



## **ALOCAÇÃO ÓTIMA DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL EM REDES ELÉTRICAS PARA A DEPURAÇÃO DE ERROS NOS DADOS**

**Breno Crespo Zeba**

Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense  
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº São Domingos - Niterói – RJ, CEP: 24210-346  
brenocz@id.uff.br

**Marcio Andre Ribeiro Guimaraens**

Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal Fluminense  
R. Passo da Pátria, 156 - 209 - São Domingos, Niterói - RJ, 24210-240  
mguimaraens@id.uff.br

**Julio Cesar Stacchini de Souza**

Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal Fluminense  
R. Passo da Pátria, 156 - 209 - São Domingos, Niterói - RJ, 24210-240  
julio@ic.uff.br

**Milton Brown Do Coutto Filho**

Instituto de Computação – Universidade Federal Fluminense  
Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº São Domingos - Niterói – RJ, CEP: 24210-346  
mbrown@ic.uff.br

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta uma metodologia para o problema de planejamento de sistemas de medição fasorial para Estimação de Estado em sistemas de potência considerando a melhoria da capacidade de depuração de erros grosseiros de medição. A metodologia proposta visa obter a melhor localização de um número limitado de Unidades de Medição Fasorial aproveitando a capacidade do estimador PHASE tratar adequadamente erros grosseiros simples e múltiplos. Testes com os sistemas IEEE 30 e 118 barras são realizados, com o intuito de validar o algoritmo proposto. O planejamento de sistemas de medição é considerado um problema de otimização da classe NP-Difícil.

**PALAVRAS CHAVE.** Alocação de Medidores, Estimação de Estado, Algoritmos Genéticos.

### **ABSTRACT**

This work presents a methodology for placing phasor measurement units for power system state estimation, considering its capability to process bad data. The proposed methodology aims to optimally place a limited number of phasor measurement units by taking advantage of the ability to debug single or multiple bad data provided by the PHASE model. Tests with the IEEE 30 and 118 bus were carried out to validate the proposed algorithm. The meter placement is considered a NP-hard problem.

**KEYWORDS.** Meter Placement, State Estimation, Genetic Algorithms.



## 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 (EG), 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 et al. 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.

Na década de 1980, uma nova tecnologia de medição foi desenvolvida baseada nos Relés de Distância por Componentes Simétricas (Symmetrical Component Distance Relay – SCDR) [Phadke 2002], com capacidade para medir o ângulo das grandezas fasoriais do sistema elétrico, sincronizadamente (com precisão de até 1  $\mu$ s), através de um sistema de posicionamento global (Global Positional System - GPS). Desde então, várias aplicações foram desenvolvidas utilizando este equipamento, tais como as voltadas para a melhoria do processo de estimação de estado. Dentre estas, destaca-se a proposta de um estimador de estado convencional auxiliado por fasores (Phasor Aided State Estimation – PHASE). O modelo PHASE realiza o processamento simultâneo de um estimador que emprega medidas convencionais e outro que emprega medidas fasoriais, resultando em um benefício para a depuração de erros nos dados.

Sabe-se que devido a seu alto custo, um número limitado de UMFs estará presente na rede elétrica. Logo, este trabalho tem como objetivo a alocação ótima de uma quantidade pré-definida de UMFs, de modo a obter a maior capacidade de depuração de erros nos dados na EE quando se emprega o modelo PHASE. O problema tratado é de natureza combinatória e adequado para o emprego de metaheurísticas. Neste trabalho é utilizado um algoritmo genético (AG) para realizar a alocação de UMFs que permitirá o uso mais abrangente do modelo PHASE para depuração de erros grosseiros de medidas.

Na Seção 2 são introduzidos os fundamentos da estimação de estado, a análise residual, a abordagem PHASE para depuração de erros nos dados e o problema da alocação de UMFs do ponto de vista da observabilidade. Na Seção 3 é apresentada a metodologia proposta para alocação ótima de UMFs de forma a maximizar o desempenho do processamento de erros via o modelo PHASE. Na Seção 4 são apresentados resultados de diversas simulações realizadas empregando-se a metodologia proposta para alocação de UMFs em sistemas padrão da literatura técnica, como o IEEE 30 e 118 barras. Finalmente, a Seção 5 traz as conclusões sobre o trabalho realizado.

## 2. Fundamentos da Estimação de Estado

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 [Tafur et al. 2007].

Quanto maior e mais qualificada for a redundância, maiores serão as chances de se constituir um processo de EE bem-sucedido. 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 otimize a função objetivo desejada, como, por exemplo, o mínimo custo de investimento em UMFs, a máxima cobertura de observação proporcionada por UMFs ou a máxima capacidade de tratamento de erros nos dados.

A EE é executada de acordo com o método dos mínimos quadrados ponderados. A relação entre medidas e estado do sistema é descrita pela seguinte equação:

$$z = h(x) + \varepsilon \quad (2.1)$$

Onde:

$z$  – vetor de medidas do sistema, usualmente formado por medidas de fluxos de potência ativa e reativa nos ramos da rede; potências ativas e reativas injetadas nas barras; e módulo de tensão nas barras, de dimensão  $(m \times 1)$ , onde  $m$  é o número de medidas do sistema.

$h(\cdot)$  – vetor que relaciona o estado verdadeiro com medidas isentas de erros, através de funções não lineares (equações do problema de fluxo de potência).

$x$  – vetor estado, representando módulo e ângulo das tensões nas barras, com dimensão  $(n \times 1)$ , onde  $n$  é o número de variáveis de estado, sendo  $n = 2nb - 1$  e  $nb$  é o número de barras do sistema.

$\varepsilon$  – vetor de erros associados à medição, descrito como variável aleatória de distribuição de probabilidades Normal, valor esperado zero e matriz de covariância  $R$ .

Representa-se a função objetivo da forma a seguir:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 \alpha_i = \sum_{i=1}^m (z_i - h(x_i))^2 \alpha_i \quad (2.2)$$

onde:

$J(x)$  – função objetivo

$\alpha_i$  – peso atribuído à  $i$ -ésima medida

Em notação matricial:

$$J(x) = [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad (2.3)$$

Sendo  $W = R^{-1}$ , matriz de ponderação e  $R = \text{diag}\{1/\alpha_1, 1/\alpha_2, \dots, 1/\alpha_m\}$

O objetivo a ser alcançado consiste em se obter uma estimativa para o estado  $\hat{x}$  que minimize  $J(\hat{x})$ , através de:

$$g(x) = \left( \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right)_{x=\hat{x}} = 0 \quad (2.4)$$

Aplicando a condição (2.4) em (2.3), obtém-se a seguinte equação:

$$g(x) = H^t W [z - h(x)] \quad (2.5)$$

onde  $H = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$  denomina-se Matriz Jacobiano.

Utilizando o método de Newton-Raphson para encontrar o estado estimado em (2.5), obtém-se o seguinte processo iterativo:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \left[ (H^t W H)^{-1} H^t W \right]^{(k)} [z - h(x^{(k)})] \quad (2.6)$$



onde  $k$  é o contador de iterações.

Definindo-se a matriz de ganho  $G = H'WH$ , pode-se reescrever a equação (2.6) como:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + [G^{-1}H'W]^{(k)} [z - h(x^{(k)})] \quad (2.7)$$

A convergência do processo iterativo é avaliada através da maior componente do módulo do vetor desvio  $|\Delta x^{(k)}| = |x^{(k+1)} - x^{(k)}|$  que deve ser inferior a uma determinada tolerância.

A EE permite suavizar os erros de baixa magnitude (estatisticamente esperados), usualmente presentes nos processos de medição. Quando medidas apresentam valores muito distintos em relação ao que se espera diz-se que estas podem conter EGs [Do Coutto et al. 1999].

Uma vez que o estado tenha sido estimado, este é utilizado para estimar medidas e realizar uma avaliação da consistência dos resultados alcançados. Tal procedimento é chamado de análise de resíduos. O objetivo principal é detectar a presença de erros estatisticamente elevados através da análise do vetor dos resíduos da estimação, conforme:

$$r = z - \hat{z} \quad (2.8)$$

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (2.9)$$

onde  $Z$  - valor medido  
 $\hat{z}$  - valor estimado  
 $r$  - resíduo da estimação

O vetor de resíduos pode ser interpretado como uma variável aleatória Normal, de valor esperado zero e matriz de covariância  $U$ , obtida por:

$$U = R - H(H'WH)^{-1}H' \quad (2.10)$$

Ao se considerar  $S = (H'WH)^{-1}$  e  $T = HSH'$ , então (2.10) pode ser reescrita como:

$$U = R - T \quad (2.11)$$

O vetor de resíduos é normalizado e deve verificar o atendimento da seguinte condição:

$$r_N(i) = \frac{|r(i)|}{\sqrt{U(i,i)}} \leq \lambda \quad (2.12)$$

onde o índice  $i$  indica  $i$ -ésima componente do vetor dos resíduos e  $\lambda$  corresponde ao limiar utilizado para detecção da presença de EGs.

Resíduos normalizados superiores ao limite estabelecido indicam a presença de EGs. Caso haja apenas uma medida portando EG em determinado sistema de medição, aquela que apresentar o maior resíduo normalizado, normalmente será a medida portadora de EG. Desta forma, este teste além de detectar a presença de EGs é também capaz de identificar a(s) medida(s) portadoras(s) de erro. O processamento de uma medida portadora de EG compromete a estimação de componentes do vetor de estado a ela associados e, conseqüentemente, influencia a estimativa das medidas, fazendo com que diversos resíduos se tornem elevados e as correspondentes medidas sejam apontadas como suspeitas. Tal situação caracteriza o que se



denomina efeito de espalhamento do EG. Além da medida espúria, outras medidas (não portadoras de EGs) também possuirão resíduos normalizados superiores ao limite de detecção estabelecido, dificultando o processo de depuração de erros, efeito que é acentuado quando várias medidas são portadoras de EG.

Para que se identifique uma medida como portadora de EG, através de um procedimento comumente adotado, porém ineficiente, elimina-se uma medida por vez e volta-se a estimar o estado, até que a eliminação de uma das medidas suspeitas leve a nenhuma violação de resíduos da estimação. Quando vários EGs estão presentes, tal procedimento irá requerer várias combinações de medidas (duas-a duas, três-a-três, etc.) a serem descartadas, todas com resíduos elevados, até que se possa concluir o processo de EE sem violações de resíduos.

A abordagem PHASE melhora sensivelmente o processo de depuração de erros na estimação de estado, eliminando-se o efeito de espalhamento e a necessidade de realizar a remoção de medidas por tentativa e erro.

Seja  $r(i)$  a  $i$ -ésima componente do vetor de resíduos, obtida a partir da diferença entre a medida  $z(i)$  e aquela estimada independentemente com medições fasoriais  $\tilde{z}(i)$  :

$$r(i) = z(i) - \tilde{z}(i) \quad (2.13)$$

onde  $\tilde{z} = h(\tilde{x})$  ;  $\tilde{x}$  — um vetor de estado estimado independentemente.

Admite-se que  $r(i)$  seja aproximadamente descrito por um processo Gaussiano com média zero e matriz de covariância  $V$  dada por:

$$V=R+M \quad (2.14)$$

onde  $M = HLH^t$  — matriz de covariância do erro do vetor  $\tilde{z}$  ;  $H = \partial h / \partial x$  , calculado em  $x = \hat{x}$  ;  $L$  — matriz de covariância de  $\tilde{x}$  , obtido com o estimador independente. Logo, o conjunto de medidas recebidas e estimadas são mutuamente independentes.

O vetor resíduo é normalizado e analisado pela seguinte validação estatística:

$$r_N(i) = |r(i)| / \sigma_V(i) \leq \lambda \quad (2.15)$$

onde  $\sigma_V(i) = \sqrt{V(i,i)}$  — desvio padrão da  $i$ -ésima componente do vetor  $r$ .

A independência do processamento entre as medidas convencionais e fasoriais permite a eliminação/redução do efeito de espalhamento. Maiores detalhes sobre a abordagem PHASE e suas propriedades podem ser encontradas em [Guimaraens et al. 2014].

A alocação de medidas fasoriais para garantir a observabilidade do sistema foi analisada por [Abur et al. 2005], tendo sido desenvolvidas duas abordagens para o problema: abordagem numérica e abordagem topológica. O presente trabalho adota uma abordagem numérica para modelagem da observação proporcionada por medidas de UMF. Neste caso, assume-se que as UMFs possuem dois tipos de medidas: fasores de tensão nodal e fasores de corrente nos ramos. Isto significa que quando uma UMF é instalada, as medidas a ela associadas permitem observar tanto a barra onde a UMF está instalada quanto as barras vizinhas a ela, conectadas por ramos de transmissão. Considere uma matriz binária de conectividade  $Y$  que representa a configuração da rede elétrica a ser observada pelas UMFs, cujas linhas e colunas estão associadas aos nós do sistema elétrico. Os elementos da matriz de conectividade serão:

$$Y_{i,j} = 1 \text{ se } i=j \text{ ou se o nó } i \text{ está conectado ao nó } j$$



$$Y_{i,j} = 0 \text{ caso contrário}$$

Considere também o vetor binário  $x$ , no qual a posição de cada elemento está também associada a um determinado nó da rede. Os elementos do vetor  $x$  assumem os seguintes valores:

$$x_i = 1 \text{ se existe UMF no nó } i$$

$$x_i = 0 \text{ caso contrário}$$

Desta forma uma determinada configuração de UMF provê observabilidade de uma rede elétrica se a condição  $Ax \geq \hat{I}$  for atendida, onde  $\hat{I}$  é um vetor binário com todos os seus elementos contendo valores não nulos. Caso não se disponha de uma quantidade de UMFs suficiente para observar a rede elétrica como um todo, apenas as barras observáveis terão no vetor  $\hat{I}$  os correspondentes elementos com valores não nulos, os demais elementos do vetor assumindo valores iguais a zero.

Segundo [Guimaraens et al. 2014], ao se empregar o modelo PHASE é possível eliminar o efeito de espalhamento que normalmente ocorre quando erros grosseiros devem ser processados durante a EE, se tais erros grosseiros ocorrerem em medidas localizadas nas áreas observadas por UMFs. Tal fato permite garantir que o processamento de EGs simples ou múltiplos em tais áreas pode ser realizado com 100% de sucesso [Guimaraens et al. 2014].

A próxima seção apresenta a metodologia proposta para a alocação ótima de UMFs para a depuração de erros.

### 3. Metodologia proposta

Como mencionado anteriormente, nos atuais sistemas de potência um conjunto de medidas de tensão, fluxo e injeção de potência, concentradas em unidades de medição remotas (UTRs) é coletado por um sistema de aquisição de dados (SCADA) e deve ser processado pela função EE em um Sistema de Gerenciamento de Energia. Atualmente, medidas fasoriais provenientes de UMFs podem também estar presentes, em quantidade reduzida, para processamento. Em [Guimaraens et al. 2014] foi demonstrado que um estimador PHASE é capaz de depurar erros simples e múltiplos em medidas provenientes de UMFs ou UTRs, desde que estas últimas estejam inseridas na área da rede que é observável empregando-se apenas as medidas de UMFs.

Neste trabalho é proposta uma metodologia que emprega um algoritmo genético para a alocação ótima de uma certa quantidade de UMFs em um sistema elétrico que é completamente observável utilizando-se medidas de UTRs. Como não é possível observar o sistema integralmente apenas empregando-se medidas de UMFs e considerando-se o objetivo de maximizar a capacidade de depuração de erros via o modelo PHASE, a abordagem proposta busca alocar UMFs de modo a permitir que a maior quantidade possível de medidas possa ser criticada e depurada por PHASE. Dessa maneira, a alocação de UMFs deverá ser tal que a área total observada por medidas de UMFs contemple o maior número possível de medidas de UTRs já instaladas. As barras observadas por medidas de UMFs podem ser determinadas resolvendo-se a seguinte equação:

$$b = Y.x \tag{2.15}$$

Onde  $Y$  é a matriz de conectividade da rede elétrica, enquanto  $x$  é um vetor binário no qual apenas os elementos correspondentes às barras onde uma UMF está alocada são iguais a 1.

As barras observadas por medidas de UMFs são aquelas cujo correspondente elemento no vetor  $b$  possui valor diferente de zero. A partir do conhecimento das barras observadas por UMFs é possível identificar facilmente a(s) área(s) da rede observada(s) por UMFs e,



consequentemente, as medidas de UTRs que estão contidas em tais áreas [Guimaraens et al. 2014].

Logo, o problema de otimização a ser resolvido pode então ser formulado como:

$$\text{Max} \sum_{k=1}^{NA} m_k \quad (2.16)$$

$$\text{s.a. } n_{UMF} = N \quad (2.17)$$

Onde  $NA$  é o número total de áreas da rede observadas por UMFs e  $m_k$  representa o número de medidas de UTRs contidas na  $k$ -ésima área observável. A restrição de igualdade representa a informação de que a quantidade de UMFs a serem alocadas,  $n_{UMF}$ , deve ser igual a  $N$ .

A função aptidão a ser maximizada pelo AG durante processo evolutivo corresponderá ao somatório das medidas de UTRs contidas nas áreas observadas por UMFs, sendo dada por:

$$FA = \sum_{k=1}^{NA} m_k \quad (2.18)$$

A quantidade de medidas de UMFs não é incluída na aptidão porque conforme [Guimaraens et al. 2014] sempre será possível depurá-las em um sistema completamente observável por medidas de UTRs. A restrição (2.17) também não é representada em (2.18) porque a quantidade de UMFs a serem instaladas é pré-definida, sendo um dado de entrada para o problema.

O AG empregado neste trabalho leva em consideração o fato de que o vetor  $\mathbf{b}$  pode apresentar valores iguais a zero, visto que a quantidade de UMFs nem sempre poderá ser suficiente para garantir a observabilidade de toda a rede. Caso a quantidade de UMFs disponíveis seja suficiente para garantir a observabilidade de toda a rede, é esperado que nenhum elemento do vetor  $\mathbf{b}$  seja nulo. Cada solução proposta é representada em um vetor binário que corresponde ao vetor  $\mathbf{x}$  de (2.15). Neste caso, cada gene corresponde a uma barra da rede elétrica e terá valor igual a 1 quando está proposta a alocação de uma UMF na barra correspondente e valor igual a 0 em caso contrário [Abur et al. 2004]. Em cada simulação realizada o AG é executado 100 vezes e cada execução é considerada uma população de 300 indivíduos e 10 gerações. Durante o processo evolutivo o operador de elitismo é utilizado, preservando-se os 3 melhores indivíduos de uma geração para a outra. Foram empregados também os operadores de mutação e de cruzamento em um ponto [Holland 1975]. A população inicial é construída de forma que em 50% dos indivíduos as UMFs são alocadas aleatoriamente, enquanto para os 50% restantes a alocação das UMFs leva em consideração uma heurística em que a chance de uma UMF ser alocada em uma determinada barra é diretamente proporcional à quantidade de ramos a ela conectados [Tafur et al. 2007].

#### 4. Testes e Resultados

Diversas simulações foram realizadas empregando os sistemas teste IEEE 30 e IEEE 118 barras, comumente empregados na literatura para simulações envolvendo a EE. Em todos os casos foi assumido um plano de medição pré-existente, com medidas provenientes apenas de UTRs, capaz de observar toda a rede elétrica. A metodologia proposta foi testada considerando-se a alocação de uma quantidade pré-definida de UMFs em adição às UTRs presentes, de modo a otimizar a função objetivo (2.16).



#### 4.1 Testes com o sistema IEEE 30

A Figura 1 apresenta o sistema IEEE 30 com as UTRs e correspondentes medidores, os quais permitem a completa observabilidade da rede.

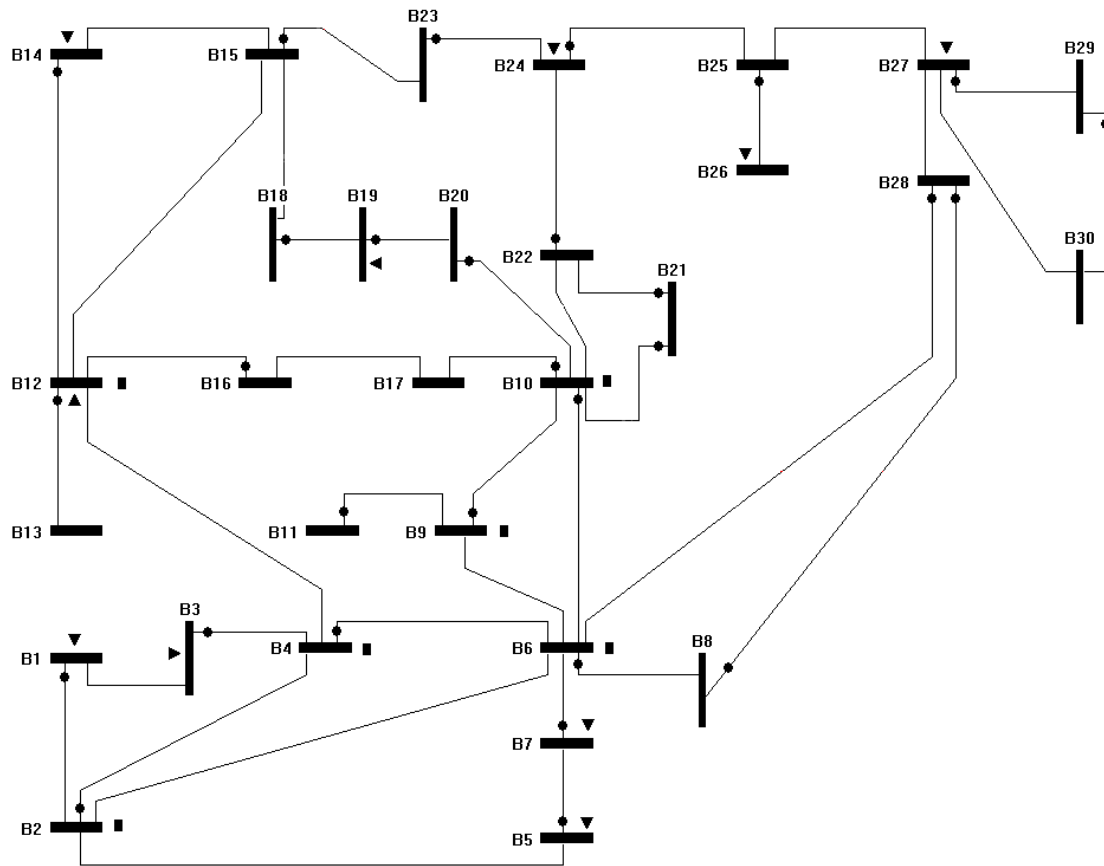


Figura 1 – Sistema de medição (UTRs) - IEEE 30

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos após 100 execuções do AG, de acordo com a metodologia proposta, considerando-se a alocação de diferentes quantidades de UMFs. São apresentados, além da quantidade de UMFs considerada, a aptidão da melhor solução obtida, bem como a média das aptidões observadas e o correspondente desvio-padrão. As localizações das UMFs, correspondentes à melhor solução obtida, são também apresentadas.

Tabela 1: Resultados sistema IEEE 30

Quantidade UMFs	Localização (Barras)	Aptidão Máxima	Aptidão Média	Desvio Padrão
4	6,10,15,25	49	48,60	0,80
6	2,6,10,12,23,27	67	65,82	0,99
8	2,4,6,10,12,18,24,27	77	76,18	0,99
10	1,2,6,9,10,12,15,19,25,27	81	80,46	0,89





É possível observar da Tabela 1 o incremento da aptidão em função da maior disponibilidade de UMFs para alocação. Neste caso, a alocação de 10 UMFs permite a observação de toda a rede elétrica e, conseqüentemente, todas as medidas provenientes de UTRs podem ser criticadas e depuradas via PHASE. É importante ressaltar que diferentes soluções levam à mesma aptidão e as alocações mostradas na Tabela 1 correspondem a uma destas soluções, tendo sido as mesmas escolhidas arbitrariamente para efeito de ilustração. Observa-se também que as localizações das UMFs podem ser diferentes caso seja considerada, durante o estudo de planejamento a possibilidade de alocação de uma quantidade menor ou maior de UMFs. É importante mais uma vez destacar que cada aptidão apresentada na Tabela 1 corresponde à quantidade de medidas de UTRs que podem ser depuradas via PHASE.

#### 4.2 Testes com o sistema IEEE 118

A Figura 2 apresenta o sistema IEEE 118 com as UTRs e correspondentes medidores, os quais permitem a completa observabilidade da rede.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos após 100 execuções do AG, de acordo com a metodologia proposta, considerando-se a alocação de diferentes quantidades de UMFs. São apresentados a quantidade de UMFs considerada, a aptidão da melhor solução obtida, a média das aptidões observadas e o correspondente desvio-padrão, bem como as localizações das UMFs, correspondentes à melhor solução obtida.

Tabela 2: Resultados sistema IEEE 118

Quantidade UMFs	Localização (Barras)	Aptidão Máxima	Aptidão Média	Desvio Padrão
10	5,12,17,37,49,56,77,80,85,94	150	144,84	2,56
15	5,12,15,17,32, 37,49,59,65,70,77,80,85,92,100	208	197,58	3,13
20	5,12,19,23,30,32,37,49, 54,59,62,68,71,77,85,92,96,100,105,110	252	239,96	4,05
25	5,11,12,19,30,32,34,37,45,49,56, 62,64,68,70,71,75,77,80,85,90,92,94,103,105	284	272,36	4,50

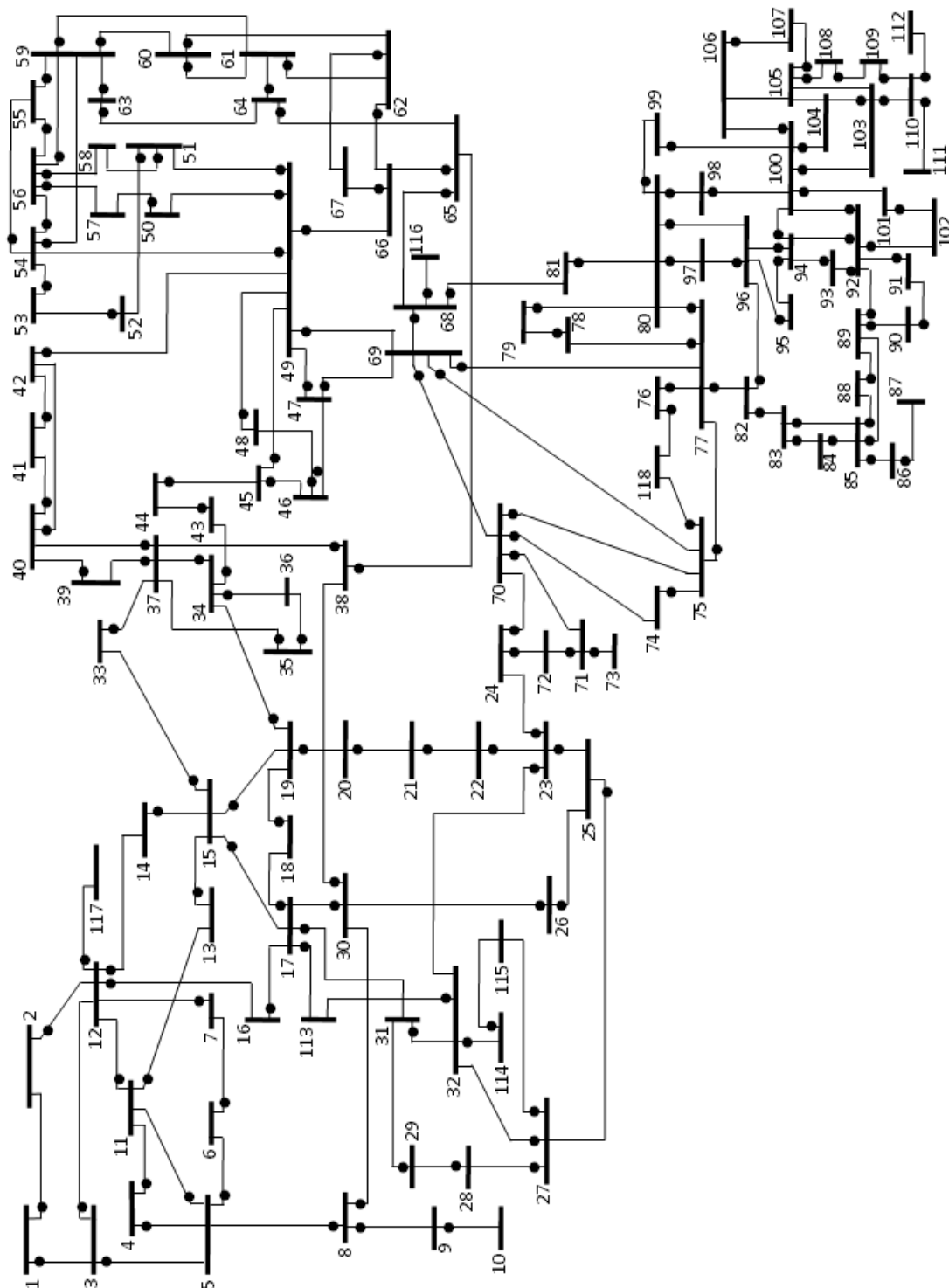


Figura 2 – Sistema de medição (UTRs) - IEEE 118

Assim como nos testes com o sistema IEEE 30, é possível observar o incremento da aptidão em função da maior disponibilidade de UMFs para alocação. Porém, diferente do que ocorreu para o sistema IEEE 30, em nenhum caso é possível observar toda a rede apenas com medidas de UMFs. Esta é uma situação observada em sistemas reais e de maior dimensão, para os quais a observação completa da rede utilizando apenas medidas de UMFs requer que uma



quantidade mais elevada de tais unidades de medição estejam disponíveis. Durante as 100 execuções do AG, verificou-se que quando da alocação de 10 UMFs 2 soluções distintas estão associadas ao valor da aptidão máxima e na Tabela 2 apenas uma delas é apresentada. Por outro lado, para a alocação de 15, 20 ou 25 UMFs, apenas as alocações apresentadas correspondem à aptidão máxima.

### 4.3 Análise comparativa

Em [Guimaraens et al. 2014], quando foi confirmada a capacidade de depuração de erros proporcionada por PHASE, alocou-se arbitrariamente uma certa quantidade de UMFs na rede, sem se ter a preocupação de maximizar o aproveitamento do modelo PHASE. A Tabela 3 apresenta uma análise comparativa do alcance do modelo PHASE para UMFs localizadas utilizando a metodologia proposta com o alcance de PHASE quando as localizações são aquelas consideradas em [Guimaraens et al. 2014]. Nos dois casos a mesma quantidade de UMFs são alocadas. Na tabela são apresentados resultados comparativos para os sistemas IEEE 30 e IEEE 118.

Tabela 3: Análise comparativa

Sistema	Quantidade UMFs	Aptidão [Guimaraens et al. 2014]	Aptidão Metodologia Proposta
IEEE 30	6	53	67
IEEE 118	10	88	150

Os resultados da Tabela 3 mostram a eficácia da metodologia proposta, a qual busca localizar as UMFs de forma a se ter o máximo aproveitamento da capacidade de depuração de PHASE. Logo, a metodologia proposta permite o melhor aproveitamento possível das UMFs a serem alocadas na rede, uma vez que a depuração de erros é a etapa mais crítica no processo de EE.

### 5. Conclusões

A introdução de unidades de medição fasorial em redes de energia elétrica tende a se intensificar nos próximos anos e o seu efeito na rede vem sendo estudado por diversos pesquisadores. Tais estudos buscam avaliar o benefício que tal tecnologia pode trazer para as mais diferentes aplicações voltadas para o planejamento e operação de sistemas de potência. Este trabalho foca especificamente nos benefícios para a função estimação de estado, voltada para a supervisão em tempo real de sistemas de potência. Sabe-se que estimadores que empregam medidas de UTRs e UMFs podem ter sua capacidade de depuração de erros, simples ou múltiplos, substancialmente aumentada, quando se emprega o modelo PHASE para realizar tal depuração. A metodologia proposta neste trabalho busca, portanto, otimizar a alocação de UMFs de modo a maximizar a capacidade de depuração de erros proporcionada por PHASE em redes elétricas que já dispõem de medição convencional advindas de UTRs. Para tal, é empregado um algoritmo genético no qual a aptidão dos indivíduos é avaliada com base na quantidade de medidas que podem ser corretamente depuradas para uma dada alocação de UMFs. Testes foram realizados com os sistemas IEEE 30 e 118 barras, considerando a disponibilidade de diferentes quantidades de UMFs para alocação. Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta resulta em uma alocação de UMFs que possibilita empregar o modelo PHASE para a depuração de erros na maior quantidade possível de medidas. Comparações com outro resultado da literatura ilustram tal capacidade.



## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq, FAPERJ, CAPES e INERGE para a realização deste trabalho.

## Referências

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.

Phadke A. G. (2002), “Synchronized Phasor Measurements ~ A Historical Overview”, Proceedings of the Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia/Pacific, Vol. 1, pp. 476-479.

Tafur J. E. V., Rocha H. R. O., Meza E. B. M., Souza J. C. S. de, Do Coutto Filho M. B. (2007), “Heurística Grasp Aplicada Ao Planejamento De Sistemas De Medição Para A Supervisão De Redes Elétricas”, Artigo em conferência, Anais do SBIC 2007.

Do Coutto Filho M. B., Souza J. C. S. de, Matos R. S. G., Schilling M. Th. (1999), “Strategies for Preserving Data Redundancy in Power System State Estimation”; 13th Power Systems Computation Conference Proceedings, Trondheim, Norway.

Guimaraens M. A. R., Do Coutto Filho M. B., Souza J. C. S. de (2014), “Enhanced Bad Data Processing by Phasor-Aided State Estimation”, IEEE Transactions on Power System, Volume: 29 Issue: 5.

Holland, J. H. (1975), “Adaptation in natural and artificial systems”, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press

Xu, B., & Abur, A. (2004), “Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs”, In Power Systems Conference and Exposition, IEEE PES (pp. 943-946).