

HEURÍSTICA GRASP APLICADA AO PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO PARA A SUPERVISÃO DE REDES ELÉTRICAS

JOHNNY E. V. TAFUR, HELDER R. O. ROCHA, LUIS S. OCHI,
EDWIN B. M. MEZA, JULIO C. S. DE SOUZA, MILTON B. DO COUTTO FILHO

Instituto de Computação, UFF

Rua Passo da Pátria 156 - Bloco D -404, São Domingos Niterói - RJ - CEP: 24210-240

*jtafur@ic.uff.br, hrocha@ic.uff.br, satoru@dcc.ic.uff.br,
emitacc@ucam-campos.br, julio@ic.uff.br, mbrown@ic.uff.br*

Abstract— This work presents a heuristic GRASP for the problem of meter placement for power system state estimation. The meter placement is considered a NP-hard problem. The GRASP is employed to achieve a trade-off between investment cost and reliability of the state estimation process. Tests with the IEEE-14 and IEEE-118 bus were carried out to validate the proposed algorithm.

Keywords— GRASP, State Estimation, Supervision of Electrical Power Network

Resumo— Este trabalho apresenta uma heurística GRASP para o problema de planejamento de sistemas de medição para Estimação de Estado em sistemas de potência. O planejamento de sistemas de medição é considerado um problema de otimização da classe NP-Difícil. A heurística GRASP é empregada para obter uma relação de compromisso entre o custo do plano de medição e a confiabilidade do processo de estimação de estados. Testes com os sistemas IEEE 14 e IEEE 118 barras são realizados, com o intuito de validar o algoritmo proposto.

Palavras-chave— GRASP, Estimação de Estado, Supervisão de Redes Elétricas.

1 Introdução

A Estimação de Estado (EE) compreende aplicativos responsáveis pela construção de uma base de dados completa e confiável a ser utilizada por funções avançadas em um Sistema de Gerenciamento de Energia, Monticelli (1999). A redundância dos dados é fundamental para o sucesso da EE. Com um nível adequado de redundância, a EE pode lidar com o problema da detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros, além de permitir que a perda temporária de medidas não comprometa a qualidade/confiabilidade das estimativas produzidas. A redundância é avaliada considerando-se número, tipo e distribuição topológica dos pontos de medição em uma rede elétrica, Souza (2005).

Sistemas de medição altamente redundantes são sempre desejáveis. Uma vez que a quantidade de dados está diretamente relacionada ao investimento em equipamentos de medição e transmissão de informações, muitas vezes a redundância sofre cortes quando há revisão gerencial de alocação de fundos. Por outro lado, durante a operação dos sistemas, mudanças na configuração da rede ou um funcionamento temporariamente inadequado do sistema de aquisição de dados reduzem o nível de redundância para a Estimação de Estado. Até mesmo níveis críticos podem ser alcançados, caracterizando situações de perda iminente de observabilidade e desempenho inadequado de rotinas de processamento de erros grosseiros.

Neste trabalho, para resolver o problema do Planejamento de Sistemas de Medição para a EE, é proposto um algoritmo baseado na metaheurística GRASP. Para avaliar tal algoritmo foram realizados testes com os sistemas teste IEEE-14 e IEEE-118 barras da literatura. Os resultados são comparados com resultados obtidos com um Algoritmo Genético (AG).

2 Planejamento de Sistemas de Medição

A redundância dos dados é fundamental para um processo adequado de EE. O termo redundância refere-se a um excedente de medidas tomadas no sistema em relação a um número mínimo necessário para estimar todas as variáveis de estado.

Quanto maior e mais qualificada for a redundância, maiores serão as chances de se constituir um processo de EE bem sucedido. De forma antagônica, crescem os investimentos em medição e, portanto, uma solução de compromisso entre redundância e custos associados deve ser encontrada.

A alocação de pontos de medição em redes de transmissão pode ser vista como um problema de otimização, onde o objetivo é obter uma solução que minimize os custos de investimento em Unidades Terminais Remotas (UTRs) e medidores e para garantir um desempenho desejável para a função EE.

O planejamento de sistemas de medição pode ser representado por um problema de otimização formulado como:

$$\begin{aligned} & \text{Min } (C_{\text{med}} + C_{\text{UTR}}) & (1) \\ & \text{s/a observabilidade} \\ & \text{ausência de medidas críticas} \\ & \text{ausência de conjuntos críticos} \end{aligned}$$

onde C_{med} representa o custo dos medidores e C_{UTR} o custo das UTRs a instalar para um adequado processo de EE.

Na metodologia proposta é possível tratar o problema (1) de forma tal que o atendimento aos requisitos pode ser feito apenas parcialmente. A flexibilização do atendimento aos requisitos permite uma melhor exploração da relação de compromisso entre o custo de investimentos e a qualidade do plano de medição (do ponto de vista da supervisão da rede).

Na formulação proposta neste trabalho, os requisitos de desempenho considerados são: observabilidade, ausência de medidas e conjuntos críticos. A observação do atendimento a tais requisitos garante a ausência de níveis críticos de redundância, que comprometem o desempenho da função EE e, conseqüentemente, a qualidade da supervisão da rede.

A determinação dos níveis críticos de redundância pode ser dada através do modelo de estimação de estados linear, Coutto (2001).

2.1. Estimação de Estados Linear

Para uma determinada configuração da rede elétrica, o estado operativo do sistema e as telemidas a serem processadas se relacionam através de:

$$z = Hx + \varepsilon \quad (2)$$

Sendo z o vetor de medidas, de dimensão ($m \times 1$); x o vetor de estado verdadeiro, de dimensão ($n \times 1$); ε o vetor de erros associados às medidas z ; H a matriz Jacobiana de dimensão ($m \times n$), obtida através da linearização das equações de fluxo de potência.

A função objetivo segundo o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) assume a seguinte forma:

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

2.2. Análise de Observabilidade

A avaliação do atendimento ao requisito de observabilidade é realizada através da verificação da não singularidade da matriz de ganho G da EE.

$$G = (H^T R^{-1} H) \quad (4)$$

A verificação de deficiência de medidas para a observabilidade é realizada também levando-se em conta o desacoplamento entre os conjuntos de grandezas P- θ (potência ativa - ângulo) e Q-V (potência reativa - magnitudes de tensão), Clements (1983). Considerando medidas tomadas aos pares (ativa e reativa), pode-se fazer a análise apenas pelo conjunto P- θ .

2.3. Processo de Filtragem

A estimativa do estado \hat{x} que minimiza $J(x)$ pode ser obtida por:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = H^T R^{-1} [z - H(\hat{x})] \quad (5)$$

$$\hat{x} = G^{-1} H^T R^{-1} z \quad (6)$$

Onde $G = (H^T R^{-1} H)$ é conhecida por matriz-ganho.

2.4. Análise Residual

Após a estimação das medidas realiza-se a avaliação da consistência dos resultados obtidos, através da análise dos resíduos. O vetor dos resíduos da estimação r é definido como a diferença entre o valor medido e o correspondente valor estimado:

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

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (8)$$

O vetor dos resíduos r pode ser interpretado como uma variável aleatória com Distribuição Normal, valor esperado zero e matriz de covariância E , dada por:

$$E = R - H (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T \quad (9)$$

Na presença de apenas um erro grosseiro (EG), a medida errônea é aquela que apresenta o maior resíduo normalizado, Handschin (1975). Isto justifica a utilização do teste dos resíduos normalizados com um método de detecção e identificação de EGs.

O vetor dos resíduos r é normalizado e submetido ao seguinte teste de validação:

$$r_N(i) = \frac{|r(i)|}{\sigma_E(i)} \leq \gamma \quad (10)$$

$$\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)} \quad (11)$$

Onde $\sigma_E(i)$ representa o desvio padrão da i -ésima componente do vetor dos resíduos e γ , o limite de detecção. Resíduos normalizados que violam o limite estabelecido indicam a presença de EGs.

Embora existam outros testes para a avaliação dos resultados do processo de filtragem, e.g., o teste $J(x)$ e dos resíduos ponderados, Handschin (1975), neste trabalho será utilizado o teste dos resíduos normalizados, por ser o mais confiável.

2.5. Identificação de Medidas e Conjuntos Críticos

Uma medida torna-se crítica se sua ausência do conjunto de dados processados leva a rede supervisionada à perda de observabilidade. Um conjunto crítico é definido como sendo aquele formado por um grupo de medidas em que a remoção de qualquer

uma das mesmas torna todas as remanescentes do grupo medidas críticas.

Para a identificação de medidas e conjuntos críticos será considerada a metodologia apresentada em Coutto (2001).

3 GRASP

GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) proposto por Feo e Resende (1995) é atualmente uma das metaheurísticas mais eficientes na solução de diferentes problemas de otimização combinatória.

Este método é um método iterativo constituído de duas fases: a de construção e a de busca local. Na fase de construção, é gerada uma lista de candidatos, ordenados de acordo com sua contribuição na função objetivo. Uma solução é então construída elemento a elemento. Essa construção é probabilística, pois a escolha do novo elemento que deverá compor a solução é feita aleatoriamente a partir de uma lista, denominada lista de candidatos restritos (LCR) que é formada pelo melhores elementos da lista de candidatos. A heurística também é adaptativa, pois a cada iteração da fase de construção os custos (pesos utilizados pela função de ordenação) são atualizados para refletir as mudanças ocasionadas pela seleção do elemento na iteração anterior.

Tendo em vista que essa construção é probabilística, as soluções geradas nesta fase provavelmente não serão localmente ótimas. Daí a importância da segunda fase do GRASP, que tenta melhorar a solução construída na fase anterior, trabalhando na sua vizinhança.

O pseudocódigo de um procedimento GRASP pode ser visto no algoritmo exibido na Figura 1. Tal procedimento recebe como parâmetro o número máximo de iterações que serão realizadas (Max Iterations) e uma semente para o fator aleatório (Seed). Nos passos 3, 4 e 5 tem-se a execução da fase de construção, busca local e o procedimento que salva a melhor solução encontrada até o momento respectivamente. Como retorno, tem-se a melhor solução obtida após o término da última iteração.

```

Procedure GRASP (Max Iterations, Seed)
1 Read Input();
2 for m = 1; . . . ; Max Iterations do
3   Solution Construction (Seed);
4   Solution Local Search (Solution);
5   Update (Solution, Best Solution);
6 end;
7 return Best Solution
End GRASP.

```

Figura 1: Pseudocódigo de uma metaheurística GRASP.

4 Descrição da Heurística Proposta

Este trabalho propõe uma nova heurística, inspirada na metaheurística GRASP, para a solução do problema do planejamento de sistemas de medição para EE. Alterações no algoritmo GRASP foram realizadas de forma a torná-lo mais adequado à solução do problema em questão.

Como toda heurística, esse algoritmo, não obtém necessariamente a resposta ótima. Ele calcula uma solução que tem como objetivo ser a mais próxima possível da ótima. Essa solução é obtida em tempo polinomial, ou seja, em um tempo significativamente inferior aos algoritmos exatos para representação de vetores de entrada muito grande.

4.1. Codificação do Problema

No modelo proposto foi criado um vetor de avaliação, que representa um plano de medição, ou seja, um conjunto de medidores proposto como solução para o problema, onde cada posição está associada a um tipo de medidor e sua respectiva localização na rede. A dimensão do vetor de avaliação corresponde ao número máximo de medidores que podem ser instalados na rede elétrica.

Os elementos do vetor contêm valores binários, assumindo valor igual a “1”, quando o medidor correspondente faz parte do plano de medição proposto, e assumindo valor igual a “0” caso contrário. Isto é ilustrado na Figura 2. O custo associado a cada plano de medição proposto é obtido somando-se os custos individuais de cada medidor presente no vetor de avaliação e os custos das UTRs necessárias para a instalação de tais medidores.

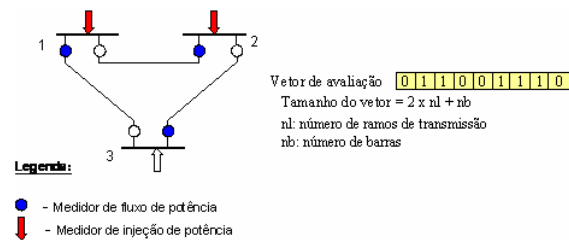


Figura 2: Codificação do Problema.

4.2. Algoritmo Construtivo Randomizado

Na fase construtiva do GRASP, uma solução é obtida de forma aleatória a partir de uma lista dos melhores candidatos gerada por meio de uma estratégia gulosa, como ilustrado pelo algoritmo da Figura 3.

```

Procedure Randomized Constructive (C.Vect,
Seed)
1 Read Input();
2 Candidade = Sort (List bus, Seed)
3 if(Candidate not observable by List Bus)
4   for m = 1; . . . ; Number of flows do
5     Install UTR and meters;
6   end;
7 end if;
8 return Constructive Vector
End.

```

Figura 3: Algoritmo Construtivo.

Esta fase foi implementada com a escolha aleatória de uma barra na rede elétrica, mostrado na linha 2 do algoritmo construtivo. Essa barra é sempre escolhida entre os 20% (vinte por cento) das barras que possuem maior número de ramos de transmissão a elas conectados. Esta estratégia tem como base o fato de que uma UTR e seus medidores instalados em uma barra com um número elevado de linhas a ela conectadas tende a permitir que uma maior área na rede elétrica seja observada. Isto é ilustrado para as duas situações apresentadas na Figura 4.

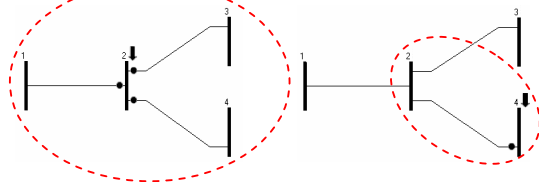


Figura 4: Áreas Observáveis

Ao longo da fase construtiva as demais barras são selecionadas em ordem decrescente do número de ramos a elas associados.

Após cada barra ter sido escolhida, é verificado se a mesma já não é observada por medidores que podem ter sido alocados em barras adjacentes (anteriormente selecionadas pelo algoritmo construtivo). Se a barra escolhida ainda não é observada, uma UTR e medidores associados são nela alocados. Isto é ilustrado pelo passo 5 do algoritmo de Figura 3. Essa estratégia tenta evitar a alocação não necessária de medidores na rede, sendo o resultado obtido dependente da ordem de escolha da primeira barra a ser avaliada durante o algoritmo construtivo.

4.3. Algoritmo de Busca Local

Na fase de busca local, a partir da solução criada no algoritmo construtivo, sucede-se a fase de refinamento da solução. Foram definidos três tipos de busca local, executadas seqüencialmente e ilustrados na Figura 5. Adição de Medidas, Remoção de Medidas e Troca de bits (onde uma medida existente é retirada e outra não existente é inserida).

Para o requisito de análise de observabilidade e

ausência de medidas críticas foi considerada unicamente a opção de remoção de medidas. Para o requisito de ausência de medidas pertencentes a conjuntos críticos foram consideradas as opções de adição, remoção e troca de bits.

```

Procedure Local Search (C. Vect)
1 for m = 1; . . . ; Dimension Vector do
2   Add_search(C. Vect[ ])
3   if (result < best) Then
4     best = result
5     best_vect [ ] = C. Vect [ ]
6   end if
7 end;
8 for m = 1; . . . ; Dimension Vector do
9   Remove_search(C. Vect[ ])
10  if (result < best) Then
11    best = result
12    best_vect [ ] = C. Vect [ ]
13  end if
14 end;
15 for m = 1; . . . ; Dimension Vector do
16  Swap_search(C. Vect[ ])
17  if (result < best) Then
18    best = result
19    best_vect [ ] = C. Vect [ ]
20  end if
21 end;

```

Figura 5: Algoritmo de busca local.

5 Testes e Resultados

Para avaliar o desempenho da heurística GRASP proposta, foram realizados testes com os sistemas IEEE 14 (14 barras e 20 ramos) e IEEE 118 (118 barras e 179 ramos), sendo avaliados para cada sistema os requisitos de Observabilidade, Ausência de Medidas Críticas e Ausência de Medidas em Conjuntos Críticos.

Os resultados obtidos para o sistema IEEE 14 barras são apresentados na Tabela 1 e ilustrados nas Figuras 6 a 9. A Tabela 1 apresenta ainda, para fins de comparação, resultados obtidos quando um algoritmo genético da literatura, Souza (2005) e Tafur (2006).

Tabela 1. Resultados para o sistema IEEE 14.

Sistema IEEE 14 barras		Obs.	Med. Crit.	Conj. Crit.
GRASP	Custo	458,5	476,5	885,5
	Tempo	1 seg.	1 seg.	2 seg.
AG	Custo	458,5	563,0	972,0
	Tempo	4 seg.	13 seg.	13 seg.

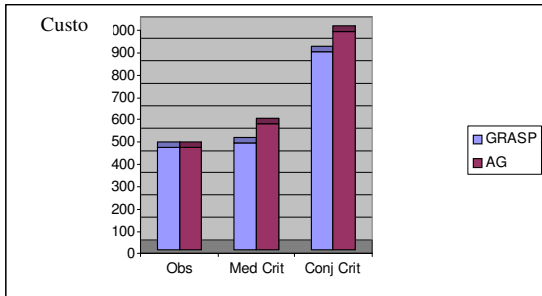


Figura 6: Custos de Medição para o sistema IEEE 14: GRASP vs AG.

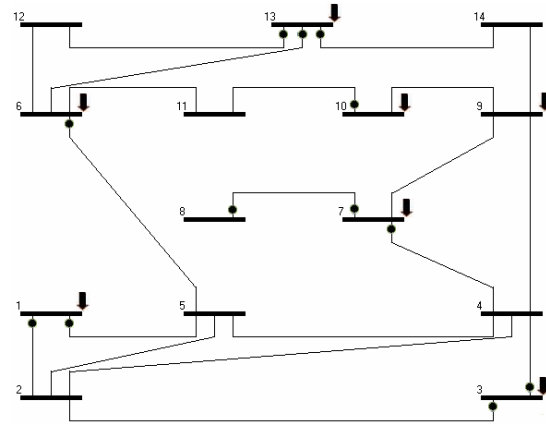


Figura 9: Ausência de Medidas em Conjuntos Críticos, sistema IEEE 14, utilizando GRASP.

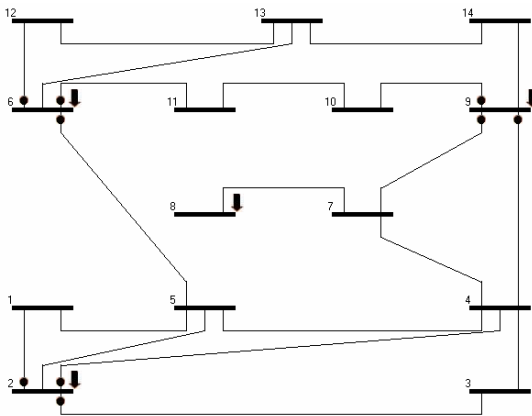


Figura 7: Observabilidade, sistema IEEE 14, utilizando GRASP

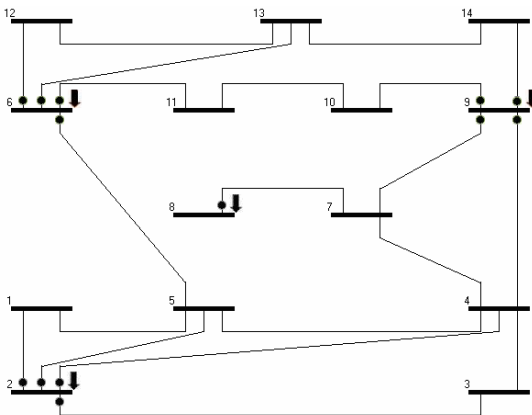


Figura 8: Ausência de Medidas Críticas, sistema IEEE 14, utilizando GRASP.

Para o Sistema IEEE 118, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2 e Figura 10:

Tabela 2. Resultados para o sistema IEEE 118.

Sistema IEEE 118 barras		Obs.	Med. Crít.	Conj. Crít.
GRASP	Custo	4758,0	4848,0	7119,0
	Tempo	61 min	94 min	380 min
AG	Custo	7720,0	8477,5	10753,0
	Tempo	92 min	183 min	1174 min

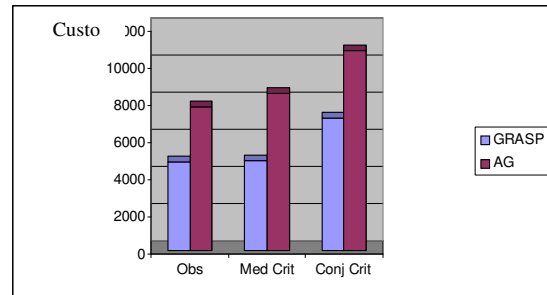


Figura 10: Custos de Medição para o Sistema IEEE 118: GRASP vs AG.

Os resultados obtidos com os sistemas IEEE 14 e IEEE 118 mostram que o algoritmo proposto é capaz de encontrar soluções de baixo custo e que garantem o desempenho desejado da função EE. Comparações com resultados obtidos com um AG da literatura indicaram a capacidade do algoritmo proposto em encontrar soluções de menor custo e com um tempo computacional reduzido.

A título de ilustração, o custo máximo (instalação de todos os medidores) para os sistemas IEEE 14 e IEEE 118 seriam de 1643,0 e 13942,0, respectivamente.

É possível observar das Tabelas 1 e 2 que à medida que mais restrições são consideradas, maior é o custo associado à solução ótima. Isto ocorre por que as restrições são atendidas de forma cumulativa, ou seja, o requisito de ausência de medidas críticas pressupõe o atendimento ao requisito de observabilidade, assim como o requisito da ausência de conjuntos críticos pressupõe o atendimento aos dois requisitos anteriores.

Porém, o aumento do custo observado pode ser considerado pequeno, levando em conta o benefício resultante para a qualidade de supervisão da rede. Ainda assim, no caso de limitações financeiras, um planejador pode optar por uma solução mais econômica, que não contempla o atendimento a todos os requisitos.

Em todas as simulações foi considerado um custo relativo de 100,0 para uma UTR e de 4,5 para um medidor. É importante ressaltar que a alocação de uma UTR (e conseqüente agregação de seu custo) em uma dada barra da rede é necessária sempre que a instalação de um ou mais medidores (de injeções de potência na barra ou de fluxos de potência nos terminais dos ramos, a ele conectados) for ali proposto.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou uma heurística baseada em GRASP para a solução do problema de planejamento de sistemas de medição para a Estimação de Estado. O conhecimento extraído da experiência relatada na literatura sobre o problema de planejamento de sistemas de medição foi empregado para a construção de procedimentos heurísticos que compõem as fases de construção e busca local do algoritmo proposto.

Resultados obtidos com o algoritmo proposto e comparações com resultados obtidos com o emprego de um algoritmo genético mostraram a sua competitividade, tendo sido observados resultados superiores tanto na solução ótima obtida como no custo computacional para sua obtenção.

Como trabalhos futuros, podem ser criados e implementados novos procedimentos que realizem as fases de construção e de busca local da heurística de forma mais eficiente.

Um caminho promissor que pode ser investigado em trabalhos futuros é a paralelização do algoritmo, o que diminuiria ainda mais o tempo de execução do algoritmo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq e FAPERJ (PRONEX).

Referências Bibliográficas

- Blum C., Roli A. (2003) Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Comput. Surv.*, 35(3):268-308.
- Do Coutto Filho M. B., Souza J. C. S., Oliveira F. M. F., Schilling M. Th. (2001), Identifying critical measurements & sets for power system state estimation, *Proc. IEEE Porto PowerTech Conf.*
- Clements K. A., Krumpholz G. R., Davis P. W. (1983), Power system state estimation with measurement deficiency: an observability measurement placement algorithm, *IEEE Trans. PAS*, Vol. PAS-102, pp. 2012-2020.
- Feo T.A., Resende M.G.C (1995) Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, *Journal of Global Optimization*, Vol 6, pp. 109-133.
- Handschin E., Bongers C. (1975) Theoretical and practical considerations in the design of state estimators for electric power systems, *Int. Symp. Computerized Operation of Power System (COPOS) Proceedings*, São Carlos, Brasil, pp. 104-136.
- Monticelli A. (1999) Power system state estimation: A generalized approach, *Kluwer Academic Press*.
- Souza J. C. S., Do Coutto Filho M. B., Schilling M. Th. (2005) Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios. *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol 20 No 4, pp 1700-1708.
- Souza J. C. S., Do Coutto Filho M. B., Schilling M. Th., Meza E. B. M., Capdeville C. (2005) Application of genetic algorithms for planning metering systems in state estimation, *Proceedings in 15th Power Systems Computation Conference*.
- Tafur J. E. V. (2006) "Ferramenta computacional para planejamento e avaliação de sistemas de medição para estimação de estado", *Dissertação de Mestrado, IC-UFF*.