

Alocação de PMUs via Análise de Observabilidade Topológica e Numérica

Ícaro H. Honorato* Diego Goncalves* Jair A. L. Silva*
Helder R. O. Rocha*

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, (e-mail: icaro.honorato@aluno.ufes.br).

Abstract: The planning of a measurement system for electrical power systems is essential for a good performance of the estimation of its operating state. Therefore, this work presents algorithms to plan measurement systems with PMUs via topological and numerical observability analysis, obtaining observable systems with cost-optimized, reliable and robust plans. The tests were performed using the IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 and IEEE-300 standards to validate the proposed algorithms.

Resumo: O planejamento de um sistema de medição para sistemas elétricos de potência é fundamental para um bom desempenho da estimação do seu estado operativo. Assim sendo, este trabalho apresenta algoritmos para planejar sistemas de medição com PMUs via análise de observabilidade topológica e numérica, obtendo sistemas observáveis com planos de custo otimizado, confiáveis e robustos. Os testes foram realizados utilizando os padrões IEEE-14, IEEE-30, IEEE-118 e IEEE-300 para validação dos algoritmos propostos.

Keywords: Electric Power systems; Optimization; Theory of graphs; Metaheuristics; PMU.

Palavras-chaves: Sistemas Elétricos de Potência; Otimização; Teoria dos Grafos; Metaheurística; PMU.

1. INTRODUÇÃO

Em qualquer país desenvolvido, mais de um terço da energia consumida está na forma de energia elétrica. Atualmente os sistemas elétricos de potência (SEP) são responsáveis pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e gerenciar cada um destes sistemas tem requisitado cada vez mais monitoramento e controle baseados em computação. O sistema que gerencia um SEP é o sistema de gerenciamento de energia (EMS - *Energy Management System*) e, atualmente, realiza diversas funções como aquisição de dados, controle de geração automática, segurança da rede elétrica, agendamento econômico, entre outros Ahmad (2013); Rocha et al. (2018).

Para o adequado funcionamento de todas estas funções é fundamental conhecer o estado operativo do sistema, definido por uma descrição de informações chave, que pode ser classificado em três grupos: emergência, restaurativo, normal. Um estado normal é classificado quando todas as restrições de operação e carga são satisfeitas. Um estado emergencial ocorre quando um ou mais limites de operação física são violados (por exemplo, sobrecarga de linhas, sobre/sob tensão, alta/baixa frequência). Um estado restaurativo ocorre quando uma ou mais cargas não são conhecidas (queda de energia total ou parcial), mas o sistema parcial está operando em um estado normal Ahmad (2013). A estimação do estado (EE) de um sistema de potência tornou-se então uma função imprescindível,

para classificá-lo em um dos estados citados anteriormente, e inevitável, para o desempenho das funções executadas pelos EMSs Uatrongjit (2018).

Para que a EE ocorra de forma adequada em um sistema elétrico de potência, é fundamental o planejamento do sistema de medição Rocha et al. (2019). Atualmente, os sistemas de medição contam com Unidades de Medição Fasorial (PMU - Phasor Measurement Unit), medidores sincronizados via GPS, que coletam medições simultâneas de fasor (tensão e corrente) em uma ampla área do sistema de potência e possuem um ciclo de atualização de dados entre 50 e 60 vezes por segundo Ahmad (2013). Desta forma, promove alta precisão, pequeno ciclo de atualização de dados, menor atraso na transmissão e são mais sensíveis as variações de status do sistema elétrico Liu et al. (2018). Entretanto, devido a restrições técnicas e econômicas, até o momento, apenas alguns nós-chave possuem PMUs alocados e, desta forma, requisitos de observabilidade podem não ser atendidos.

Assim sendo, torna-se útil investigar e desenvolver métodos de alocação de PMUs que encontrem o menor número possível de PMUs capaz de garantir que as medidas componentes do plano de medição assegurem total observabilidade. Este procedimento é conhecido como Análise de Observabilidade e pode ser implementado com duas técnicas principais: topológica e numérica. A topológica é realizada com base no tipo e na localização das medições, analisando a topologia da rede. A numérica se baseia na construção da matriz Jacobiana e de ganho para determinar a observabilidade do sistema. Além disso a análise de

* Reconhecimento do suporte financeiro deve vir nesta nota de rodapé.

observabilidade numérica fornece um subproduto que são os níveis de criticalidade do sistema de medição através de medidas e conjuntos críticos que, quando devidamente identificados, indicam pontos de reforço no plano de medição.

Neste trabalho algoritmos são apresentados para resolver o problema do plano de medição mediante a alocação de PMUs, através de análise de observabilidade topológica/numérica, obtendo sistemas de medição de baixo custo, confiáveis e robustos. Seu conteúdo é organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta uma breve descrição sobre o processo de EE; A Seção III apresenta a métrica do PageRank usada para alocar as PMUs; A Seção IV apresenta a metodologia, utilizada para a criação das metaheurísticas, que verifica a observabilidade das redes através da análise topológica/numérica; Os resultados da simulação usando os padrões IEEE são apresentados na Seção V e finalmente, a Seção VI conclui este trabalho.

2. ESTIMAÇÃO DE ESTADO

Os estimadores de estado devem possuir a capacidade de limpar os dados, provenientes dos sistemas de medição, que podem conter erros de origens distintas onde os principais erros são de medição (conhecidos como *Bad Data*), topologia e parâmetro Ahmad (2013). O método normalmente utilizado para encontrar o melhor ajuste dos dados medidos na EE é o método dos mínimos quadrados.

2.1 Estimador de Estado Linear

A relação entre o estado operativo do sistema e as medidas é estabelecida por uma função não linear do estado $h_i(x)$ no caso ideal. Como as medições possuem dados corrompidos, o estimador de estado irá processá-las com a adição de algum erro com ruído gaussiano v de média zero e variância σ^2 . A equação do modelo de medição é dado a seguir.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ h_m(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ v_m \end{bmatrix} = h_i(x) + v_i$$

Onde,

- z_k é o vetor de medidas;
- $h_i(x)$ é a função não-linear que relaciona a i -ésima medida com o vetor de estado x ;
- v é um vetor de ruído Gaussiano de média zero e variância que representa o erro associado à medida.

Linearizando o modelo, obtêm-se

$$z = Hx + \varepsilon \quad (1)$$

Onde

- z é um vetor de medidas ($m \times 1$);
- m é o número de medidas;
- x é um vetor de estado ($n \times 1$);
- n é $2nb-1$ e nb é o número de barras;
- H é a matriz jacobiana de dimensões (m, n);

- ε é um vetor de erros associados às medidas z .

Como o objetivo é minimizar o erro associado às medidas z , um dos métodos comumente utilizados é o método dos Mínimos Quadrados Ponderados para a formação da função objetivo, que em notação matricial é descrito como:

$$J(x) = [z - Hx]^T R^{-1} [z - Hx] \quad (2)$$

Onde R é a matriz de covariância, $R = E[\varepsilon.\varepsilon^T] = \text{diag}(\sigma_i^2)$ sendo que $E[.]$ é o operador esperado e σ_i é o desvio padrão da i -ésima medida. Deseja-se obter uma estimativa para o estado \hat{x} que minimize $J(\hat{x})$, onde \hat{x} representa uma estimativa de x . Para isso utiliza-se:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad (3)$$

Aplicando (2) em (3) obtém-se:

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

O estado estimado \hat{x} calculado utilizando (4) é dado por:

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

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

2.2 Análise de Observabilidade

Avaliar o requisito de observabilidade de uma rede elétrica é determinar se é possível estimá-la utilizando as medidas disponíveis considerando os tipos e locais na configuração da rede. Na análise topológica considera-se a conectividade dos elementos que compõem a rede, enquanto que nos métodos numéricos realiza-se a verificação da não singularidade da matriz de ganho G usada na subseção anterior.

Para a construção da matriz jacobiano H , utilizou-se o problema da estimativa do estado linear, do princípio de dissociação entre os conjuntos de variáveis ativas e reativas, usando apenas o conjunto de potência ativa - ângulo ($P - \theta$) na formação da matriz Jacobiano e substituiu a matriz de covariância dos erros das medidas pela identidade da matriz I , com isso temos:

$$z_a = H_a \theta + \varepsilon \quad (6)$$

Onde z_a é o vetor de medidas ativas representadas pelas medidas convencionais que são os fluxos nos ramos e as injeções nodais de potência ativa, e pelas medidas fasoriais que são os ângulos de fase das tensões de barramento e as correntes nos ramos; H_a representa a matriz Jacobiano de medidas das partes ativas em relação aos ângulos da fase da barra; θ é o vetor de estado que representa os ângulos de fase das tensões da barra e ε é o vetor de erro das medidas ativas. Os elementos da matriz Jacobiano H_a assume para cada medida ℓ -ésimo os seguintes valores:

Para medidas de fluxo de potência entre as barras i e k , P_{ik} :

$$H_a(\ell, i) = 1 \quad (7)$$

$$H_a(\ell, k) = -1 \quad (8)$$

Para o fluxo que flui de i para k , a medida P_{ik} receberá o valor 1 para a barra i e -1 para barra k . Os valores zero serão dados às barras que não estão no mesmo ramo que o medidor.

Para medidas de injeção de potência na barra i , P_i :

$$H_a(\ell, i) = n \quad (9)$$

$$H_a(\ell, k) = -1 \quad (10)$$

Onde n é o número de barras que a barra i está conectada. Se uma barra não tem relação com a barra i , a medida dessa barra será 0.

Para medidas de fase na barra i , θ_i :

$$H_a(\ell, i) = 1 \quad (11)$$

A única barra que receberá valor será a barra i , as outras serão zero.

Para medidas de corrente entre as barras i e j , I_{ij} :

$$H_a(\ell, i) = 1 \quad (12)$$

$$H_a(\ell, j) = -1 \quad (13)$$

Para o fluxo de corrente que flui de i para j , a medida I_{ij} receberá o valor 1 para a barra i e -1 para a barra k . Os valores zero serão dadas as barras que não estão no mesmo ramo que o medidor.

2.3 Processo de Filtragem

Utilizando a estimação de estado linear, onde a estimativa do estado \hat{x} é dada por (5), obtêm-se a relação das medidas filtradas aplicando o valor esperado em (1):

$$\hat{z} = H \times \hat{x} \quad (14)$$

2.4 Análise Residual

A análise residual é uma técnica para processar os dados ruins, realiza-se testes para a detecção e identificação de possíveis erros na topologia da rede e erros grosseiros nas medidas. Considerando a estimação de estado linear em (1) e o processo de filtragem em (6), o vetor de medidas residuais r é:

$$r = z - \hat{z} \quad (15)$$

A presença de dados ruins é detectada através do vetor residual normalizado, segundo Handschin and Bongers (1972) na presença de um erro grosseiro as medidas ruins se destacam pois possuem maior resíduo normalizado, logo elas devem ser tratadas, eliminando-as ou as substituindo por pseudomedidas. Segue o cálculo de resíduos normalizados:

$$r_n(i) = \frac{|r(i)|}{\sqrt{E(i, i)}} \leq \gamma \quad (16)$$

Onde $\sqrt{E(i, i)}$ é o desvio padrão da i -ésima componente do vetor $r(i)$, e γ é o limiar de valor máximo para uma medida ser rotulada como não errônea.

2.5 Identificação de Medidas e Conjuntos Críticos

A eliminação ou a indisponibilidade de medidas na operação atual do sistema de potência coloca a rede sob condições críticas, sendo capaz de provocar perda de observabilidade e surgimento de medidas e conjuntos críticos.

Portanto, identificá-los permite uma avaliação correta das condições de observabilidade de um sistema sob supervisão. Uma medida i é identificada como crítica se possui resíduos e desvio padrão nulos:

$$r(i) = z(i) - \hat{z}(i) = 0 \quad (17)$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i, i)} = 0 \quad (18)$$

Um conjunto é crítico se suas medidas possuem resíduos normalizados idênticos e coeficientes de correlação unitários. Considerando i e j medidas de um mesmo conjunto temos:

$$\rho_{ij} = \frac{r_N(i)}{r_N(j)} = 1 \quad (19)$$

$$\gamma_{ij} = \frac{E(i, j)^2}{E(i, i)E(j, j)} = 1 \quad (20)$$

3. PAGERANK

O *PageRank* Page et al. (1999) é um método classificatório de páginas da web baseado no grafo gerado pelas referências que as páginas da web fazem entre si.

Considerando o processo iterativo proposto por Langville and Meyer (2006), o *PageRank* de uma página P_i na iteração $k + 1$ denotado por $r_{k+1}(P_i)$ é a soma de todos os *PageRanks* de todas as páginas que apontam para a página P_i na iteração k . Esse processo iterativo inicia-se em $r_0(P_i) = 1/n$ sendo n o número de barras e segue até a convergência, que de acordo com Page et al. (1999) o número de iterações suficientes para uma convergência satisfatória está entre 50 a 100 iterações.

$$r_{k+1}(P_i) = \sum_{P_j \in B_{P_i}} \frac{r_k(P_j)}{|P_j|} \quad (21)$$

Onde, B_{P_i} é o conjunto de páginas que apontam para P_i , ou seja, os *backlinks* de P_i , e $|P_j|$ é o número de links que saem da página P_j e que são chamados de *outlinks*. Então uma página terá um alto rank se a soma do rank de todos os seus *backlinks* for alto.

Mapeando os nós e arestas de um grafo como barras e ramos na modelagem da rede elétrica, elabora-se a matriz de conectividade M proposta por Langville and Meyer (2006) indicando as conexões de cada barra. Suas dimensões são $N \times N$ onde N é o número de barras, as linhas representam os *outlinks* e as colunas, os *backlinks*. Cada linha i representa uma conexão entre a barra i e a barra j , onde M_{ij} representa um elemento da matriz com valor 1 se existe conexão entre as barras e 0 caso contrário. Em seguida o grafo G é gerado e as medidas de centralidade de grau cg e de intermediação ci são obtidas a fim de calcular a importância I de cada aresta a , pois nós com maior importância tem maior probabilidade de serem escolhidos.

$$Ia_{ij} = \frac{ci(i)}{cg(i)} + \frac{(cg(i) + cg(j))}{\sum_{i=1}^n (\frac{cg_i}{n})} \quad (22)$$

Onde $ci(i)$ é a centralidade de intermediação do vértice i ; $cg(i)$ é a centralidade de grau do vértice i ; $cg(j)$ é a centralidade de grau do vértice j ; $\sum_{i=1}^n (\frac{cg_i}{n})$ é a média da centralidade de grau de todos os vértices de G .

Neste trabalho, a função que calcula o pagerank dos vértices de G é a função *centrality* do MATLAB que possui como parâmetros o modo de centralidade que neste caso é o pagerank, o grafo G e a importância das arestas I .

4. METODOLOGIA

4.1 Análise de Observabilidade Topológica

Para analisar a observabilidade topológica de uma rede elétrica criou-se a Metaheurística de Alocação de PMUs para Observabilidade (MAUO) composta de uma heurística construtiva (HC) e uma busca local ILS, que realiza o planejamento de sistemas de medição garantindo a observabilidade com o mínimo de PMUs possível.

O *PageRank* é aplicado no modelo de barras do sistema elétrico que é representado como um grafo para obtenção de um vetor que quantifica cada barramento do sistema por meio de ranqueamento. Com base no vetor de classificação gerado pelo *PageRank* é criado um vetor de probabilidade (VP) que define um intervalo de seleção para cada barra, onde o intervalo será entre rank anterior e a soma do rank anterior e atual. A escolha das barras é realizada de acordo com a geração de um número aleatório entre 0 e 1, o número gerado corresponde ao intervalo de uma das barras. Com isso, a barra que tem a maior probabilidade é aquele com maior rank. A construção da solução considera um vetor de barras (VB) onde cada elemento representa uma barra e um vetor de solução (VS) onde é construída a solução final e inicialmente é um vetor com elementos zeros. Seu procedimento é descrito na Figura 1.

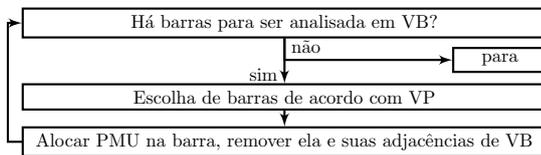


Figura 1. Heurística construtiva de MAUO

A Busca Local ILS opera sobre as soluções geradas pela HC alterando a vizinhança. Um vizinho para este problema de análise de observabilidade é a troca de um PMU alocado em uma barra de menor importância para uma barra adjacente de maior importância, analisa-se as barras de menor importância na premissa de que a PMU alocada nessa barra mude para barras de maior importância e assim menos PMUs poderem ser alocados. A verificação de vizinhos observáveis ocorre analisando se o conjunto de solução é dominante sobre o grafo. A geração de vizinhos é ilustrada pelo fluxograma da Figura 2.

Como as soluções podem ter PMUs alocados em excesso realiza-se um processo de remoção. Dessa forma é necessário conhecer a quantidade de vezes que cada barra é observada. Para manipular esse vetor com excesso de PMUs criou-se um vetor de desabilitadas (VD) que é exatamente igual a ele. Com base no vetor de observabilidade de VD, analisa-se se há barra observada apenas uma vez. Se houver, não é possível retirar PMU dessa barra ou das barras adjacentes pois afeta a observabilidade, assim retira-se as barras observadas uma vez do vetor de desabilitadas (VD), assim as demais estão habilitadas para ser

removidas. Quando o vetor VD possui apenas elementos nulos, significa que todo o sistema é observável e não é mais possível remover PMUs. O processo de remoção é representado pela Figura 3.

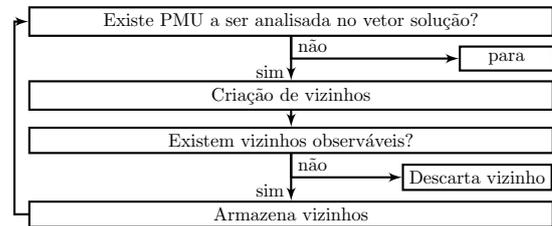


Figura 2. Criação da vizinhança de MAUO

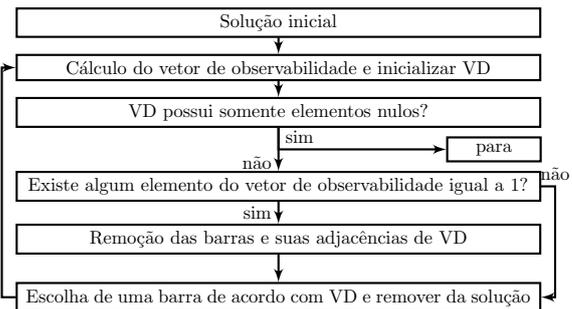


Figura 3. Processo de remoção de MAUO

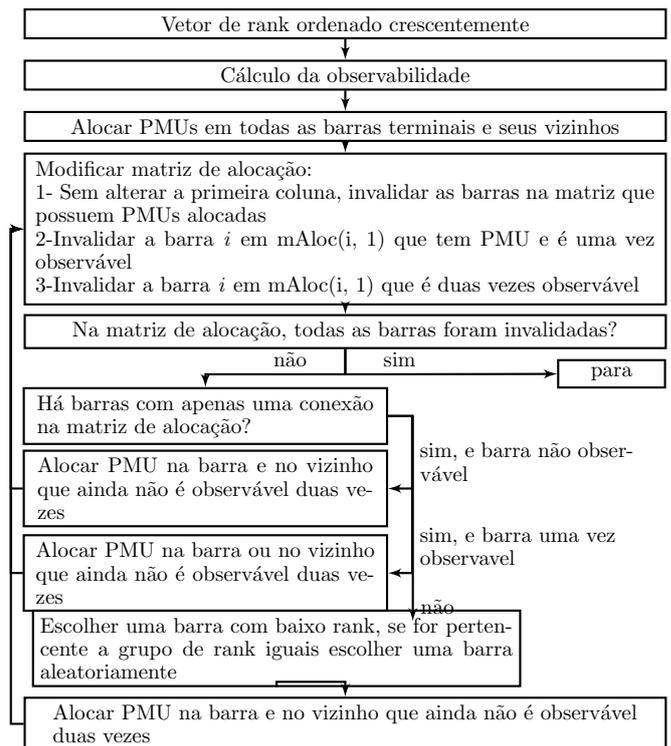


Figura 4. Heurística construtiva de MAUO

4.2 Análise de Observabilidade Topológica respeitando o requisito de perda de PMU

Na rede elétrica podem ocorrer eventos como a perda de PMUs afetando a observabilidade da rede, eventos com a qual a metaheurística MAUO não abrange, por este motivo criou-se a Metaheurística para Alocação de PMUs

para Perda de PMUs (MAUPU) descrito no fluxograma da Figura 4, que utiliza uma heurística construtiva e ILS.

Emprega-se o *PageRank* para análise das barras, ordena-se o vetor de rank e as barras serão analisadas de forma crescente. Utiliza-se uma matriz de alocação chamada de *mAloc* que possui dimensões $N \times (Cmax + 1)$, onde N é o número de barras e $Cmax$ é o número máximo de conexões da barra com mais conexões. Os elementos $mAloc(i, 1)$ representam o número de conexões da barra i , e o resto de cada linha indica a barra a qual está conectada a barra i . Os elementos da primeira coluna são subtraídos pelo número de barras adjacentes com PMU. No fluxograma da Figura 4, no processo 4 que trata da modificação da matriz, a invalidação de barras em 1 auxilia a discernir as barras que possuem PMU para verificação de observabilidade por meio de 2 e 3.

A Figura 5 ilustra o procedimento para remoção do excesso de PMU das soluções geradas pela HC da MAUPU, esse refinamento da solução se inicia pela identificação dos vetores de eliminação, observabilidade e barras_analisadas. O vetor de eliminação que será alterado até a solução final indica as barras que possuem PMUs, o vetor *barras_analisadas* representam as barras que serão analisadas e inicialmente são iguais ao vetor de eliminação, e o vetor de observabilidade indica o número de vezes que cada barra é observada.

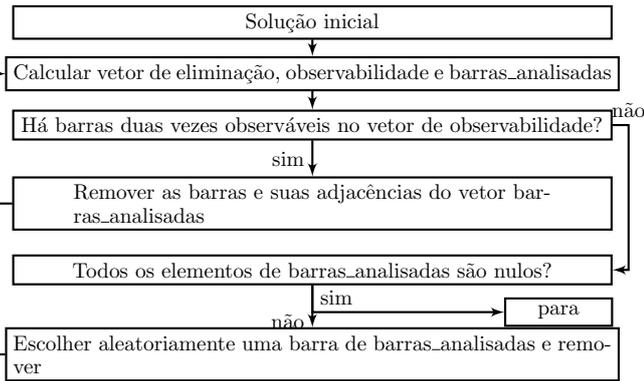


Figura 5. Processo de remoção de MAUPU

A cada remoção de barras, remove-se elas do vetor de eliminação e calcula-se o novo vetor de observabilidade, se uma barra for observada duas vezes, removê-la juntamente com suas barras adjacentes de *barras_analisadas*. A cada processo escolhe-se uma nova barra que ainda não foi analisada até a finalização onde todas as barras foram analisadas garantindo a observabilidade mesmo com perda de PMU.

4.3 Análise Numérica sobre Soluções Topológicas

A observabilidade topológica é baseada na conectividade de rede e na localização do medidor sem depender dos parâmetros do ramo e do estado do sistema, portanto, a observabilidade topológica pode não ser observável numericamente. Com base nisso, métodos numéricos foram utilizados para reforçar e flexibilizar a relação *custo* \times *risco* de um investimento em planos de medição.

A redução do custo de um plano de medição é realizada em relação aos requisitos de observabilidade, e confiabi-

lidade que é dada pela ausência de medidas e conjuntos críticos. Para avaliar um sistema e quantificar os riscos de inobservabilidade usa-se a função aptidão apresentada a seguir:

$$F.A.I = C_{sys} + obs \times P_{obs} + N_{medcrit} \times P_{medcrit} + \frac{N_{conjcrit} \times P_{conjcrit}}{N_{conjcrit} \times P_{conjcrit}} \quad (23)$$

Onde C_{sys} é o custo do sistema que representa a soma de todas as PMUs e seus canais de comunicação, *obs* indica se a configuração da rede é observável ou não, respectivamente 0 e 1, P_{obs} é um fator de penalidade para redes não observáveis, $N_{medcrit}$ é o número de medidas críticas na configuração, $P_{medcrit}$ é um fator de penalidade que indica a ocorrência de medidas críticas, $N_{conjcrit}$ é o número de conjuntos críticos na configuração e $P_{conjcrit}$ é um fator de penalidade para ocorrência de conjuntos críticos. O valor dos parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1. Valor dos parâmetros de FA.I

Parâmetros	P_{obs}	$P_{medcrit}$	$P_{conjcrit}$	C_{PMU}	C_{canal}
Valor	10^8	10^7	10^6	28×10^3	4×10^3

Com base na formulação do problema criou-se a Metaheurística para Otimização de Custos com Busca Tabu [MOCBT] que possui duas etapas, uma construtiva e uma de busca local como pode ser visto na Figura 6. A construtiva utiliza o algoritmo MAUO para a geração de soluções com requisitos de observabilidade ou ausência de medidas críticas e utiliza MAUPU para soluções que estão ausentes de conjuntos críticos. Para a etapa de busca, utilizou-se a Busca Tabu para procura de soluções. Para uma maior diversificação, cinco soluções são analisadas e para cada uma realiza-se a Busca Tabu. No final do processo é escolhida a melhor solução gerada por MAUO ou MAUPU e a melhor solução gerada pela Busca Tabu.

A Busca Tabu possui os seguintes parâmetros:

- Cardinalidade $|T|$ é o número de barras de um sistema e armazena a posição do bit alterado.
- A aspiração compara o custo atual com o melhor custo.
- Atribuiu-se a construção de 10 vizinhos a cada iteração de uma solução. Um vizinho é determinado pela alteração de um bit no seu vetor de medição.
- $BTmax$ sendo o número máximo de iterações sem melhora, $BTmax = 5$.
- Critério de parada – Definido no alcance de um certo número de iterações sem melhora na melhor solução ou quando o critério de aspiração não é satisfeito e a lista Tabu estiver cheia.

5. TESTES E RESULTADOS

Os critérios de observabilidade (α), ausência de medidas críticas (β) e ausência de conjuntos críticos (γ) são avaliados na aplicação das Metaheurísticas MAUO, MAUPU e MOCBT nos sistemas IEEE de 14, 30, 118 e 300 barras e seus resultados são comparados nas tabelas a seguir.

Em todos os planos apresentados, o MOCBT se mostrou igual o melhor em termos de otimização do custo e do número de PMUs na criação dos planos de medição garantindo os critérios aplicados. Isto se justifica por sua

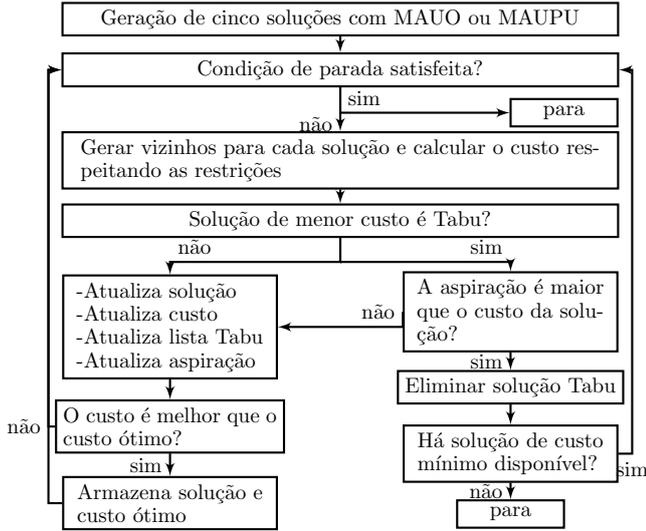


Figura 6. Fluxograma de MOCTS

natureza numérica onde é possível o controle de critérios mais específicos de medidas e conjuntos críticos.

Para o sistema de 300 barras, o número de PMUs alocados para o critério de observabilidade (94) ainda é maior do que o encontrado na literatura, como por exemplo em Cruz (2016), que encontrou um valor de 87 PMUs para este critério. Consequentemente, nos demais critérios, o número de PMUs é maior que o esperado. Isso significa uma maior robustez no plano de medição, já que tal resultado permitiu obter redução máxima no número de medidas e conjuntos críticos, mas também significa maior custo.

Baldwin et al. (1993) defende que não existe um valor estático do mínimo percentual de medidores que garantam a observabilidade em condições normais e que este valor pode variar entre 25% e 33% do total de barras de um sistema. Assim percebe-se que mesmo o resultado para o critério de observabilidade no sistema de 300 barras, está dentro de uma faixa aceitável.

TABELA 2. Resultado para o sistema IEEE 14 barras

Crit.	MH	NM	NP	R\$X10 ³	N _{mc}	N _{cc}	Tempo
α	MAUO	14	4	168	14	0	0.004
	MOCBT	14	4	168	14	0	0.039
β	MAUO	22	6	256	2	4	0.005
	MOCBT	25	7	296	0	0	0.061
γ	MAUPU	40	10	440	0	2	0.015
	MOCBT	38	11	460	0	0	0.045

TABELA 3. Resultado para o sistema IEEE 30 barras

Crit.	MH	NM	NP	R\$X10 ³	N _{mc}	N _{cc}	Tempo
α	MAUO	37	10	428	0	0	0.020
	MOCBT	35	10	420	0	0	0.040
β	MAUO	45	12	516	5	10	0.009
	MOCBT	54	16	664	0	0	0.066
γ	MAUPU	84	21	924	0	3	0.036
	MOCBT	82	24	1000	0	0	0.122

TABELA 4. Resultado para o sistema IEEE 118 barras

Crit.	MH	NM	NP	R\$X10 ³	N _{mc}	N _{cc}	Tempo
α	MAUO	156	32	1520	0	0	0.344
	MOCBT	145	32	1476	0	0	1.633
β	MAUO	187	46	20360	22	27	0.078
	MOCBT	246	61	26920	0	0	4.393
γ	MAUPU	304	72	32320	0	26	0.481
	MOCBT	342	93	39720	0	0	9.637

TABELA 5. Resultado para o sistema IEEE 300 barras

Crit.	MH	NM	NP	R\$X10 ³	N _{mc}	N _{cc}	Tempo
α	MAUO	411	104	4556	0	0	4.917
	MOCBT	410	94	4236	0	0	14.311
β	MAUO	495	118	5140	0	0	0.521
	MOCBT	440	110	4840	0	0	17.903
γ	MAUPU	782	214	9120	0	0	3.394
	MOCBT	755	203	8704	0	0	21.765

6. CONCLUSÃO

A pesquisa referente a alocação de PMUs em sistemas elétricos de potência é vasta e permite uma abundância de técnicas e novas implementações. Neste artigo os algoritmos apresentados incluem-se neste contexto e pelos resultados obtidos pode-se concluir que estão validados. A atuação de algoritmos de análise topológica em conjunto com algoritmos de análise numérica conferiu menor tempo computacional e uma maior assertividade nos planos de medição resultantes, o que destaca a relevância de algoritmos híbridos (análise topológica e numérica) na construção de soluções. Além disso, mapeamento das redes elétricas em grafos e o uso de algoritmos de centralidade de grafos como o PageRank para classificar os barramentos da rede se mostrou eficaz. Esta pesquisa segue com a investigação de outras formas de definir a importância dos barramentos de um sistema elétrico de potência baseando-se na teoria dos grafos e nas leis de corrente e tensão que governam tais sistemas.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, M. (2013). *Power System State Estimation*. Artech House.
- 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.
- Cruz, M.A.d.R.S. (2016). Otimização da alocação de pmus em redes elétricas com infraestrutura de comunicações.
- Handschin, E. and Bongers, C. (1972). Theoretical and practical considerations in the design of state estimators for electric power systems. *Computerized Operation of Power Systems*, 104–136.
- Langville, A.N. and Meyer, C.D. (2006). *Google's PageRank and Beyond: The Science of Search Engine Rankings*. Princeton University Press, Princeton, NJ, USA.
- Liu, X., Zeng, X., Yao, L., Rashed, G.I., and Deng, C. (2018). Power system state estimation based on fusion of wams/scada measurements: A survey. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 1–6.
- Page, L., Brin, S., Motwani, R., and Winograd, T. (1999). The pagerank citation ranking: Bringing order to the

- web. Technical Report 1999-66, Stanford InfoLab. Previous number = SIDL-WP-1999-0120.
- Rocha, H.R.d.O., Silva, J.A., de Souza, J.C., and Do Coutto Filho, M.B. (2018). Fast and flexible design of optimal metering systems for power systems monitoring. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29(2), 209–218.
- Rocha, H.R., Cruz, M.A., and Silva, J.A. (2019). Metering design for power networks using observability indicators. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, 29–37.
- Uatrangjit, S. (2018). Robust state estimation of power systems based on equivalent measurement technique. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 13(2), 212–217. doi:10.1002/tee.22516. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/tee.22516>.