMU / Unidade	US\$ 40.000
OPGW / Km	US\$ 10.000

As siglas PRO e LIT são utilizadas na primeira coluna a partir da Tabela 2, PRO se refere a algoritmo proposto e LIT se refere a literatura. O algoritmo proposto é comparado com a seguinte literatura (Cruz et al., 2019). Na segunda coluna estão descritos os nós, onde foram alocadas as PMUs, na terceira a quantidade de PMUs alocadas, na quarta o tamanho do comprimento de fibra óptica em Km e na última coluna o custo global incluindo o custo com PMUs e com OPGW.

Tabela 2. Resultado para o sistema IEEE-14 barras

	PMUs	NrPMUs	Km(OPGW)	\$(10 ⁶)
LIT	4,5,6,7,9	5	199	2,2
PRO	4,5,6,7,9	5	199	2,2

Na Tabela 2 é possível perceber que para a rede IEEE-14 os resultados são os mesmos, provando que não foi possível otimizar mais do que o trabalho utilizado como referência para comparação.

O resultado apresentado na Tabela 3 referente ao sistema IEEE-30 mostra que houve otimização do gasto com cabos OPGW, permitindo uma redução de 3,58% no custo total utilizando a mesma quantidade de PMUs que a literatura comparada. Constata-se a eficácia do algoritmo ao se fazer uma análise dos resultados da rede IEEE-30 barras.

Na Tabela 4 obteve-se a alocação de uma PMU a mais do que em relação ao trabalho comparado para o sistema

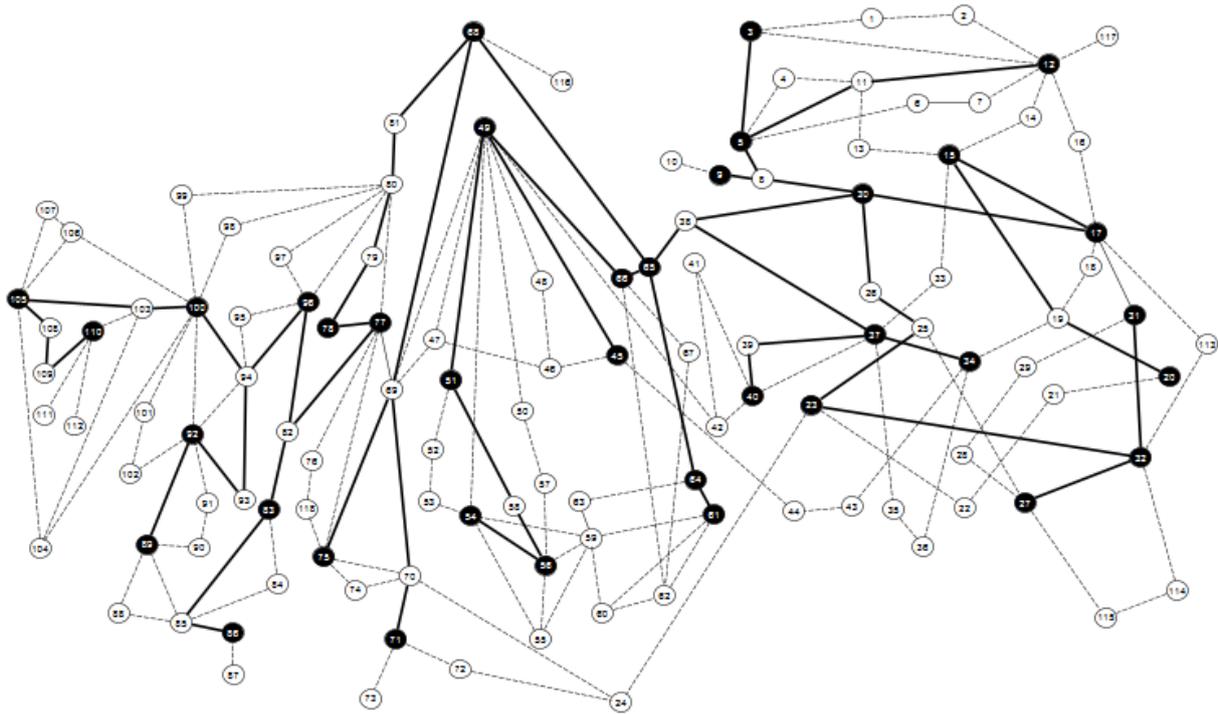


Figura 4. Simulação da alocação de PMUs e OPGW para a rede IEEE-118

Tabela 3. Resultado para o sistema IEEE-30 barras

	PMUs	NrPMUs	$Km(OPGW)$	$\$(10^6)$
LIT	2,4,6,9, 10,12,15, 20,25,27	10	625	6,7
PRO	3,6,7,9, 10,12,15, 20,25,27	10	606,2	6,46

IEEE-118, porém com um custo menor da IC, levando a uma diminuição de 2,34% do custo total. A metodologia conseguiu o objetivo de otimizar o custo total para a rede IEEE-118.

Tabela 4. Resultado para o sistema IEEE-118 barras

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

Analisando-se o resultado apresentado na Tabela 5 para a rede IEEE-300 constatou-se que o algoritmo alocou uma

Tabela 5. Resultado para o sistema IEEE-300 barras

	NrPMUs	$Km(OPGW)$	$\$(10^6)$
LIT	91	7862,4	82,3
PRO	92	7792,3	81,6

PMU a mais do que literatura, porém com um custo do cabo OPGW menor levando a uma diminuição de 0,85% do custo total. O algoritmo comprovou sua eficácia para redes de grande porte também.

A visualização de todas as tabelas e suas comparações, comprovou a eficiência da nova metodologia. Apesar das Tabelas 4 e 5 apresentarem uma maior quantidade de PMUs no trabalho proposto o custo global foi menor, o que reforçou a importância de se economizar na infraestrutura de comunicação.

O grafo localizado na Figura 4 representa o CDC da rede IEEE-118 obtida pela simulação. Os vértices que compõem o conjunto dominante são representados em preto e os demais em branco. As PMUs foram alocadas nos vértices do conjunto dominante (pretos) e as linhas que representam os caminhos percorridos pelas fibras OPGW são as linhas pretas destacadas.

7. CONCLUSÃO

Neste artigo uma nova metodologia foi proposta para otimização de custo financeiro, abrangendo os custos com a instalação de equipamentos e os custos com a infraestrutura de comunicação em sistemas elétricos de potência. Este algoritmo provou ser adaptável e bastante eficaz para todos os SEP testados.

Uma nova métrica proposta que é a razão do somatório dos pesos de cada vértice pelo grau, contribuiu para o alcance do objetivo. Além da nova métrica proposta a *betweenness centrality* também foi utilizada para encontrar os possíveis vértices para a alocação de PMU.

Após a alocação de PMUs os algoritmos de Dijkstra e de árvore geradora mínima de Kruskal foram utilizados para calcular a menor distância entre os PMUs alocados e garantir a otimização da infraestrutura de comunicação. Pode-se afirmar que a otimização do custo total nas redes IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300 obteve resultados satisfatórios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte do CNPq (Projeto 309737/2021-4), da CAPES e da FAPES (Projeto 2021-WMR44).

REFERÊNCIAS

- Appasani, B. and Mohanta, D.K. (2018). Co-Optimal Placement of PMUs and Their Communication Infrastructure for Minimization of Propagation Delay in the WAMS. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(5), 2120–2132. doi:10.1109/TII.2018.2799659.
- Bai, X., Zhao, D., Bai, S., Wang, Q., Li, W., and Mu, D. (2020). Minimum connected dominating sets in heterogeneous 3d wireless ad hoc networks. *Ad Hoc Networks*, 97, 102023.
- Baldwin, T.L., Mili, L., Boisen, M.B., and Adapa, R. (1993). Power system observability with minimal phasor measurement placement. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(2), 707–715. doi:10.1109/59.260810.
- Cruz, M.A., Rocha, H.R., Paiva, M.H., Segatto, M.E., Camby, E., and 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.
- de Oliveira Rocha, H.R., de Souza, J.C.S., and Do Coutto Filho, M.B. (2013). Planning high quality metering systems for state estimation through a constructive heuristic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 52, 34–41.
- Dinler, D. and Tural, M.K. (2018). Faster computation of successive bounds on the group betweenness centrality. *Networks*, 71(4), 358–380.
- Dorfling, M. and Henning, M.A. (2006). A note on power domination in grid graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 154(6), 1023–1027.
- Fan, X., Pal, S., Duan, D., and Du, L. (2018). Closed-form solution for synchrophasor data correction under gps spoofing attack. In *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 1–5. IEEE.
- Ghasemkhani, A., Anvari-Moghaddam, A., Guerrero, J.M., and Bak-Jensen, B. (2016). An efficient multi-objective approach for designing of communication interfaces in smart grids. In *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 1–6. doi:10.1109/ISGTEurope.2016.7856286.
- Gómez, O. and Rios, M.A. (2013). ILP-based multistage placement of PMUs with dynamic monitoring constraints. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 53, 95–105.
- Guha, S. and Khuller, S. (1998). Approximation algorithms for connected dominating sets. *Algorithmica*, 20(4), 374–387.
- Hayerikhiyavi, M. and Dimitrovski, A. (2021). A Practical Assessment of the Power Grid Inertia Constant Using PMUs. In *2020 52nd North American Power Symposium (NAPS)*, 1–5. doi:10.1109/NAPS50074.2021.9449705.
- Henning, M.A. and Rad, N.J. (2012). Locating-total domination in graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 160(13-14), 1986–1993.
- Joshi, P.M. and Verma, H. (2021). Synchrophasor measurement applications and optimal PMU placement: A review. *Electric Power Systems Research*, 199, 107428.
- Liao, C.S., Hsieh, T.J., Guo, X.C., Liu, J.H., and Chu, C.C. (2015). Hybrid search for the optimal PMU placement problem on a power grid. *European Journal of Operational Research*, 243(3), 985–994.
- Pal, A., Mishra, C., Vullikanti, A.K.S., and Ravi, S. (2017). General optimal substation coverage algorithm for phasor measurement unit placement in practical systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 11(2), 347–353.
- Qiao, W.b. and Créput, J.C. (2019). Gpu implementation of borvka’s algorithm to euclidean minimum spanning tree based on elias method. *Applied Soft Computing*, 76, 105–120.
- Segatto, M.E.V., de Oliveira Rocha, H.R., Silva, J.A.L., Paiva, M.H.M., and Cruz, M.A.d.R.S. (2018). Telecommunication technologies for smart grids: Total cost optimization. In *Advances in Renewable Energies and Power Technologies*, 451–478. Elsevier.
- Stephen, S., Rajan, B., Grigoriou, C., and William, A. (2015). Resolving-power dominating sets. *Applied Mathematics and Computation*, 256, 778–785.
- Szcześniak, I., Jajszczyk, A., and Woźna-Szcześniak, B. (2019). Generic dijkstra for optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(11), 568–577.
- Tosun, M. and Haytaoglu, E. (2018). A new distributed weighted connected dominating set algorithm for wsns. In *2018 IEEE 8th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin)*, 1–6. IEEE.
- Washington, U. (1999). Power systems test case archive.
- Xu, B. and Abur, A. (2004). Observability analysis and measurement placement for systems with pmus. In *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004.*, 943–946 vol.2. doi:10.1109/PSCE.2004.1397683.
- Yin, B., Shi, H., and Shang, Y. (2011). An efficient algorithm for constructing a connected dominating set in mobile ad hoc networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 71(1), 27–39.
- Yu, J., Wang, N., Wang, G., and Yu, D. (2013). Connected dominating sets in wireless ad hoc and sensor networks—a comprehensive survey. *Computer Communications*, 36(2), 121–134.