



# VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005  
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 11 7735  
Tópico: Modelagem e Simulações

## METODOLOGIA PARA A ALOCAÇÃO ÓTIMA DE MEDIDORES DE QUALIDADE DE ENERGIA EM REDES TRANSMISSÃO E SUBTRANSMISSÃO PARA A MONITORAÇÃO DE VTCDs DEVIDO A CURTO-CIRCUITOS

ALMEIDA, C. F. M.

CAMILO, L.

KAGAN, N.

ENERQ/USP

### RESUMO

Este artigo técnico apresenta uma metodologia que permite, através do emprego de Algoritmos Genéticos, realizar a alocação ótima de medidores de Qualidade de Energia para redes de subtransmissão e transmissão de energia elétrica, quanto a ocorrência de VTCDs (Variações de Tensão de Curta Duração), devido a curto-circuitos.

A metodologia desenvolvida engloba simulações de ocorrência de VTCDs para um dado tipo de curto-circuito, ocasionadas em diferentes pontos de uma rede elétrica.

Como consequência da metodologia, é ilustrado um caso onde se determina o número mínimo de medidores necessários para se monitorar uma rede de subtransmissão real.

### PALAVRAS-CHAVE

Alocação Ótima, Algoritmos Genéticos, Afundamentos de Tensão.

### 1.0 INTRODUÇÃO

As VTCDs são perturbações causadas devido ao acionamento de grandes blocos de carga (partida de motores, energização de transformadores, etc.), ou devido a curtos-circuitos (com origem tanto nos sistemas consumidores, quanto nos sistemas supridores).

Normalmente, as VTCDs mais severas são causadas por curto-circuitos francos, os quais, em sistemas de transmissão e de subtransmissão, causam variações que podem ser percebidas a grandes distâncias do ponto da sua ocorrência. Dessa forma, elas podem ser

consideradas as maiores causadoras de reclamações por parte dos clientes, uma vez que podem causar mau funcionamento de equipamentos sensíveis à tensão de alimentação, interrompendo processos industriais e causando prejuízos consideráveis.

Elas estão entre as perturbações mais difíceis de serem monitoradas, pois são ocasionadas por fatores aleatórios e imprevisíveis, ou seja, a dificuldade não está em medir a magnitude e a duração que caracterizam essas perturbações, mas em saber qual a frequência de ocorrência e o início das mesmas.

Sendo assim, a literatura atual sugere que, para monitorar este fenômeno, seja feita a instalação de instrumentos de monitoração dedicados a registrar as VTCDs em todos os pontos (barras) do sistema. O inconveniente nesse método é a quantidade de equipamentos necessários para realizar a avaliação da Qualidade de Energia de um sistema elétrico, pois medições locais em múltiplos pontos fazem com que a avaliação torne-se uma atividade bastante onerosa, devido à quantidade de equipamentos necessários para a detecção das perturbações e para o tratamento do elevado volume de dados registrados, inviabilizando, por muitas vezes o desenvolvimento de um sistema de monitoração. Porém, com a reestruturação do modelo do setor elétrico, a preocupação com penalizações advindas das infrações aos limites, bem como o aumento da competitividade, fizeram com que a necessidade de se implementar um sistema de monitoração permanente fosse aumentada, uma vez que a energia passa a ser encarada como

um produto comercial, que deve ser visto não só sobre a ótica da continuidade, mas, também, de sua conformidade. Ou seja, empresas que fornecem energia com maior qualidade a um menor custo têm mais condições, sobre as demais, de atrair mercado, principalmente, dos consumidores que necessitam de energia elétrica livre de perturbações.

Nesse contexto, uma metodologia que determine o número mínimo de medidores de Qualidade de Energia necessários para monitorar uma rede elétrica, bem como os pontos onde os mesmos devam ser instalados, torna-se uma alternativa atraente.

A metodologia desenvolvida no artigo engloba simulações de ocorrência de VTCDs, oriundas de um determinado tipo de curto-circuito. Os diversos tipos possíveis de curtos-circuitos podem ser ocasionados em todos os pontos de uma rede elétrica qualquer, caracterizando o comportamento desse sistema elétrico frente a essa perturbação.

Dessa maneira, essa caracterização dos sistemas elétricos frente à ocorrência de VTCDs, engloba as características topológicas das redes elétricas, viabilizando a verificação da influência de cada defeito no próprio sistema em avaliação. Assim, possibilita-se a determinação dos pontos em que se deve instalar um medidor para que a área do sistema “observada” pelo mesmo seja a maior possível.

A alocação ótima de medidores de Qualidade de Energia determina as posições em que um determinado número de medidores devem ser instalados, para maximizar a monitoração sobre um sistema de potência qualquer.

A determinação do número mínimo de medidores de Qualidade de Energia determina o número de medidores necessários para se monitorar todo um sistema de potência com a menor redundância possível, isto é, cada barra do sistema tem que ser monitorada pelo menor número possível de medidores, mas as mesmas devem ser monitoradas por, pelo menos um medidor.

Logo, a Determinação do Número Mínimo é consequência da Alocação Ótima, pois para se determinar o menor número possível de medidores, deve-se maximizar a Observabilidade<sup>1</sup> de cada um.

A formulação do problema de otimização, as premissas, a avaliação estocástica e caracterização das redes elétricas em estudo são apresentadas em detalhes no artigo.

## 2.0 METODOLOGIA

Conforme apresentado anteriormente, a metodologia preocupa-se em determinar as

posições em que medidores de Qualidade de Energia devem ser instalados de forma a maximizar a capacidade de monitoração dos mesmos frente ao desempenho do sistema em estudo às VTCD's. Dessa forma, a variável do problema abordado nesse trabalho constitui na determinação das posições em que devem ser instalados os medidores.

### 2.1 Vetor-alocação

Sendo assim, para representar a instalação dos medidores, foi definido o Vetor-Alocação. Esse vetor é formado por 0's e 1's, e a sua dimensão varia com o número de barras do sistema em avaliação, já que cada coordenada do mesmo representa a instalação do medidor em uma barra determinada. A expressão (1), que segue, ilustra a definição do Vetor-Alocação  $V_{Aloc}$ :

$$V_{Aloc}(i) = \begin{cases} 1, & \text{para a instalação de medidor na barra } i \\ 0, & \text{para a não-instalação de medidor na barra } i \end{cases} \quad (1)$$

### 2.2 Matriz de observabilidade

O desempenho do sistema de potência em avaliação foi representado através de uma matriz com os valores das tensões de falta em cada uma das barras, para cada defeito simulado.

Essa matriz, denominada Matriz de Observabilidade, foi definida considerando que cada linha representaria a posição de defeito, isto é, a barra do sistema de potência em avaliação em que foi simulado um determinado tipo de curto-circuito; e que, em cada coluna, seriam armazenados os valores das tensões de falta da barra correspondente. Logo, supondo um sistema de 10 barras, para a avaliação em que fosse simulado um defeito trifásico na barra 5 do sistema, a tensão de falta da barra 8 seria armazenada na linha 5 e na coluna 8 da respectiva Matriz de Observabilidade.

A fim de simplificar e tornar a avaliação mais objetiva, para a montagem da matriz foi fixado como parâmetro um valor da amplitude das variações devido às simulações de defeitos. Isto foi feito de forma a permitir a determinação da alocação ótima para um nível de sensibilidade dado.

Fixando-se a amplitude de variação, as posições da matriz são preenchidas com 0 caso a diferença entre o valor da tensão de falta e o nominal não seja maior que a variação fixa, e com 1, quando ocorre a infração dos limites. A expressão (2), que segue, ilustra o procedimento descrito para montagem da matriz  $MO$ :

$$MO_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{quando defeito na barra } i \text{ faz com que tensão de} \\ & \text{falta na barra } j \text{ supere variação fixada} \\ 0, & \text{quando defeito na barra } i \text{ faz com que tensão de} \\ & \text{falta na barra } j \text{ não supere variação fixada.} \end{cases} \quad (2)$$

### 2.3 Vetor-redundância

Dados o Vetor-Alocação e a Matriz de Observabilidade para um determinado sistema, conforme descrito anteriormente, o Vetor-Redundância é obtido através da multiplicação da Matriz de Observabilidade pelo Vetor-Alocação, conforme ilustrado pela expressão (3) abaixo:

$$V_{Red} = MO_{ij} \times V_{Aloc} \quad (3)$$

Isso faz com que cada posição do Vetor-Redundância contabilize o número de medidores, que dispostos segundo  $V_{Aloc}$ , são capazes de monitorar o defeito na barra correspondente a sua posição, isto é, cada posição do Vetor-Redundância indica o número de medidores sensibilizados para um determinado tipo de curto-circuito aplicado em uma barra do sistema.

Para um Vetor-Redundância qualquer, caso a sua 3ª posição apresente o valor 2, isso representa que para um defeito na barra 3 do sistema, 2 medidores conforme a disposição definida pelo  $V_{Aloc}$  sugerido são sensibilizados, isto é, capazes de captar o defeito.

### 2.4 Modelagem

Tendo exposto quais são as ferramentas empregadas na metodologia, procede-se à modelagem do problema abordado nesse artigo. Já que a preocupação fundamental reside na alocação ótima, partiu-se da determinação do número mínimo de medidores, a fim de possibilitar a análise da influência de um medidor na Observabilidade do sistema. Isto é, uma vez determinado o número mínimo de equipamentos necessários e a disposição dos mesmos para garantir a total Observabilidade do sistema, tornar-se-ia possível averiguar a perda de Observabilidade com a redução de um medidor do número mínimo estabelecido, bem como a redundância da monitoração com o acréscimo de um medidor.

Dessa forma, o problema restringe-se na determinação do Vetor-Alocação com o menor número de 1's (medidores a serem instalados) possível, de forma que o Vetor-Redundância não apresente nenhuma posição com valor nulo (garantia da completa Observabilidade do sistema em avaliação).

Essa abordagem pode ser bem modelada através de AGs, uma vez que existe uma função-objetivo bem definida (minimização de medidores), e uma

função de penalização clara (a não-monitoração de um defeito).

#### 2.4.1 Algoritmos genéticos

O algoritmo básico do AG é constituído por quatro etapas principais:

- sorteio da população;
- avaliação;
- seleção (reprodução);
- cruzamento e mutação.

A Figura 1 que segue ilustra como essas etapas são inter-relacionadas de maneira a constituir o AG aplicado ao problema abordado nesse trabalho.

Basicamente, no AG são formuladas populações de indivíduos em diferentes etapas, cada população representa o conjunto de dados em que uma solução melhor adaptada para o problema será buscada.

O indivíduo do AG é formado por "cromossomos", os quais carregam as informações que determinam as características próprias daquele indivíduo. No AG, o cromossomo é representado pelo *string* (a Tabela 1 apresenta a analogia entre os entes biológicos e os equivalentes no AG).

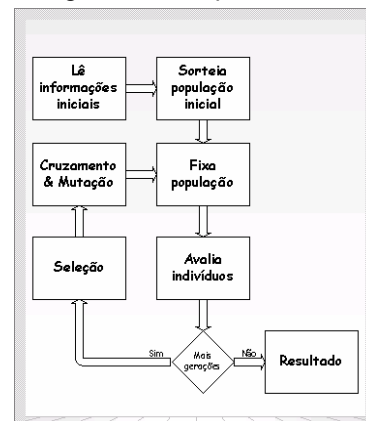


Figura 1- Fluxograma do Algoritmo Genético Básico

Tabela 1 - Tabela de equivalências

Tabela de equivalências	
Natureza	Algoritmo Genético
Cromossomo	String
Genes	Bits
Lócus	Posição do bit no string
Genótipo	Estrutura de dados
Fenótipo	Solução alternativa

Sendo assim, a principal finalidade das funções que constituem o AG é adequar o *string*, através da manipulação dos conjuntos de dados, de maneira que as possíveis soluções que eles constituem cada vez mais atendam de maneira adequada a requisição do problema.

No algoritmo básico é comum utilizar codificação binária, a qual se mostra muito eficiente na resolução de problemas de tomada de decisão, como no caso em questão.

A população inicial é criada de forma aleatória e então o processo, em *loop*, faz a avaliação de todos os indivíduos.

A avaliação do indivíduo é fornecida através de uma função de avaliação, como a que é mostrada abaixo pela expressão (4):

$$F_{aval} = \frac{1}{F_{obj} + r \cdot F_{pena}} \quad (4)$$

Onde:

- $F_{aval}$  é a função de avaliação;
- $F_{obj}$  é a função-objetivo que queremos minimizar;
- $F_{pena}$  é o número de vezes cujo indivíduo extrapolou as restrições;
- $r$  é um número muito alto (106 por exemplo).

Depois da avaliação, faz-se a seleção dos indivíduos, na qual a chance de cada indivíduo ser selecionado é proporcional a sua avaliação. Dessa maneira, um determinado indivíduo, com uma boa avaliação, pode ser selecionado mais de uma vez, uma vez que a chance de ele ser selecionado para constituir a próxima população é maior que a dos indivíduos mal-avaliados.

Em seguida, são aplicados aos indivíduos os operadores restantes do AG (cruzamento e mutação).

Assim, para uma dada probabilidade de cruzamento, seleciona-se proporcionalmente os indivíduos que sofreram cruzamento. Eles são agrupados dois a dois, de maneira aleatória. A determinação da posição do *string* (locus) a partir do qual se dá a troca de genes (informação) também é feita da forma aleatória.

Por fim, é aplicado o operador mutação em cada geração, isto é, a partir de uma probabilidade de ocorrência, determina-se qual o bit de um indivíduo de uma dada população será alterado.

No final, assume-se como resposta, o indivíduo mais bem avaliado entre todas as gerações.

#### 2.4.2 Algoritmo genético aplicado

Para resolver o problema de alocação dos medidores de qualidade de energia, o *string* de cada indivíduo do algoritmo genético consiste em  $n_M$  genes, que representam as  $n_M$  barras do sistema de potência em avaliação, onde podem ser alocados os medidores.

A função-objetivo do problema, cuja intenção é minimizar o somatório dos elementos do vetor de alocação, é apresentada abaixo através da expressão (5):

$$F_{obj} = \sum_{i=1}^{n_M} V_{Aloc}(i) \quad (5)$$

Onde:

- $n_M$  é o número de barras onde pode ser alocado medidores;
- $V_{Aloc}(i)$  é a posição  $i$  do vetor  $V_{Aloc}$ .

As restrições do problema foram consideradas através da função de penalização. Para este problema, cada simulação que apresentou redundância igual a zero — o que significa que o defeito na rede não foi “observado” por nenhum dos medidores da configuração do string em avaliação ( $V_{Aloc}$ ) — acrescenta-se uma unidade no valor do fator da penalização, conforme descrito na expressão (6).

Em seguida, como descrito para o algoritmo básico, multiplica-se o valor obtido com a função de penalização pela constante elevada e adiciona-se a ele o valor obtido com a função-objetivo.

O inverso dessa soma é o valor da função de avaliação deste indivíduo.

$$F_{pena} = \sum_{i=1}^{n_M} g(V_{Red}(i))$$

$$g(V_{Red}(i)) = \begin{cases} 1 & \text{se } V_{Red}(i) = 0 \\ 0 & \text{se } V_{Red}(i) \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

Onde:

- $n_M$  é o número de barras onde pode ser alocado medidores;
- $V_{Red}(i)$  é a posição  $i$  do vetor  $V_{Red}$ .

### 3.0 RESULTADOS

A metodologia foi empregada em duas redes reais, supostas equilibradas. Foram simulados defeitos fase-terra francos em todas as barras dos sistemas estudados.

Essa opção deve-se ao fato do defeito fase-terra, em geral, ser o menos severo.

Logo, a área de influência de um defeito desse tipo, em um determinado ponto de um sistema de potência qualquer, é menor que para qualquer outro tipo de defeito aplicado no mesmo ponto. Assim, a fim de garantir a observabilidade completa do sistema, o número de medidores necessários para monitorar um sistema qualquer frente a defeitos fase-terra é maior do que para os outros tipos de defeitos.

No entanto, nada impede a extensão da aplicação da metodologia, considerando os outros tipos de defeitos possíveis (trifásico, dupla-fase, dupla-fase terra).



### 3.2 Rede com 60 barras

Para a rede ilustrada na figura 3, foram feitas simulações de defeitos fase-terra e trifásico. Foram consideradas as contribuições do gerador de 5MW (barra 1332), uma vez que os outros geradores têm potência nominal pequena ou operam em situações de contigência. Em ambos os casos, a metodologia foi aplicada até que o número mínimo de medidores a serem alocados para a rede fosse alcançado. Foram utilizadas 300 gerações com 200 indivíduos.

Para o primeiro caso, o número mínimo de medidores foi 9. Uma possível configuração da alocação sugeriu a instalação de equipamentos nas barras 1349, 1263, 1418, 1343, 1257, 1260, 1336, 1372 e 1253. Essas barras estão identificadas na figura 3 por círculos contínuos. Para o caso de simulações de defeitos trifásicos, o número mínimo de medidores foi 5. Uma possível configuração da alocação sugeriu a instalação de equipamentos nas barras 1264, 1356, 1343, 1253, 1336. Essas barras estão identificadas na figura 3 por círculos tracejados.

Observou que, para uma rede desse porte, existe mais de uma disposição dos medidores que atende a restrição de minimização do número de equipamentos necessários. Logo, mais restrições podem ser implementadas de maneira a representar de forma mais fiel à realidade e de maneira a diminuir o universo de soluções.

### 4.0 CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida representa uma ferramenta importante no monitoramento de redes elétricas, uma vez que pode possibilitar a determinação da melhor alternativa para a alocação dos medidores de Qualidade de

Energia, considerando restrições econômicas pré-estabelecidas. Dessa forma, considerando um número de medidores inferior ao mínimo necessário para monitorar completamente uma rede elétrica qualquer, a metodologia apresenta a localização dos mesmos, utilizando um critério de priorização de áreas, de forma a maximizar a observabilidade e garantir que barras importantes do sistema sejam monitoradas.

### 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Olguin, G.; Bollen, M. H. J. - Optimal Dips Monitoring Program for Characterization of Transmission System - Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE.
- [2] Eldery, M. A.; El-Saadany, E. F.; Salama, M. M. A. - Optimum Number and Location of Power Quality Monitors – ICHQP 2004.
- [3] Ammer, C.; Renner, H. - Determination of the Optimum Measuring Positions for Power Quality Monitoring – ICHQP 2004.
- [4] Bollen, M. H. J.; Qader, M. R.; Allan, R. N. - Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System – IEEE Transactions on Industry Applications, Jan./Feb. 1999.
- [5] Bollen, M. H. J.; Qader, M. R.; Allan, R. N. – Stochastic and Statistical Assessment of Voltage Dips - Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200), IEE Colloquium on.
- [6] Olguin, G. - Stochastic Assessment of Voltage Dips Caused by Faults in Large Transmission System - Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering - Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology - Göteborg, Sweden 2003.