

METODOLOGIA PARA PROJETO DE SISTEMAS DE MEDIÇÕES HÍBRIDOS CONFIÁVEIS PARA EFEITO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO VIA ALGORITMOS EVOLUTIVOS E MATRIZ H_{Δ}^T

ALEX A. C. BOZZ, MARCOS P. VIGLIASSI, HENRIQUE F. BORGES, JOÃO B. A. LONDON JR.

*Laboratório de Análise Computacional em Sistemas Elétricos de Potência - LACO, Depto. de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo –EESC/USP
Av. Trabalhador São-carlense n°400, 13566-590 São Carlos, SP, Brasil*

E-mails: alexbozz@usp.br, mvgliassi@sel.eesc.usp.br, henriquehfb@usp.br, jbajl@sc.usp.br

Abstract— This paper proposes a methodology to design and update reliable metering systems (RMSs) for state estimation purpose. In this paper a metering system is considered as reliable if it is observable and has no critical measurements, critical sets neither critical Remote Terminal Units (RTUs). The proposed methodology can be applied to both metering systems formed of only conventional non-synchronized measurements, obtained from the SCADA systems, or to metering systems formed of SCADA and synchronized phasor measurements (hybrid systems). To allow the obtaining of RMSs, the methodology is based on the analysis of the H_{Δ}^T matrix, which is obtained from the triangular factorization of the transpose of the Jacobian matrix. In order to obtain a dependency between the reliability (technical criteria mentioned above) and the cost associated with the installation of meters and RTUs, the methodology uses an evolutionary algorithm. Consequently, the proposed methodology allows the design of RMSs with low investment. To prove the efficiency of the proposed methodology some of the several tests performed with the IEEE-30-bus system will be presented.

Keywords— Power systems, State estimation, Metering system, Synchronized phasor measurements, Evolutionary Algorithms.

Resumo — Neste artigo propõe-se uma metodologia para projeto e fortalecimento de sistemas de medição confiáveis (SMCs), para efeito de estimação de estado em sistemas elétricos de potência, ou seja, sistemas de medição observáveis e isentos de medidas críticas, conjuntos críticos de medidas e de unidades terminais remotas (UTRs) críticas. A metodologia pode ser empregada para projetar tanto sistemas de medição formados exclusivamente por medidas convencionais não sincronizadas, obtidas pelo sistema SCADA, quanto sistemas de medição formados por medidas SCADA e por medidas fasoriais sincronizadas (sistemas híbridos). Para possibilitar a obtenção de SMCs, a metodologia baseia-se na obtenção e análise da matriz H_{Δ}^T , que é obtida via um processo de fatoração triangular da matriz Jacobiana transposta. Para obter uma dependência entre a confiabilidade (critérios técnicos supracitados) e o custo associado à implantação de medidores e de UTRs, a metodologia faz uso de um algoritmo evolutivo. Dessa forma, a metodologia proposta possibilita a obtenção de SMCs com custo mínimo de investimento. Para comprovar a eficiência da metodologia proposta serão apresentados alguns dos diversos testes realizados com o sistema de 30 barras do IEEE.

Palavras-chave— Sistemas de potência, Estimação de estado, Sistemas de medição, Medidas Fasoriais Sincronizadas, Algoritmos evolutivos.

1 Introdução

A operação em tempo real dos Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) tem como principal objetivo o suprimento de energia elétrica em obediência à trilogia de continuidade, qualidade e economia de serviço.

O primeiro passo para realização da operação em tempo real é a determinação do estado operativo corrente do SEP, para, em seguida, determinar as ações de controle cabíveis. Conhecida a topologia e os parâmetros da rede elétrica, o estado operativo de um SEP, operando em regime permanente, torna-se função das tensões complexas nas suas barras (chamadas simplesmente de variáveis de estado do SEP).

Devido às grandes dimensões dos SEPs, para determinar as suas variáveis de estado utilizam-se os sistemas de telemedição, isto é, medições feitas à distância, que estão sujeitos a uma série de ruídos inerentes ao processo de telemedição (Moraes 2009). Dessa forma, para obtenção de valores mais confiáveis para as variáveis de estado dos SEPs, as telemedidas devem ser filtradas. Para isso, os centros de operação das companhias de energia elétrica dispõem de um conjunto de programas desenvolvidos em computador denominado Estimador de Estado (EE).

O EE é uma ferramenta computacional que possibilita a obtenção, em tempo real, das variáveis de estado de um SEP, através do processamento do

modelo elétrico, dos parâmetros do SEP e de um conjunto redundante de medidas analógicas com ruído obtidas em tempo real. Esse conjunto de medidas é constituído usualmente por medidas de potência ativa e reativa (fluxo nas linhas e injeção nas barras) e por medidas de magnitude de tensão nas barras obtidas através do Sistema de Aquisição e Supervisão de Dados (SCADA do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*).

Independente do estimador utilizado, o sucesso do processo de ESEEP depende da qualidade e da redundância das medidas disponíveis. A qualidade das medidas depende da precisão de todos os equipamentos envolvidos no processo de telemedição. Por outro lado, a redundância das medidas depende da quantidade, tipo e localização dos medidores e das UTRs instalados no SEP, ou seja, depende do Sistema de Medição (SM) disponível. Nesse sentido, usualmente considera-se como confiável para realização do processo de ESEEP o SM que seja observável como um todo e não possua MCs, CCMs e UTRs Críticas (J C S de Souza et al. 2005; Coser et al. 2006; Vigliassi et al. 2009; Rocha et al. 2010).

Ao longo das últimas décadas diversas metodologias têm sido desenvolvidas para projeto de novos SMs e para análise e adequação (ou fortalecimento) de SMs já existentes (Magnago & Abur 1999; London Jr et al. 2002; J C S de Souza et al. 2005;

Coser et al. 2006; Vigliassi et al. 2009; Rocha et al. 2010), sendo que algumas dessas metodologias consideram apenas os critérios técnicos supracitados, outras consideram também o custo necessário para aquisição de medidores e UTRs.

Também na tentativa de melhorar a confiabilidade do processo de EESEP, diversas pesquisas vêm investigando a possibilidade de utilização de Medidas Fasoriais Sincronizadas (MFSs), que são obtidas através das Unidades de Medição Fasorial (UMF) (Phadke 2002; A S Costa et al. 2008; Moraes 2009; London et al. 2009). Justifica-se tal interesse principalmente pelas seguintes razões: aumento da redundância de medidas; as MFSs apresentam, em geral, um nível maior de precisão do que as medidas convencionais; e as MFSs possibilitam a medição de variáveis cuja medição é inviável através das medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA, como é o caso dos ângulos de fase das tensões nodais e dos fasores de corrente nos ramos da rede elétrica.

Desenvolveram-se, assim, estimadores de estado híbridos, ou seja, estimadores que fazem uso de medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA (medidas de potência e de magnitude de tensão) e por MFSs (Zhu & Abur 2007; Zhou et al. 2006). Surgiram então metodologias para projeto de SMs híbridos (Chen & Abur 2006).

Este artigo propõe o desenvolvimento de uma metodologia para projeto e fortalecimento de SMs híbridos confiáveis, que além de considerar os critérios técnicos de confiabilidade para efeito de estimação de estado (observabilidade e ausência de MCs, CCMs e UTRs críticas), considera ainda as medidas convencionais e fasoriais sincronizadas num mesmo SM e também o custo associado à instalação do sistema. Para explorar o enorme espaço de possibilidades, utilizar-se-á da meta-heurística algoritmo evolutivo, especificamente o AERS desenvolvido em (Vigliassi et al. 2009).

É importante destacar que em (Vigliassi et al. 2009) foi proposta uma metodologia para projeto e fortalecimento de SMs baseado na matriz H_{Δ}^T e em algoritmo evolutivo. Porém, tal metodologia não considerava a utilização de MFS, o que já é uma realidade nos SEPs. Portanto, o caráter de ineditismo da publicação se deve principalmente ao fato de a metodologia proposta possibilitar o tratamento simultâneo, de maneira simples e direta, de medidas convencionais não sincronizadas obtidas pelo sistema SCADA e de medidas fasoriais sincronizadas obtidas pelas unidades de medição fasoriais. Portanto, através da metodologia é possível o fortalecimento de um SM híbrido utilizando apenas medidas convencionais ou convencionais e MFSs simultaneamente. Dessa forma, a metodologia permite a obtenção de SMCs híbridos.

2 Formulação do Problema

O problema de obtenção de SMC para efeito de EESEP é um problema de otimização, onde o objetivo é

a minimização dos custos de implantação do SM, considerando alguns requisitos e visando o processo de EE (Antonio et al. 2001). São eles:

1. *Observabilidade*. Garantir a observabilidade do sistema em situações normais de operação ou na existência de contingência. Portanto, na perda de medidas ou de UTRs/UMFs o sistema deve permanecer observável como um todo, ou seja, deve possibilitar a estimação de todas as variáveis de estado;
2. *Confiabilidade*. Apresentar um adequado nível de redundância para tornar possível a detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros. Ou seja, nível de redundância tal que garanta a ausência de medidas críticas (MCs) e de conjuntos críticos de medidas (CCMs).

Portanto, o problema pode ser formulado da seguinte forma:

$$\text{Min} (C_{med. scada} + C_{UTR} + C_{UMF \text{ de barra}} + C_{UMF \text{ de ramo}}) \quad (1)$$

s.a. requisitos de observabilidade e redundância

sendo: $C_{med. scada}$ o custo para aquisição e instalação de medidores convencionais; C_{UTR} o custo para aquisição e instalação de UTRs; $C_{UMF \text{ de barra}}$ o custo para aquisição e instalação de Unidades de Medidas Fasoriais (UMFs) com canal de comunicação para uma medida fasorial de tensão e n_d medidas fasoriais de corrente, sendo n_d o número de linhas adjacente à barra onde a UMF está instalada e $C_{UMF \text{ de ramo}}$ o custo para aquisição e instalação de UMFs com apenas dois canais de comunicação, um para uma medida fasorial de tensão e um para uma medida fasorial de corrente.

Em razão de o problema formulado em (1) ser de natureza combinatória, com um grande número de soluções possíveis, não se dispõe de ferramentas analíticas eficientes para a sua solução. Eis a razão de a metodologia proposta neste artigo fazer uso de Algoritmos Evolutivos (AEs).

3 Observabilidade Algébrica

A observabilidade do SEP depende da topologia da rede, a localização e o tipo de medidas. A topologia da rede pode mudar devido à operação de comutação diária, assim como pode ocorrer à perda de medidas e até mesmo UTRs/UMFs. Por isso é necessário projetar as medidas adequadas para manter a observabilidade.

Nesta seção apresentaremos a condição para garantir a observabilidade algébrica de um SM híbrido.

3.1 Análise de Observabilidade considerando apenas medidas SCADA

Em (Krumphol et al. 1980) demonstrou-se que a estimação de estado linear pode ser adotada para

análise de observabilidade. Em razão disso, a metodologia proposta neste artigo considera o modelo linear, conhecido também como modelo $P\theta$ (potência ativa – ângulo de tensão), e a correspondente matriz Jacobiana será chamada de matriz H .

De acordo com a definição de observabilidade algébrica, apresentada em Krumpholz e Clements (1980), um sistema é $P\theta$ algebricamente observável se:

$$\text{Posto}(H) = n - 1, \quad (2)$$

sendo $\text{Posto}(H)$ o número de linhas linearmente independentes da matriz H e $(n-1)$ o número de ângulos de fase de tensão a serem estimados (n representa o número de barras do sistema).

Face ao exposto, para verificar se um SEP é observável, basta realizar a fatoração triangular da correspondente matriz H , conforme apresentado em (citar os artigos de 2002 e 2007).

2.1 Análise de Observabilidade considerando sistemas de medição híbridos

A condição de observabilidade apresentada na equação (2) é válida apenas no processo de EESEP convencional, isto é, sem considerar MFSs. Isto porque no processo convencional uma das barras do SEP é escolhida como referência angular. Assim, atribui-se o valor zero para o ângulo de tensão dessa barra e os ângulos estimados, para as demais barras, são referentes ao daquela barra. Tendo em vista que não é usual a monitoração direta dos ângulos de tensão via sistema SCADA convencional, essa prática é apropriada, uma vez que é irrelevante, para o processo de EESEP, o valor absoluto do ângulo de tensão da barra de referência. Porém, quando estão presentes medidas convencionais e MFSs, aquela prática não é adequada. Isto porque as MFSs de ângulo de tensão são obtidas a partir de outro referencial, que é determinado pelo instante de tempo fornecido pela recepção do sinal emitido pelo sistema GPS.

Dentre as diversas soluções propostas na literatura para contornar esse problema da escolha da referência de ângulo de tensão, destaca-se a apresentada em Zhu e Abur (2007).

De acordo com essa formulação, as MFSs são tratadas como medidas convencionais, e, na existência de pelo menos uma medida de ângulo de tensão, a referência de ângulo vai ser determinada pelo sinal emitido pelo sistema GPS. Porém, na ausência de tais medidas, utilizar-se-á a prática convencional, ou seja, uma das barras do sistema é escolhida como referência angular.

Face ao exposto, a análise e restauração da observabilidade de sistemas de medição híbridos pode ser realizada através da análise da correspondente matriz Jacobiana linear.

Para incluir as MFSs na matriz Jacobiana linear são necessárias algumas aproximações, conforme apresentado em (Chen e Abur, 2006; London Jr. et al., 2009).

Considerando que a impedância de todos os ramos seja igual a 1 p.u. e as tensões em todas as barras sejam igual a 1 p.u., a parte real do fasor de corrente da barra i para barra j pode ser modelado como:

$$\text{real}(I_{ij}) \cong \theta_i - \theta_j, \quad (3)$$

sendo θ_i e θ_j os ângulos de tensão das barras i e j , respectivamente (Chen & Abur 2006).

Ante o exposto, podemos representar as medidas de ângulo de fase de tensão como se fossem medidas de fluxo de potência em ramos fictícios, com impedância unitária, que conectam as barras onde as medidas foram realizadas com uma barra fictícia, representando a referência de GPS. Já as MFSs de corrente são representadas como fluxos nos respectivos ramos. Na (Fig. 1) apresenta-se a estrutura de uma matriz Jacobiana possuindo uma MFS de ângulo de fase de tensão na barra i (θ_i) e uma MFS de injeção de corrente no ramo conectando as barras i e j (C_{i-j}).

$$\begin{array}{l} \text{Barra } i \\ \vdots \\ \text{Barra } j \\ \text{GPS} \end{array} \begin{array}{cccc} \cdots & \theta_i & C_{i-j} & \cdots \\ \left[\begin{array}{cccc} \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \vdots \\ \vdots & \mathbf{0} & \mathbf{-1} & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{-1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{array} \right] \end{array}$$

Figura 1. Matriz Jacobiana linear (sistema híbrido).

4 Fundamentação Teórica

Nesta seção será apresentada a metodologia proposta neste artigo, para projeto e fortalecimento de SMCs híbridos, isto é, SMs formados por medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA e por MFSs obtidas pelas UMFs observáveis e isentos de MCs, CCMs e UTRs crítica

A. Obtenção de um SMC via H_{Δ}^T

Para a obtenção de um SMC o AERS baseia-se no método proposto por (London Jr et al. 2001). Entretanto, optou-se por trabalhar com a matriz H_{Δ} transposta para facilitar a análise da matriz.

Considerando o modelo $P\theta$, a matriz H_{Δ}^T apresenta a seguinte estrutura apresentada na (Fig. 2).

$$H_{\Delta}^T_{(n) \times (m)} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cc|cc} & & & \\ & I & & R \\ \hline & & & \\ \hline 0 & \cdots & \cdots & 0 \end{array} \right] \end{array}$$

Figura 2. Matriz H_{Δ}^T para um sistema observável

Sendo I a submatriz identidade, de dimensão $(n-1) \times (n-1)$, S a submatriz das medidas suplementares, de dimensão $(n-1) \times [m-(n-1)]$, n representa o número de barras do sistema e m o número de medidas.

Analizando os elementos não nulos que aparecem em uma linha da H_{Δ}^T , é possível identificar os chamados conjuntos p -críticos de medidas, ou seja, conjunto de “ p ” medidas ($p \geq 1$) associadas a um SEP

observável, que, se perdidas, tornam tal sistema não observável. Entretanto, a remoção de qualquer conjunto de k medidas, pertencentes a um conjunto p -crítico, com $k < p$, não causa a perda da observabilidade do sistema.

B. Algoritmo evolutivo por representação sequencial

O AERS baseia-se no método desenvolvido por (London Jr et al. 2002) que possibilita a obtenção de um SMs confiáveis, a partir da análise de uma lista contendo todos os medidores candidatos a serem instalados em um sistema, com a indicação da correspondente UTR candidata. Analisando essa lista, o método seleciona os medidores e UTRs que devem ser instaladas, para obtenção de um SM confiável. Isso é realizado através da obtenção e análise da matriz H_{Δ}^T . Dependendo da seqüência com que os medidores candidatos estão dispostos na lista, o método fornece diferentes SMs, selecionando, para instalação, números distintos de medidores e UTRs. Em razão de o custo de um sistema de medição depender do número de medidores e UTRs instalados, o AERS trabalha da seguinte forma:

1. Através de AE geram-se diversas listas (indivíduos) contendo todos os medidores candidatos, sendo que, em cada uma das listas, esses medidores aparecem em uma ordem distinta;
2. Cada uma das listas (indivíduos), geradas no passo anterior, é analisada pelo método proposto por (London Jr et al. 2002), que fornece, como resultado, o número de medidores e UTRs que devem ser instalados para obtenção de um SM confiável. De acordo com esse número de medidores e UTRs calcula-se o custo do sistema de medição obtido (função de aptidão), que será o parâmetro a ser analisado para definir a solução “ótima” do problema, isto é, para definir qual das listas (indivíduo) possibilitou a obtenção do SM confiável com menor custo.

Conforme mencionado, no AERS o indivíduo é um *array* (Fig. 3), cujas posições (genes) correspondem a uma determinada medida passível de ser instalada SEP. Por exemplo, para o sistema do IEEE de 30 barras os indivíduos terão 112 posições, sendo 30 representando as medidas de injeção, 82 representando as medidas de fluxo. É importante destacar que todos os indivíduos gerados pelo AERS sempre serão factíveis, pois, apresentam todos os medidores do SEP.

Med. 8 (I_1)	Med. 5 (F_{2-4})	Med. 12 (F_{2-1})	(...)	Med. 3 (I_2)	Med. 6 (F_{1-2})	Med. 10 (F_{5-6})
---------------------	-------------------------	--------------------------	-------	---------------------	-------------------------	--------------------------

Figura 3. Indivíduo do AERS

Outro fator importante a ser destacado é apresentado em (Vigliassi 2009), no qual se demonstrou que a representação sequencial apresenta problemas para

aplicação de forma direta do *crossover*, pois podem aparecer medidores duplicados em um mesmo indivíduo. Para resolver esse problema, o AERS utiliza um vetor auxiliar, que foi chamado de Vetor de Controle (VC), para verificar se o medidor já foi utilizado. Cada posição do VC corresponde a um determinado medidor e será igual a 1 (um) se o medidor foi instalado e 0 (zero) caso contrário.

A mutação utilizada no AERS promove a troca de posições dos genes no indivíduo. Como a posição das medidas no indivíduo é importante para a obtenção do SMC, pois é durante a fatoração (que ocorre da esquerda para a direita) da H_{Δ}^T que as medidas são instaladas, a troca de alguns genes no início do indivíduo é mais substancial que a troca de alguns genes no final do indivíduo.

5 Metodologia Proposta

A metodologia proposta possibilita a obtenção de projeto de novos SMs híbridos confiáveis, bem como o fortalecimento de SMs híbridos já existentes, através da seleção para instalação de medidores convencionais, UTRs e UMFs.

Através da obtenção e análise da estrutura da matriz H_{Δ}^T , a metodologia possibilita a obtenção de SMs confiáveis. Entretanto, para possibilitar a consideração simultânea de medidas convencionais e MFSS, a matriz H_{Δ}^T considerada em (London Jr et al. 2002) é estendida para permitir o processamento de sistemas híbridos, conforme apresentado em (London et al. 2009; Borges 2011). Como tal método não possui dependência do custo do SM e os critérios técnicos, a metodologia proposta faz uso do AERS proposto em (Vigliassi et al. 2009). Entretanto, diversas alterações no código do programa computacional que implementa o AERS foram realizadas para aumentar a eficiência computacional da metodologia proposta.

A metodologia proposta é dividida em três fases. São elas:

A. Fase 1

Assim como o AERS, a partir da análise de uma lista (indivíduo) contendo todos os medidores que podem ser instalados no sistema é montada a matriz H^T (Fig. 4), de acordo com a seqüência de medidores da lista, ou seja, a seqüência das colunas dessa matriz corresponderá exatamente à seqüência em que os medidores aparecem na lista (lembrando que as colunas e linhas da matriz H^T correspondem às medidas e às variáveis de estado a serem estimadas respectivamente). Como a seleção de medidores, UTRs e UMFs, que devem ser instalados para a obtenção de um SMC, ocorre durante o processo de obtenção da H_{Δ}^T (fatoração da H^T), que pode exigir permutações de colunas, dependendo da seqüência com que os medidores são dispostos na lista, a metodologia fornecerá diferentes SMCs.

$$H^T = \left[\begin{array}{c|c|c|c} \text{MED.} & \text{MED.} & \text{UTRs} & \text{UMFs} \\ \text{INST.} & \text{CAND.} & \text{CAND.} & \text{CAND.} \end{array} \right]$$

Figura 4. Estrutura da matriz Jacobiana

As MFSs, ou seja, medidas de UMFs, estão dispostas no final da matriz para dar preferência para instalação de medidas convencionais.

B. Fase 2

A segunda fase consiste na obtenção e análise das H_{Δ}^T , que são obtidas através da fatoração triangular das matrizes H^T .

A obtenção da matriz H_{Δ}^T e a análise da mesma é feita pelo método para identificação de MCs e CCMs de (London et al. 2007) e pelo método para obtenção de SMC de (London Jr et al. 2002). Porém, na metodologia proposta, o método da H_{Δ}^T foi implementado com algumas modificações propostas por (Moreira 2006). Essas modificações tornam a execução do programa mais rápida, pois no momento de identificação das MCs e CCMs o método “simula” refatorações parciais apenas na submatriz R, isto é, não se altera efetivamente o valor de nenhum elemento da submatriz R (Moreira 2006).

C. Fase 3

Após a execução das Fases 1 e 2, cada indivíduo (ou cromossomo) analisado corresponderá a um SM confiável. O próximo passo é o cálculo do fitness de cada um deles, ou seja, calcular o custo de cada SM confiável que foi gerado. Para isso, considerar-se-á a função fitness definida pela Equação 1, e os de medidores, UTRs e UMFs (aquisição e instalação) apresentados na Tabela I.

Tabela 1. Custo monetário dos equipamentos.

Custo em Unidade Monetária (UM)			
Sistema SCADA		UMFs	
Medidores	UTR	De Ramo	De Barra
4,5	100	135	$100 + 5 \times N_d$

Quando os recursos financeiros não forem suficiente ou a relação custo vs qualidade estiver alta, tornando os investimentos inviáveis, a metodologia possibilita a flexibilização, portanto, permite a obtenção dos seguintes sistemas de medição:

Tipo 1: Sistema de medição observável;

Tipo 2: Sistema de medição observável e isento de MCs;

Tipo 3: Sistema de medição observável e isento de MCs e CCMs;

Tipo 4: Sistema de medição observável e isento de MCs, CCMs e UTRs críticas.

Importa destacar que a metodologia proposta não preocupar-se-á diretamente com o nível de redundância das MFSs na obtenção de SMs híbridos observáveis. O nível de redundância das MFSs será definida pelo usuário através da quantidade de UMFs que deseja-se instalar. Portanto, caso seja de interesse instalar apenas uma UMF em um SM híbrido do Tipo 4, a metodologia não preocupar-se-á com a criticidade da UMF, pois, não será possível instalar outra UMF.

6 Testes e Resultados

A metodologia foi implementado utilizando a linguagem de programação C, sendo executado em um microcomputador Core i5 2,67 GHz, com 4 GB de memória RAM e Sistema Operacional Windows 7. Para realização dos testes foram utilizados o sistema de 30 barras do IEEE.

Para todos os testes realizados a população é formada de 120 indivíduos e o critério de parada utilizado foi a execução de 100 gerações e a taxa de mutação foi de 10%.

Para os testes foi utilizado o sistema de 30 barras do IEEE da (Fig. 5), no qual possui quatro UMFs já existentes, portanto, trata-se de um sistema não observável no qual deve ser feito o seu fortalecimento. Lembrando que para cada teste, foram avaliados os requisitos de Observabilidade, Ausência de MCs, CCMs e UTRs Críticas.

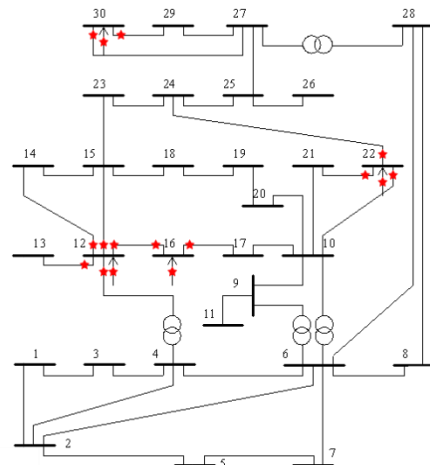


Figura 5. SM a ser fortalecido

Tabela 2. Resultados dos testes.

TESTE	CONVENCIONAIS			UMFs		CUSTOS (UM)
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo	
1	11	8	9	-	-	1985,5
2	12	16	16	-	1	1861,0
3	11	16	16	-	2	1991,5
4	12	15	15	-	3	2026,5

Para o fortalecimento do SM foram feitos 4 testes, conforme Tabela 2. No primeiro teste foram instaladas apenas medidas convencionais para garantir os requisitos supracitados. O SM encontrado pode ser observado na (Fig. 6), assim como a evolução do fitness para a obtenção do SMC (Fig. 7).

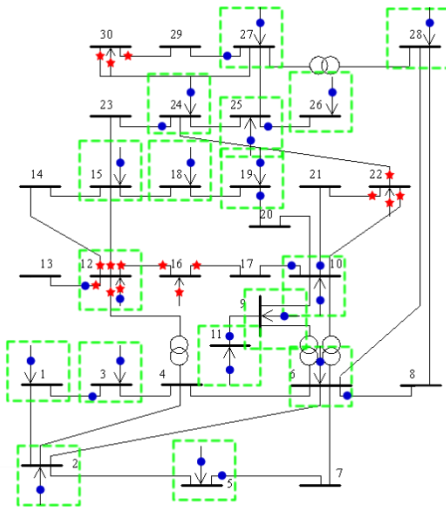


Figura 6. SM fortalecido somente com medidas convencionais

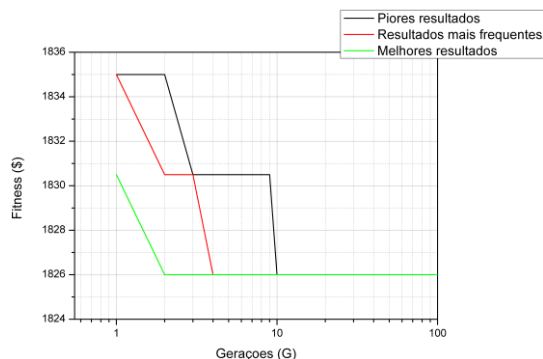


Figura 7. Evolução do fitness para o fortalecimento apenas com medidas convencionais

Para os demais testes, além das medidas convencionais, foi permitida a instalação de UMFs no processo de fortalecimento do SM. A (Fig. 9) mostra o SM híbrido encontrado para o teste 4, no qual foi permitida a instalação de 4 UMFs. A (Fig. 8) mostra a evolução do fitness para a obtenção do SMC para o teste 4.

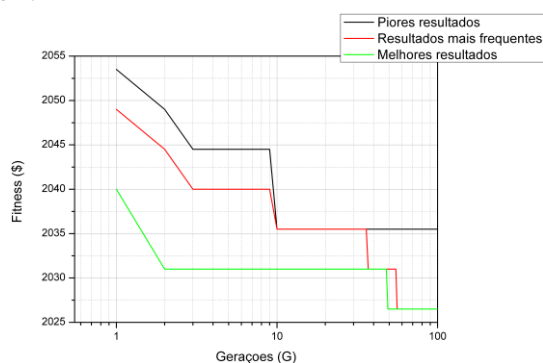


Figura 8. Evolução do fitness para o fortalecimento com medidas convencionais e 4 UMFs

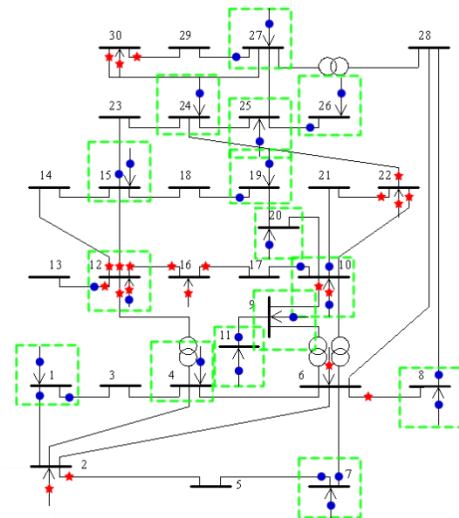


Figura 9. SM fortalecido com medidas convencionais e fasoriais sincronizadas

7 Conclusões

Neste artigo foi proposta uma metodologia para obtenção de SMCs híbridos utilizando o AERS, que através do AE combinado com as propriedades da matriz H_{Δ}^T para SMs híbridos garante gerar apenas soluções factíveis e de baixo custo. A metodologia pode ser usada como uma ferramenta de auxílio tanto para projeto como fortalecimento de um SM híbrido já existente, bem como bastante flexível com os critérios técnicos.

Os resultados das simulações mostraram a eficiência da utilização da metodologia, que possibilita a obtenção SMCs híbridos de baixo custo. Vale ressaltar que a metodologia permite também a obtenção de SMCs convencionais de baixo custo, na qual testes iniciais mostraram que os resultados obtidos pela metodologia proposta são melhores que os obtidos por outras metodologias da literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP e ao CNPQ pelo suporte financeiro desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

- Antonio, A.B., Torreato, J.R.A. & Do Coutto Filho, M.B., 2001. Meter placement for power system state estimation using simulated annealing. In *Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto*. p. 5 pp. vol.3.
- Borges, G.P., 2011. *Análise de Observabilidade e Identificação de Medidas Críticas para Sistemas de Medição Formados por Medidas Convencionais e Fasoriais Sincronizadas*. Dissertação. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência. Available at: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/t>

- de-08062011-150636/publico/Guilherme.pdf [Accessed November 28, 2012].
- Chen, J. & Abur, A., 2006. Placement of PMUs to Enable Bad Data Detection in State Estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 21(4), pp.1608–1615.
- Coser, J., Costa, A. S. & Rolim, J.G., 2006. Metering Scheme Optimization With Emphasis on Ensuring Bad-Data Processing Capability. In *Power Systems, IEEE Transactions on*. pp. 1903–1911.
- Costa, A S, Meyer, B.T. & Decker, I.C., 2008. Análise dos Benefícios de Medições Fasoriais Sincronizadas quanto ao Desempenho da Estimção de Estado em Sistemas de Potência. In *XVII Congresso Brasileiro de Automática*.
- Krumphol, G.R., Clements, K.A. & Davis, P.W., 1980. Power system observability: a practical algorithm using network topology. , (4), pp.1534–1542.
- London, J.B.A. et al., 2009. Redundancy and Observability Analysis of Conventional and PMU Measurements. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 24(3), pp.1629–1630.
- London, J.B.A., Bretas, N.G. & Alberto, L.F.C., 2007. Analysis of measurement set qualitative characteristics for state estimation purposes. In *IET Generation, Transmission & Distribution*. pp. 39–45 Vol. 1.
- London Jr, J.B.A., Alberto, L.F.C. & Bretas, N.G., 2001. Identificação do nível de redundância das medidas para efeito de estimação de estado em sistema de potência. *Revista Controle & Automação*, 12(2), pp.141–147.
- London Jr, J.B.A., Brito, G.L.R. & Bretas, N.G., 2002. Método para locação de medidores e UTRs para efeito de estimação de estado. In *XIV Congresso Brasileiro de Automática*. pp. 629–635.
- Magnago, F.H. & Abur, A., 1999. A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages. In *Power Industry Computer Applications, 1999. PICA '99. Proceedings of the 21st 1999 IEEE International Conference*. pp. 3–8.
- Moraes, R.M. de, 2009. *Sincrofasores em sistemas de potência: aplicações na estimação de Estado*. Tese. Universidade Federal Fluminense.
- Moreira, E.M., 2006. *Estimção de Estado em Sistemas Elétricos de Potência: Programa para análise e atualização das características qualitativas de conjuntos de medidas*. Dissertação. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência.
- Phadke, A.G., 2002. Synchronized phasor measurements-a historical overview. In *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. pp. 476–479 vol.1.
- Rocha, H.R.O., Souza, Julio C. S. DE & Filho, M.B.D.C., 2010. Construção de Planos de Medição Robustos para a Estimção de Estado em Sistemas de Potência via Metaheurística Colônia de Formigas. In *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*. pp. 4567–4572.
- De Souza, J C S et al., 2005. Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios. In *Power Systems, IEEE Transactions on*. pp. 1700–1708.
- Vigliassi, M.P. et al., 2009. Metering system planning for state estimation via evolutionary algorithm and HAt matrix. In *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. pp. 1–6.
- Vigliassi, M.P., 2009. *Projeto de sistemas de medição confiáveis para efeito de estimação de estado via algoritmos evolutivos e matriz HAt*. Dissertação. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência. Available at: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-04012010-101933/> [Accessed September 4, 2012].
- Zhou, M. et al., 2006. An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 21(4), pp.1930–1937.
- Zhu, J. & Abur, A., 2007. Effect of Phasor Measurements on the Choice of Reference Bus for State Estimation. In *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*. pp. 1–5.