
APLICAÇÃO DE ALGORITMOS GENÉTICOS E TEORIA DOS CONJUNTOS FUZZY NO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE MONITORAÇÃO PARA REDES DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

C. F. M. Almeida*

carlos.almeida@poli.usp.br

N. Kagan*

nelsonk@pea.usp.br

*ENERQ - USP

RESUMO

Neste artigo é apresentada a aplicação de Algoritmos Genéticos (AGs) e Conjuntos Fuzzy no dimensionamento de sistemas para a monitoração de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) em redes de transmissão de energia elétrica.

De acordo com a metodologia proposta, são simulados diferentes tipos de curto-circuitos em diversos pontos, com o intuito de caracterizar o Sistema Elétrico de Potência (SEP) em avaliação com relação a ocorrência de VTCDs. Em seguida, diferentes configurações para o sistema de monitoração, isto é, número de medidores e barras em que os mesmos devam ser instalados, são avaliadas através de AGs, com o objetivo de garantir que ao menos um dos medidores seja sensibilizado para cada um dos curto-circuitos simulados.

Duas formas de modelagem do AG são apresentadas, sendo uma utilizando vetores binários para a decisão da instalação de medidores nas barras do SEP e a outra utilizando vetores inteiros, para a indicação das barras do SEP em que devem ser instalados os medidores.

É feita a comparação das duas modelagens, bem como a avaliação dos resultados fornecidos pela metodologia para uma rede de transmissão real de 154 barras. A metodologia também é aplicada na rede teste de 30 barras do IEEE, de modo a permitir a comparação da mesma com trabalhos semelhantes na área.

PALAVRAS-CHAVE: alocação ótima de medidores, monitoração da qualidade de energia, variações de tensão de curta duração, algoritmos genéticos, teoria dos conjuntos fuzzy.

ABSTRACT

Allocation of Power Quality Meters by Genetic Algorithms and Fuzzy Sets Theory

The aim of this article is to present the application of Genetic Algorithms (GAs) and Fuzzy Mathematical Programming in the design of voltage sag and swell monitoring systems for power transmission networks.

The proposed methodology uses the simulation of different types of short-circuit in many different points of the power system, in order to characterize the system behavior towards the occurrence of voltage sags and swells. Then, different configurations for the monitoring system, i.e. number of monitors and buses where they are supposed to be installed, are assessed through GAs.

Two different GA codifications are presented, namely one based on binary vectors, for the decision over the installation of a monitor in a specific bus of the power system and another based on integer vectors, in order to indicate in which buses the monitors should be installed.

A comparison between the two models is presented. The evaluation of the methodology performance is determined for a real 154 bus transmission network. The methodology is also applied for the IEEE 30 bus network, in order to allow its comparison with a previous research work.

Artigo submetido em 05/11/2008 (Id.: 00917)

Revisado em 01/04/2009, 29/10/2009, 25/03/2010

Aceito sob recomendação do Editor Associado Prof. Alexandre Bazanella

KEYWORDS: optimal power quality meters allocation, power quality monitoring, voltage sags and swells, genetic algorithms, fuzzy sets theory.

1 INTRODUÇÃO

Com a reestruturação do setor elétrico, a preocupação com penalizações advindas das infrações aos limites regulatórios, bem como o aumento da competitividade, acentuaram a necessidade de se implementar sistemas de monitoração permanente nas redes de transmissão. A energia elétrica passou a ser encarada como um produto comercial, que deveria ser visto não só sob a ótica da continuidade, mas, também, da conformidade. Ou seja, empresas capazes de fornecer energia com maior qualidade a um custo menor, estariam mais aptas, com relação às demais, de se destacar no mercado, almejando, assim, uma parcela maior do mesmo, principalmente entre os consumidores que necessitam de energia elétrica livre de perturbações.

Nesse novo ambiente, o conhecimento da frequência de ocorrência das perturbações, bem como as durações das mesmas, passou a ser essencial para que as concessionárias de energia possam atender os seus consumidores de forma satisfatória. Logo, uma metodologia que determine o número mínimo de medidores de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) necessários para monitorar uma rede elétrica, bem como os pontos onde os mesmos devem ser instalados, torna-se uma alternativa atraente para as concessionárias de energia no dimensionamento dos sistemas de medição.

Dentro deste contexto, diversos trabalhos apresentando alternativas para determinar a alocação ótima de medidores de QEE foram publicados. Dentre os mesmos, alguns merecem destaque especial pelo pioneirismo das abordagens adotadas (Olguin & Bollen, 2003; Olguin, 2003; Olguin, 2005; Eldery *et al.*, 2004; Ammer & Renner, 2004). Ammer e Renner (2004) desenvolvem um método estatístico que determina os pontos do sistema mais susceptíveis às perturbações; porém, devido a própria abordagem estatística do problema, não é garantida a monitoração de todas as perturbações a que o sistema pode vir a ser submetido. Eldery *et al.* (2004) definem um algoritmo de análise topológica do sistema, de maneira a garantir que as variáveis de estado não-monitoradas possam vir a ser estimadas pelas variáveis de estado monitoradas. A desvantagem dessa metodologia está no sobre-dimensionamento que a mesma pode causar, uma vez que, para garantir a monitoração de todas as perturbações a que um sistema possa vir a ser submetido, nem sempre é necessário garantir a estimação de todas as variáveis de estado do sistema. Este sobre-dimensionamento é ilustrado neste artigo, através da aplicação da metodologia proposta na mesma rede de 30 barras do IEEE, utilizada por Eldery *et al.* (2004). No contexto nacional, em (Reis *et al.* 2007; Reis *et al.*, 2008)

é apresentada uma alternativa para alocação de medidores de QEE seguindo a abordagem apresentada em (Eldery *et al.*, 2004).

Apenas na metodologia desenvolvida em (Olguin & Bollen, 2003; Olguin, 2003; Olguin, 2005) é considerado diretamente o aspecto transitório referente às ocorrências de VTCDs. Em (Olguin & Bollen, 2003; Olguin, 2005), a determinação da alocação ótima dos medidores é obtida através de Programação Linear-Inteira; porém, a metodologia não fornece flexibilidade e facilidade para considerar restrições comuns no dimensionamento dos sistemas de monitoração, tais como a preferência por determinadas barras para a instalação dos medidores, a impossibilidade de instalação dos equipamentos em determinadas barras e diferentes custos dos equipamentos, de acordo com o nível de tensão. A fim ampliar as possibilidades de modelagem do problema, uma nova modelagem para o problema é aqui proposta, através da utilização de AGs.

A modelagem do problema de alocação de medidores de QEE utilizando AGs foi introduzida em (Almeida & Kagan, 2005). Neste trabalho inicial, uma forma de modelagem foi apresentada e empregada em redes elétricas simples, a fim de avaliar a viabilidade da metodologia. Os resultados promissores deste trabalho motivaram a realização de uma pesquisa mais aprofundada sobre o tema, gerando a execução do trabalho apresentado no presente artigo, que se baseou em (Almeida, 2007).

As perturbações consideradas no presente artigo são as VTCDs, causadas devido ao acionamento de grandes blocos de carga (partida de motores, energização de transformadores, etc.), ou devido a curto-circuitos, com origem tanto nos sistemas consumidores quanto nos sistemas supridores. Normalmente, as VTCDs mais severas são originadas por curto-circuitos francos ou de baixas impedâncias de defeito, que causam variações percebidas mesmo a grandes distâncias do ponto da sua ocorrência. Tais eventos são considerados como uma das principais causas de reclamações por parte dos clientes das concessionárias de energia elétrica, uma vez que podem provocar o mau funcionamento de equipamentos sensíveis às variações na tensão de fornecimento, interrompendo processos industriais e gerando prejuízos consideráveis. São também perturbações de difícil monitoramento, uma vez que são ocasionadas por fatores aleatórios e imprevisíveis. A dificuldade não está só em medir a magnitude e a duração que as caracterizam, mas em determinar a frequência de ocorrência e o instante de início das mesmas. Sendo assim, a literatura atual sugere que seja feita a instalação de instrumentos de medição dedicados em todos os pontos do sistema de potência em que se deseja monitorar a ocorrência das VTCDs (Bollen *et al.*, 1998; Bollen *et al.*, 1999; Bollen, 2000). O inconveniente é obviamente a quantidade de equipamentos

necessários, uma vez que medições locais em múltiplos pontos fazem com que a avaliação seja uma atividade bastante onerosa, devido à quantidade de equipamentos necessários para a detecção das perturbações, e ao tratamento do elevado volume de dados registrados, inviabilizando, por muitas vezes, o próprio sistema de monitoração.

A metodologia desenvolvida neste trabalho engloba simulações de VTCDs devido aos diversos tipos possíveis de curtos-circuitos em diferentes pontos das redes elétricas (tanto nas barras, quanto ao longo das linhas que as compõem), de forma que se permita caracterizar o comportamento do sistema elétrico frente a essa perturbação. Essa caracterização dos sistemas elétricos frente às ocorrências de VTCDs considera as características topológicas das redes elétricas, viabilizando a verificação da influência de cada defeito no próprio sistema em avaliação. Desta forma, 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.

2 O PROBLEMA DA ALOCAÇÃO ÓTIMA DE MEDIDORES DE QEE

A alocação ótima de medidores de QEE determina as posições em que os mesmos devem ser instalados, de modo que a área de monitoração sobre um sistema de potência qualquer seja maximizada. Ou seja, dado um medidor, este deve ser instalado em um ponto do sistema de potência de modo que ele seja capaz de “observar” o maior número de perturbações a que o sistema venha a ser submetido. O conceito de **Observabilidade** representa essa capacidade de um medidor instalado em uma dada barra de um sistema de potência “observar”, isto é, ser sensibilizado para as variações de tensão que venham a ocorrer. O intuito deste conceito é de permitir a quantificação do alcance da monitoração de um medidor instalado em um determinado ponto do sistema em avaliação frente às possíveis perturbações.

Por outro lado, a determinação do número mínimo de medidores de QEE busca estabelecer o número de equipamentos necessários para se monitorar todo um sistema de potência com a menor redundância possível. Isto é, considerando o caso limite (no qual cada barra do sistema teria que ser monitorada por pelo menos um medidor), cada uma das perturbações a que o sistema pode vir a ser submetido, seria “observada” por pelo menos um dos medidores instalados. O conceito de **Grau de Observabilidade** representa essa característica de um dado sistema elétrico de potência, em ter as perturbações a que ele possa vir a ser submetido “observadas” por pelo menos um dos medidores a serem instalados no mesmo. O intuito deste conceito é o de permitir a quantificação da qualidade de um sistema de medição diante das possíveis perturbações. Portanto, este termo verifica a ampli-

tude da cobertura que um determinado sistema de medição é capaz de realizar, combinando a redundância na monitoração de cada perturbação e a quantidade de equipamentos.

Sendo assim, intuitivamente, percebe-se que os conceitos definidos anteriormente estão intrinsecamente ligados, pois o número mínimo de medidores é atingido através da alocação ótima dos mesmos, isto é, a partir da instalação dos medidores em pontos estratégicos de um sistema de potência, possibilita-se a redução do número de equipamentos necessários para a sua completa monitoração.

2.1 Configuração de Medidores para o Sistema de Monitoração (Vetor-Alocação)

O *Vetor-Alocação* indica o número de medidores necessários para monitorar um SEP e em quais pontos do SEP devem ser instalados os equipamentos de medição.

A sua configuração é, então, justificada pelo fato do problema abordado se tratar de um problema de decisão dupla, no qual a solução deve satisfazer duas variáveis simultaneamente:

- Uma referente à decisão sobre a instalação, ou não, de um medidor;
- E outra referente à decisão da posição do SEP em avaliação que um medidor deve ser instalado.

Sendo assim, o *Vetor-Alocação* foi definido de duas formas distintas, de modo a averiguar qual a alternativa mais eficiente para a modelagem da solução do problema.

2.1.1 Vetor-Alocação Binário

Inicialmente, o *Vetor-Alocação* definido teve sua dimensão fixada de acordo com o número de barras do SEP em avaliação. Isto é, cada posição do vetor representa um possível ponto de instalação do medidor, mais especificamente um barra determinada.

Logo, a questão referente à determinação do número de medidores necessários fica aberta, uma vez que todas as barras do sistema apresentam a mesma possibilidade de ter um medidor instalado.

A decisão pela instalação ou não de um medidor em uma determinada barra é feita através do preenchimento de cada uma das posições do vetor. Elas são preenchidas por 0's (“zeros”) ou 1's (“uns”), indicando a não-instalação ou a instalação de um medidor, respectivamente.

A expressão (1) que segue, ilustra a definição do *Vetor-Alocação Binário*:

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

A fim de ilustrar o *Vetor-Alocação Binário*, a Figura 2, que segue, exibe um exemplo para um sistema de 12 barras, no qual é sugerida a instalação de equipamentos nas barras de índices 1, 3, 5 e 10.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0

Figura 2 - Exemplo de *Vetor-Alocação Binário* Transposto

2.1.2 Vetor-Alocação Inteiro

O *Vetor-Alocação Inteiro* tem sua dimensão fixada de acordo com o número máximo de medidores permitidos pela receita disponível para a aquisição do sistema de monitoração, isto é, a questão referente à determinação do número de medidores necessários fica restringida pelo tamanho do vetor.

A decisão pela instalação de um medidor em uma determinada barra é realizada através do preenchimento de cada uma das posições do vetor com um número aleatório, que corresponde ao índice de uma das barras do SEP em avaliação, seguindo implementação semelhante à desenvolvida em (Gallego *et al.*, 2001). A expressão (2), que segue, ilustra a definição do *Vetor-Alocação Inteiro*:

$$V_{Aloc}(i) = n, \text{ para instalação do medidor } i \text{ na barra } n, \text{ sendo que } n \text{ pode variar de } 1 \text{ ao número de barras do SEP em avaliação} \quad (2)$$

Essa mudança diminui consideravelmente o número de combinações de possíveis alocações de medidores. Na determinação de cada posição do vetor, todas as barras do sistema passam a ter a mesma probabilidade de serem escolhidas.

A fim de ilustrar o *Vetor-Alocação Inteiro*, a Figura 3, que segue, exibe um exemplo no qual o número máximo de medidores permitido é de 5 equipamentos. Ele sugere a instalação de medidores nas barras de índices 1, 3, 5 e 10.

Medidores a serem Alocados

→

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
01	03	05	10	03

Figura 3 - Exemplo de *Vetor-Alocação Inteiro* Transposto

Note que no vetor exemplo da Figura 3, propositalmente há a repetição do número 3, como se os medidores 2 e 5 dessem ser instalados na mesma barra (a barra de índice 3). Esse fato indica que para monitorar o suposto SEP seriam necessários apenas 4 medidores, e que os mesmos deveriam ser alocados nas barras indicadas. O número máximo de medidores que podem ser alocados (5 medidores no máximo) excede o mínimo necessário para que o SEP tenha **Grau de Observabilidade** máximo dentro da **Redundância** mínima de monitoração (**Redundância** unitária, isto é, pelo menos um medidores monitorando cada um dos defeitos passíveis de ocorrerem nesse SEP).

Porém, para os casos em que a preocupação seria garantir a monitoração de determinados pontos de um SEP qualquer, esse fato pode ser interpretado diferentemente, isto é, para os casos em que a preocupação seria ter uma monitoração redundante de determinados pontos de um SEP (logo, redundância mínima diferente da unitária) ele indicaria que na barra 3 do SEP deveriam ser instalados 2 medidores de modo que o SEP em avaliação continuasse tendo **Grau de Observabilidade** máximo dentro da **Redundância** de monitoração especificada.

2.2 Avaliação da Eficiência de um Sistema de Monitoração

Com o intuito de verificar a eficiência de um sistema de monitoração, é necessário verificar se uma determinada configuração de alocação de medidores é capaz de detectar a ocorrência de qualquer uma das possíveis VTCDs no sistema elétrico em estudo. Sendo assim, foram definidos os conceitos de *Matriz de Observabilidade* e *Vetor-Redundância*, conforme (Olguin & Bollen, 2003; Olguin, 2003; Olguin, 2005).

2.2.1 Matriz de Observabilidade (MO)

Para mapear o desempenho de um SEP qualquer frente às possíveis ocorrências de VTCDs, foi definida uma matriz com os valores das tensões de falta em cada uma das barras, para cada defeito simulado. Essa matriz foi considerada que cada linha representa a posição de defeito, isto é, uma barra ou um ponto no meio de uma linha do SEP em avaliação em que foi simulado um determinado tipo de curto-circuito. Em cada coluna armazena os valores das tensões de falta de cada barra.

A fim de simplificar e tornar a avaliação mais objetiva, a partir dessa matriz definiu-se a *Matriz de Observabilidade*, seguindo implementação semelhante a desenvolvida em (Olguin & Bollen, 2003; Olguin, 2003; Olguin, 2005), que é obtida fixando-se o valor da magnitude das tensões de falta, a partir do qual se deseja que os medidores sejam sensibili-

zados (*Nível de Disparo* - u_d - dos medidores).

Assim, para o caso de avaliação de Afundamentos de Tensão, fixa-se adequadamente o *Nível de Disparo* desejado, por exemplo, $u_d \in [0,1 \text{ pu}; 0,9 \text{ pu}]$, de acordo com a (IEEE Std. 1346, 1998). As posições da matriz são então preenchidas com 0's (zeros), caso o valor da tensão de falta esteja fora da faixa *Nível de Disparo* fixado, e com 1's, caso contrário. Já para a avaliação de Elevações de Tensão, fixando-se adequadamente o *Nível de Disparo* desejado, por exemplo $u_d \in [1,1 \text{ pu}; \infty)$, de acordo com a referência (IEEE Std. 1346, 1998), as posições da matriz são preenchidas com 0's (zeros), caso o valor da tensão de falta esteja fora da faixa de *Nível de Disparo* fixado, e com 1's, caso contrário.

A expressão (3) que segue ilustra o procedimento descrito para montagem da *Matriz de Observabilidade*, para o caso da avaliação de afundamentos de tensão:

$$mo_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \text{ for igual ou ficar abaixo do } \textit{Nível de Disparo} \text{ fixado } (mo_{ij} \leq u_d) \\ 0, \text{ quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \text{ não fique abaixo do } \textit{Nível de Disparo} \text{ fixado } (mo_{ij} > u_d) \end{cases} \quad (3)$$

Analogamente, a expressão (4) que segue ilustra o procedimento descrito para montagem da *Matriz de Observabilidade*, para o caso da avaliação de elevações de tensão:

$$mo_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \text{ for igual ou ficar acima do } \textit{Nível de Disparo} \text{ fixado } (mo_{ij} \geq u_d) \\ 0, \text{ quando defeito } i \text{ faz com que tensão de falta na barra } j \text{ não fique acima do } \textit{Nível de Disparo} \text{ fixado } (mo_{ij} < u_d) \end{cases} \quad (4)$$

A fim de ilustrar a obtenção de uma *Matriz de Observabilidade* para um determinado SEP, suponha uma matriz de tensões de falta para um SEP de 12 barras, conforme ilustrado pela Figura 4.

Fixando-se o *Nível de Disparo* em 0,9 pu, resulta a *Matriz de Observabilidade* ilustrada na Figura 5.

Logo, percebe-se que a qualidade do resultado obtido pela metodologia está relacionada com a precisão do “mapeamento” do desempenho do SEP em avaliação frente às VTCDs passíveis de ocorrerem no mesmo, ou seja, está re-

		Barras do SEP →											
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Defeitos Simulados ↓	[1]	0.20	0.52	1.00	0.88	0.89	0.89	0.96	0.87	0.96	0.96	0.97	0.91
	[2]	0.39	0.27	1.00	0.81	0.86	0.83	0.95	0.80	0.95	0.95	0.96	0.86
	[3]	1.00	1.00	0.14	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	[4]	0.75	0.72	0.99	0.49	0.87	0.50	0.94	0.50	0.93	0.93	0.94	0.57
	[5]	0.94	0.95	1.00	0.97	0.31	0.97	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.98
	[6]	0.70	0.67	0.99	0.28	0.83	0.10	0.91	0.32	0.91	0.91	0.92	0.49
	[7]	0.97	0.97	1.00	0.98	0.96	0.97	0.51	0.98	0.67	0.74	0.79	0.98
	[8]	0.74	0.71	0.99	0.50	0.87	0.53	0.94	0.47	0.94	0.93	0.94	0.59
	[9]	0.99	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99	0.87	0.99	0.16	0.79	0.85	0.99
	[10]	0.97	0.97	1.00	0.98	0.96	0.97	0.75	0.98	0.54	0.49	0.64	0.98
	[11]	0.97	0.97	1.00	0.98	0.97	0.97	0.75	0.98	0.52	0.53	0.08	0.98
	[12]	0.92	0.90	1.00	0.79	0.96	0.82	0.98	0.80	0.98	0.98	0.98	0.17
	[13]	0.98	0.98	1.00	0.98	0.97	0.98	0.82	0.98	0.64	0.67	0.43	0.99
	[14]	0.98	0.98	1.00	0.99	0.98	0.98	0.85	0.99	0.67	0.73	0.53	0.99
	[15]	0.95	0.95	1.00	0.97	0.89	0.96	0.98	0.97	0.98	0.98	0.98	0.97

Figura 4 - Exemplo de Matriz de Tensões de Falta

		Barras do SEP →											
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Defeitos Simulados ↓	[1]	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
	[2]	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
	[3]	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	[4]	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
	[5]	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	[6]	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
	[7]	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
	[8]	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	1
	[9]	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
	[10]	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
	[11]	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
	[12]	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
	[13]	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
	[14]	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
	[15]	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Figura 5 - Exemplo de Matriz de Observabilidade

lacionado com os critérios de obtenção da *Matriz de Observabilidade* (número de defeitos simulados, tipos de defeitos simulados, impedância de defeitos consideradas, posição de ocorrência dos defeitos, etc.).

2.2.2 Vetor-Redundância

Definidos o *Vetor-Alocação* e a *Matriz de Observabilidade* para um determinado SEP, conforme descrito anteriormente, o *Vetor-Redundância* é obtido através da multiplicação da *Matriz de Observabilidade* pelo *Vetor-Alocação*, conforme ilustrado pela expressão (5).

$$V_{Red} = MO \times V_{Aloc} \quad (5)$$

Defeitos Simulados →														
[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	[15]
2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	1	0	1	1	1

Figura 6 - Exemplo de *Vetor-Redundância* Transposto

Essa operação faz com que cada posição do *Vetor-Redundância* contabilize o número de medidores, que dispostos segundo o *Vetor-Alocação*, são sensibilizados para um determinado defeito armazenado na *Matriz de Observabilidade*.

A Figura 6 ilustra o *Vetor-Redundância* obtido a partir do *Vetor-Alocação* e da *Matriz de Observabilidade* fixados nas Figuras 1 e 3.

Para que a multiplicação definida pela expressão (5) seja possível para ambos os tipos de *Vetores-Alocação*, é necessário que, no caso da utilização de *Vetores-Alocação Inteiros*, os mesmos sejam convertidos para o formato *Binário*, a fim de determinar as **Redundâncias** com relação à monitoração de cada um dos defeitos da *Matriz de Observabilidade*.

2.3 Equacionamento do Problema de Alocação Ótima de Medidores de QEE por Programação Linear Inteira

De acordo com o trabalho desenvolvido em (Olguin & Bolten, 2003; Olguin, 2005), o problema de alocação ótima de medidores de QEE pode ser equacionado através de Programação Linear Inteira. As expressões (6) e (7) ilustram tal equacionamento.

$$\min \sum_{j=1}^m v_{aloc,j} \quad (6)$$

s.a.

$$v_{red,i} = \sum_{j=1}^m (mo_{ij} \cdot v_{aloc,j}) \geq 1; \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

Onde:

- $v_{aloc,j}$: refere-se à variável binária, que corresponde à posição j do *Vetor-Alocação Binário* V_{Aloc} de m posições (no caso, este *Vetor-Alocação* refere-se a um sistema com m barras);
- $v_{red,i}$: refere-se ao elemento armazenado na posição i do *Vetor-Redundância* V_{Red} de n posições (no caso,

este *Vetor-Redundância* refere-se a uma avaliação que levou em conta a simulação de n defeitos);

- $mo_{i,j}$: refere-se ao elemento armazenado na linha i e na coluna j da *Matriz de Observabilidade MO* de dimensões n linhas por m colunas.

A formulação (6)-(7) é um problema de programação linear inteira mista que pode ser tratado por métodos de otimização tradicionais, como realizado em (Olguin, 2005). No entanto, dada a grande quantidade de variáveis inteiras e, portanto de combinações possíveis (Kagan, 1999), este artigo propõe a solução do problema por algoritmos genéticos, conforme abordado no item seguinte. Esta técnica não só permite a determinação de soluções otimizadas para o problema de alocação de medidores, como também a consideração de funções objetivo e restrições não lineares ou não explicitadas na forma de expressões matemáticas.

3 ALGORITMOS GENÉTICOS APLICADOS AO PROBLEMA DE ALOCAÇÃO ÓTIMA DE MEDIDORES DE QEE

A utilização de AGs para a formulação desse problema de otimização constitui uma alternativa interessante, pois, a codificação binária em que o AG é baseado representa adequadamente a questão de decisão da instalação dos equipamentos em determinados pontos do sistema de potência em avaliação.

O principal fator que torna a utilização de AGs uma alternativa interessante se deve ao fato de que o problema de alocação ótima de medidores de QEE constitui-se, basicamente, em um problema de busca. Isto é, a possibilidade de instalação de equipamentos de monitoração em cada barra da rede elétrica em estudo faz com que o universo de possíveis soluções cresça de forma binária. Logo, para uma rede elétrica com N barras, o universo de soluções (possíveis configurações do sistema de medição) seria 2^N .

Dependendo da dimensão do sistema em estudo (número total de barras), a avaliação de todas as possíveis combinações pode atingir número altíssimos, tornando inviável a avaliação de todas as possíveis soluções e, assim, sendo necessário a utilização de métodos de busca inteligentes, como os AGs.

A utilização dos AGs advém justamente da velocidade com que eles são capazes de encontrar uma solução, não necessariamente a ótima, mas que não transgride as restrições do problema e atende aos objetivos de forma satisfatória. Isto é, com a utilização dos AGs abre-se mão da solução ótima (que poderia levar muito tempo para ser obtida através dos métodos formais), a fim de se obter uma solução satisfatória dentro de um espaço de tempo razoável. Desta forma a utili-

zação de AGs torna-se vantajosa fundamentalmente devido a dois aspectos principais:

- velocidade para a obtenção de uma solução: uma vez que métodos tradicionais poderiam levar tempo significativo de processamento (como no caso de uma busca cega ou mesmo um método de otimização convencional);
- garantia do processo de busca caminhar a favor da convergência: as possíveis soluções avaliadas a cada geração são sempre tentativas de melhorar as soluções avaliadas nas gerações anteriores. O mesmo não acontece na utilização do Método de Monte Carlo, por exemplo, onde os parâmetros da solução são determinados de forma aleatória, sem a garantia de que as alterações feitas estejam a favor da convergência.

Portanto, a justificativa primordial para a utilização de AGs deve-se justamente à dimensão do universo de possíveis soluções e ao fato dos AGs serem capazes de obter uma solução satisfatória percorrendo apenas um número razoável das possíveis soluções.

Utilizando-se uma modelagem baseada em AGs e Conjuntos Fuzzy, restrições e objetivos não lineares, mesmo aqueles que não podem ser expressos explicitamente por expressões matemáticas, podem ser facilmente incorporados ao processo de avaliação das possíveis soluções.

Vale ressaltar que diversas modificações no funcionamento do AG básico foram implementadas e testadas, e que as mesmas são descritas ao longo do texto deste artigo, de acordo com as dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho. Entre as modificações implementadas, podemos adiantar:

- Seleção por Torneio, ao invés da tradicional técnica da Roleta;
- Manutenção do melhor indivíduo de uma dada geração na próxima geração (Elitismo);
- Modificação da codificação do indivíduo (duas formas de modelagem foram avaliadas - modelagem binária e modelagem inteira);
- Modificação do processo de seleção da população inicial, a fim de produzir indivíduos que correspondessem a um baixo número de medidores de QEE.

Além disso, foi empregada a Teoria dos Conjuntos Fuzzy de forma a permitir definição dos diferentes objetivos/restrições de forma heurística: maximização da **Observabilidade** e

minimização do número de equipamentos. No processo de busca, o número de equipamentos sugeridos, bem como o número de defeitos “observado” em cada possível solução podem, muitas vezes, interferir de forma negativa, comprometendo a convergência.

Com o emprego da Teoria dos Conjuntos Fuzzy, os objetivos e as restrições do problema passam a ser modelados por funções matemáticas alternativas, trocando-se a avaliação quantitativa do atendimento aos mesmos por uma avaliação qualitativa, e que está mais aderente à realidade do problema. Com essa mudança na forma de definição dos objetivos e das restrições do problema, também é facilitada a inclusão de diferentes aspectos do problema (pontos de instalação permitidos, cargas com monitoração obrigatória, etc.), que seriam bem mais difíceis de serem considerados em modelagens utilizando Programação Linear-Inteira.

3.1 Descrição do Funcionamento do AG Básico

Com o problema da alocação ótima de medidores de QEE tornou-se necessária a criação de uma abordagem específica frente à análise dos SEPs, uma vez que ele agrega a necessidade de avaliar várias alternativas de configurações de alocação de medidores simultaneamente. Essa abordagem ainda teve que ser sofisticada, de modo que permitisse sistematizar a busca pela melhor solução. Sendo assim, fez-se necessário o estabelecimento de uma série de definições, apresentadas a seguir, que, além de facilitar a difusão dos resultados ao leitor, evitassem a constante repetição de cálculos matriciais complexos, inerentes a análise dos SEPs.

Uma vez que o método de busca de solução escolhido foi o AG, cabe neste ponto uma breve descrição dos seus principais fundamentos, pois as configurações dos principais parâmetros do mesmo exercem influência direta nos resultados da metodologia elaborada.

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

- Sorteio da População;
- Avaliação;
- Seleção (Reprodução);
- Cruzamento e Mutação.

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

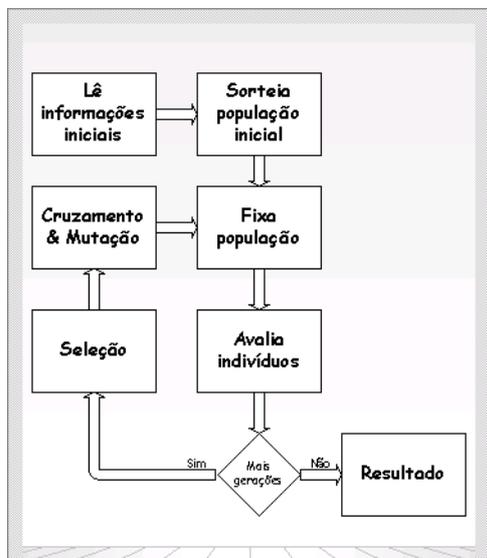


Figura 1 - Fluxograma do Algoritmo Genético Básico

Basicamente, no AG são formuladas populações de indivíduos, que correspondem a possíveis soluções para um problema, em diferentes etapas ou gerações. Em cada etapa, são aplicados aos indivíduos os operadores Seleção, Cruzamento e Mutação, analogamente ao processo biológico da seleção natural, de maneira que as respostas sofram alterações convenientes. Logo, as alterações são ponderadas pela adaptabilidade de cada indivíduo, isto é, pelo atendimento de cada possível solução às restrições e objetivos pertinentes ao problema em análise, de maneira que os indivíduos sofram alterações favoráveis para que o AG convirja para uma solução que melhor satisfaça o problema, ou seja, a solução melhor adaptada.

Cada indivíduo do AG é formado por bits, os quais carregam as informações que determinam as características próprias daquele indivíduo, ou seja, parâmetros pelos quais o AG irá avaliar cada indivíduo (possível solução), de modo a averiguar o grau de satisfação dessa solução às restrições e objetivos do problema. Desse modo, a principal finalidade das funções que constituem o AG é adequar os indivíduos que compõem cada população de uma determinada geração, através da manipulação dos seus conjuntos de bits, de maneira que as possíveis soluções que eles constituem, cada vez mais, satisfaçam os objetivos e restrições do problema.

O algoritmo básico é caracterizado pela utilização da codificação binária, a qual se mostra muito eficiente na resolução de problemas de tomada de decisão, como no caso em questão.

Porém, há casos em que uma codificação alternativa, utili-

zando inteiros, apresenta uma convergência melhor, principalmente quando a aplicação de codificação binária implicar em indivíduos de tamanho muito grande, como também é o caso deste problema. Neste trabalho as duas formas de aplicação dos AGs são efetuadas, permitindo avaliar a melhor para o problema em questão.

3.1.1 Utilização da Teoria dos Conjuntos Fuzzy

A Teoria de Conjuntos Fuzzy pode ser utilizada em problemas de tomada de decisão (Kagan, 1999; Kagan & Oliveira, 1999), como é o caso do problema abordado. Ela representa uma alternativa à abordagem de problemas de tomada de decisão, que podem ser considerados como problemas de otimização. Sendo assim, na sua aplicação, deseja-se determinar uma solução que “satisfaça” de forma simétrica tantos os objetivos quanto as restrições do problema.

Utilizam-se funções de pertinência para os objetivos e para as restrições que descrevem o grau de satisfação para uma possível solução do problema em análise.

No caso do problema tratado neste trabalho, adotou-se uma função de pertinência para o objetivo (μ_{obj}), que indica o quão mais próximo de 1 (alocação mínima para monitoração de um SEP) é o número de medidores sugeridos por um possível *Vetor-Alocação*; e uma função de pertinência para a restrição (μ_{res}), que indica o quanto melhor um *Vetor-Redundância* está para uma possível solução (*Vetor-Alocação*), considerando uma meta mínima de redundância unitária para cada falta. A decisão que avalia se os resultados de ambos, objetivos e restrições, estão satisfatórios é tomada através de uma função de pertinência de decisão (μ_{dec}), a qual, dessa maneira, agrega os resultados dos objetivos e das restrições. A expressão (8) ilustra a expressão descrita.

$$\mu_{dec} = \mu_{obj} \otimes \mu_{res} \quad (8)$$

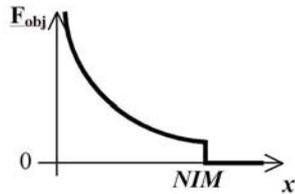
Onde:

- μ_{obj} : função de pertinência para o objetivo;
- μ_{res} : função de pertinência para as restrições;
- μ_{dec} : função de pertinência para a decisão;
- \otimes : representa o operador de agregação.

3.1.1.1 Função - Objetivo

A função-objetivo proposta tem a finalidade de minimizar o número de medidores a serem alocados segundo um *Vetor-Alocação*. Ela é apresentada através da expressão (9):

$$F_{obj}(x) = \begin{cases} \frac{1}{x}, & \text{se } t < x < NIM \\ 0, & \text{se } NIM \geq x \end{cases} \quad (9)$$



Onde:

- x : é o número de medidores para alocação que o indivíduo em avaliação sugere;
- NIM : é o número inaceitável de medidores para o sistema em estudo, isto é, a partir do qual o sistema de monitoração torna-se inviável.

Note que a função em questão não é definida para o intervalo $(-\infty, 1[$, pois o número mínimo de medidores a serem instalados em um SEP que se deseja monitorar é, logicamente, 1.

A razão da escolha de uma função hiperbólica para representar a função-objetivo se justifica por este tipo de função ilustrar fielmente o objetivo do problema em questão, sem a necessidade de se utilizar constantes ou quaisquer outros artifícios algébricos. Além disso, essa função insere um comportamento característico na definição dos sistemas de monitoração: o impacto de se agregar um medidor não é tão expressivo quanto o de se retirar uma unidade. Isto é, sendo $f(x)$ a função hiperbólica definida pela expressão (10):

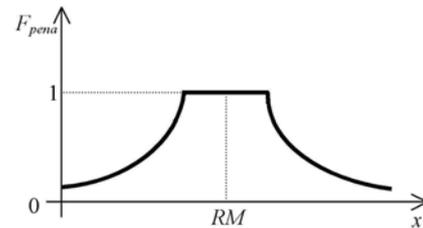
$$|f(x+1) - f(x)| > |f(x) - f(x-1)| \quad (10)$$

Dessa forma, pode-se entender que, por esse comportamento, a função-objetivo também favorece a minimização do número de medidores.

3.1.1.2 Função de Penalização

Já as restrições do problema para a nova modelagem foram consideradas através da função de penalização em duas etapas. Na primeira etapa, avaliou-se a redundância mínima desejada, conforme apresentado na expressão (11).

$$F_{pena}(x) = \begin{cases} \frac{1}{RM-x}, & \text{se } x > (RM+1) \\ 1, & \text{se } (RM-1) \leq x \leq (RM+1) \\ \frac{-1}{RM-x}, & \text{se } x < (RM-1) \end{cases} \quad (11)$$



Onde:

- x : é a média das redundâncias para uma determinada alocação;
- RM : é a redundância-média mínima definida para a avaliação (número mínimo de medidores que se deseja para monitorar cada uma dos defeitos).

Por fim, em uma segunda etapa, a fim de garantir que houvesse uma distribuição homogênea da redundância ao longo de todo o *Vetor-Redundância*, divide-se o resultado da função de penalização pelo número de posições nulas do próprio *Vetor-Redundância*. Dessa forma, impede-se que um indivíduo (*Vetor-Alocação* em avaliação pelo algoritmo), que apresentou uma redundância elevada para um determinado defeito e redundância nula para muitos outros, seja tão bem avaliado quanto um que apresentou uma redundância baixa para todos os defeitos.

Logo, seguindo os mesmos motivos que levaram a escolha de uma função do tipo hiperbólica para a função-objetivo, determinou-se a função de penalização definitiva aplicada no algoritmo, conforme está ilustrado abaixo pela expressão (12):

$$F_{pena} = \frac{\mu_{res}}{NRZ^3} \quad (12)$$

Onde:

- NRZ : é a o número de posições nulas do *Vetor-Redundância*.

Note que o expoente utilizado sobre o fator que considera o número de posições nulas intensifica o peso deste na função, de forma que seja favorecida a obtenção de *Vetores-Rendundância* sem nenhuma posição nula, e, assim, a avaliação exercida pelo AG possa se voltar unicamente para a questão da alocação dos medidores, a fim de se minimizar o número dos mesmos.

Isto é, a princípio, a função de penalização deve refletir a premissa básica para o problema da alocação dos medidores, que seria garantir a monitoração de todos os defeitos passíveis de ocorrerem em um SEP. Apenas após ter essa premissa atendida, se atentaria para a averiguação de qual a deve ser disposição dos medidores, de maneira que seja necessário o menor número dos mesmos para se monitorar um SEP.

3.1.1.3 Função de Avaliação

A avaliação do indivíduo é realizada através de uma função de avaliação. Ela pode ser representada por qualquer tipo de função, desde que indique o quão bem “adaptado” é um determinado indivíduo para o contexto em que ele está inserido. Colocando em termos mais adequados com o problema abordado, a função de avaliação deve indicar o grau de satisfação de uma possível resposta para os objetivos e restrições do problema dentro da modelagem do mesmo através dos AGs. Sendo assim, foram definidos os conceitos de *Matriz de Observabilidade* e *Vetor-Redundância*, conforme (Olguin & Bollen, 2003; Olguin, 2003; Olguin, 2005).

Para essa alternativa de modelagem do problema, a avaliação do indivíduo é fornecida através de uma função de avaliação semelhante à função de pertinência de decisão. Sendo assim, adotou-se a expressão (13):

$$F_{aval} = F_{obj} * F_{pena} \quad (13)$$

Onde:

- F_{aval} é a função de avaliação;
- F_{obj} é a função-objetivo;
- F_{pena} é a função de penalização.

Nessa função, o operador da multiplicação faz o papel do operador de agregação.

3.2 Operadores de Seleção e Cruzamento

Depois da avaliação de cada um dos indivíduos, executa-se a Seleção dos indivíduos. Com o desenvolvimento do trabalho, percebeu-se que o grau de dificuldade da alocação de

medidores aumentava de acordo com o número de pontos do sistema em avaliação. Dessa forma, a técnica de Seleção implementada foi a do Torneio, a fim de permitir uma convergência mais rápida para a resposta do problema. Nesta técnica, os indivíduos de uma dada geração são escolhidos por meio de subconjuntos formados por indivíduos aleatórios da geração anterior.

Diferentemente da Seleção pela técnica da roleta tradicional, esta técnica de Seleção não tem a necessidade de criar a probabilidade individual de cada indivíduo. Nela são pré-selecionados, aleatoriamente, x indivíduos (sendo que $x \ll n$, com n sendo o número de indivíduos por geração), e o melhor entre esses é selecionado. O ciclo é repetido y vezes (sendo que $y = n/x$) até que o número de indivíduos por geração seja alcançado para a nova população da geração seguinte. A Figura 7 ilustra uma iteração da aplicação do operador Seleção utilizando a técnica do Torneio.

Em seguida, os indivíduos selecionados para Cruzamento são agrupados dois a dois, aleatoriamente. Sorteia-se, então, um número inteiro aleatório no intervalo $[1; n_{locus}]$, onde n_{locus} é o número de *bits* que forma os indivíduos do AG. O valor obtido com o sorteio determina a posição dos indivíduos em que se dará a troca de informação. A Figura 8 abaixo ilustra a aplicação do operador Cruzamento para o caso da utilização do *Vetor-Alocação Binário* como indivíduo. O processo é o mesmo para o caso de *Vetor-Alocação Inteiro*.

3.3 Operador Mutação

Após a aplicação do operador Cruzamento, aplica-se o operador Mutação para a população de cada uma das gerações do AG. Ele é aplicado de acordo com uma dada probabili-

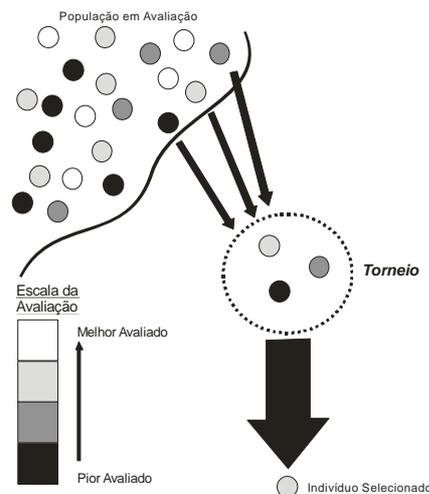


Figura 7 - Seleção por Torneio



Figura 8 - Operador Cruzamento

dade, fixada para o AG. Dessa forma, para cada bit, de cada um dos indivíduos da população, de uma determinada geração, sorteia-se um número aleatório no intervalo [0; 1]. Se esse número for inferior ao valor da probabilidade de Mutação fixado para o AG, o bit em questão sofrerá a Mutação.

Na utilização do *Vetor-Alocação Binário*, a aplicação da Mutação faz com que o valor do bit selecionado seja alterado, isto é; se ele for 0 torna-se 1, se ele for 1 torna-se 0. Já para o caso da utilização do *Vetor-Alocação Inteiro*, a aplicação da Mutação ocorre de forma diferente. O valor do bit selecionado para a Mutação é alterado para um outro qualquer, dentro do universo de possibilidades, ou seja, o número de um barra armazenado no gene em questão é alterado para um outro número qualquer, que identifica uma outra barra do SEP em avaliação.

Na seqüência do processo do AG, todos os indivíduos são novamente avaliados. Caso seja a última geração, assume-se como resposta, o indivíduo mais bem avaliado entre todas as gerações.

Maiores informações sobre os AGs podem ser encontrados em (Goldberg, 1989).

4 RESULTADOS

4.1 Rede de 154 Barras

A metodologia proposta foi inicialmente aplicada em uma rede de transmissão real, que é parte do sistema brasileiro interconectado. Este sub-sistema é composto por 154 barras em diferentes níveis de tensão (500 kV, 345 kV, 230 kV e 138 kV). Todas as simulações consideraram defeitos não-simultâneos e foram executadas através do ambiente de desenvolvimento e análise de redes elétricas do grupo de estu-

dos, denominado SINAP.

4.1.1 Vetor-Alocação Binário

Inicialmente, para a montagem da *Matriz de Observabilidade* foram simulados defeitos fase-terra com impedância de 5Ω . O *Nível de Disparo* dos medidores considerado foi de 0,9 pu (limiar da ocorrência do afundamento de tensão segundo o IEEE Std. 1346). Os defeitos foram simulados em todas as barras do sistema e a cada 10 % do comprimento de um dos trechos do mesmo, totalizando 2143 defeitos. Isso foi feito, pois assim julgou-se que a representação do desempenho do sistema frente as perturbações estaria suficientemente completa para a realização da alocação ótima de medidores de qualidade de energia. Ou seja, a matriz de tensões obtidas com as simulações desses defeitos, do ponto-de-vista da metodologia, estaria ilustrando os valores das tensões de todas as barras do sistema para “todos” os defeitos passíveis de ocorrerem no SEP em avaliação.

Esta configuração de parâmetros resultou mais conservativa, pois o defeito fase-terra, em geral, é menos severo que o defeito trifásico. Isto é, a área de influência quanto às VTCDs de um defeito fase-terra em um determinado ponto tende a ser menor que para um defeito trifásico no mesmo ponto.

Assim, intuitivamente, a fim de garantir **Grau de Observabilidade** máximo para o sistema, o número de medidores necessários para monitorar um sistema qualquer frente a defeitos fase-terra é maior do que para os defeitos trifásicos. No entanto, nada impede a extensão da aplicação da metodologia considerando os outros tipos de defeitos possíveis (trifásico, dupla-fase e dupla-fase terra).

Devido a elevada extensão do universo de soluções, foi implementada a manutenção do melhor indivíduo da população de uma determinada geração na população da geração posterior (elitismo), a fim de melhorar a convergência do algoritmo.

Outro diferencial na implementação do AG para resolver o problema em questão foi a interferência no sorteio da população inicial. Uma vez que o algoritmo clássico sugere a completa aleatoriedade para a determinação dos valores de cada uma das posições dos *Vetores-Alocação* dos indivíduos da população inicial (50 % de chance para sortear-se o valor “1”; 50 % de chance para sortear-se o valor “0”). Com isso, para o problema abordado, os indivíduos apresentariam uma configuração em que o número de 1’s (uns) médio nos respectivos *Vetores-Alocação* seria 77. A convergência do problema seria prejudicada, uma vez que os possíveis indivíduos iniciais teriam avaliações muito ruins. A fim de contornar essa dificuldade, fixou-se a probabilidade de sorteio do valor 1 (um) para cada posição do *Vetor-Alocação* em 10%,

fazendo com que o número de 1's (uns) médio nos respectivos *Vetores-Alocação* de cada um dos indivíduos em questão fosse 15, próximo do número máximo de medidores que se pretenderia alocar para monitorar a rede em avaliação com **Grau de Observabilidade** máximo.

Dessa forma, foi possível gerar uma população inicial suficientemente diversificada, na qual cada um dos indivíduos sugerisse um número de medidores adequado. Assim sendo, o operador Cruzamento do AG ficou responsável por encontrar a melhor combinação dos "lócus" dos indivíduos da população inicial.

O operador Mutação também foi alterado, a fim de favorecer a convergência do AG para uma solução satisfatória. Dessa forma, como o objetivo do trabalho é minimizar o número de medidores necessários para monitorar completamente um SEP, foi estabelecido que a probabilidade de Mutação de um bit unitário da string de cada indivíduo seria o dobro da probabilidade de Mutação de um bit nulo. Assim, praticamente, a Mutação averiguará a necessidade da instalação de cada medidor sugerido no *Vetor-Alocação* de cada indivíduo.

Fixando uma taxa de Cruzamento de 80 % e uma taxa de Mutação de 20 %, e fixando o parâmetro *NIM* em 90 medidores (a fim de permitir que a Função-Objetivo tenha um passo mais significativo, do que a Função de Penalização), o algoritmo sugeriu a alocação de medidores em 23 pontos do sistema. Os mesmos são destacados por elipses pretas tracejadas na Figura 11, que ilustra a rede utilizada no trabalho.

As simulações foram executadas considerando 200 gerações e 100 indivíduos por geração, a fim de garantir que a convergência fosse atingida. Pode-se notar na Figura 9 que a convergência ocorre na 169ª geração.

4.1.2 Vetor-Alocação Inteiro

Seguindo abordagem semelhante àquela adotada em (Gallego *et al.*, 2001), o *Vetor-Alocação Inteiro* passou a ser utilizado no lugar do *Vetor-Alocação Binário*.

Para validar a metodologia, a simulação final foi realizada considerando defeitos fase-terra, dupla fase-terra e trifásico, todos com impedância de defeito de 5 Ω. Os defeitos foram simulados a cada 10 % de cada trecho do SEP, sendo simuladas faltas em 2143 pontos diferentes, para cada tipo de defeito. Além da avaliação individual para cada tipo de defeito, foi feita uma avaliação conjunta dos defeitos. Assim, agregando-se os três tipos de feitos, a matriz de tensões de falta totalizava 6429 linhas (sendo 2143 linhas referentes a cada um dos três defeitos).

As simulações também foram executadas considerando 200 gerações e 100 indivíduos por geração. Cada indivíduo foi

modelado com 30 genes, implicando em um sistema de monitoração com no máximo 30 medidores. As taxas de Cruzamento e Mutação foram fixadas em 70 % e 5 %, respectivamente. O gráfico exibido na Figura 10 ilustra a evolução do melhor indivíduo ao longo da simulação. Pode-se notar através da Figura 10 que a convergência ocorre na 116ª geração. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 1.

Na Figura 11, ilustrou-se as alocações de medidores sugerida pelos *Vetores-Alocação* obtidos para cada tipo de curto-circuito de acordo com a convenção definida na Tabela 1.

Tabela 1: Números de Medidores por Tipo de Defeito

DEFEITO	Nº. MEDIDORES	TIPO DE LINHA
Fase-Terra	23	-----
Dupla Fase-Terra	19
Trifásico	17	-. - . - . -
Todos	23	-----

Os pontos determinados pelo *Vetor-Alocação* referente aos defeitos trifásicos foram ilustrados por retângulos com linha do tipo traço-ponto, para os defeitos dupla fase-terra por retângulos pontilhados, para os defeitos fase-terra por retângulos tracejados e os referentes pontos determinados pelo *Vetor-Alocação* encontrado considerando os três tipos de defeitos simultaneamente foram ilustrados por retângulos contínuos.

Nas duas formas de modelagem da metodologia (*Vetor-Alocação Binário* e *Vetor-Alocação Inteiro*) foi determinada a instalação de 23 medidores no SEP. Porém as posições determinadas para a instalação dos mesmos variaram significativamente. Isto se deve ao fato de que, no SEP em questão, existem barras com capacidades de **Observabilidade** semelhantes. Logo, como a monitoração completa do mesmo depende da combinação dessas capacidades, existe mais de uma possível configuração para os 23 medidores que garantiria a completa monitoração do SEP.

4.2 Rede IEEE 30-barras

A fim de confrontar o desempenho da metodologia proposta neste artigo com o da metodologia proposta em (Eldery *et al.*, 2004), a mesma foi aplicada para o caso da rede 30-barras do IEEE (Universidade de Washington, 2009). Nesta avaliação, foram considerados defeitos trifásicos, fase-terra francos, fase-terra com impedância de 40 Ω, dupla fase e dupla fase terra nas barras do sistema e a cada 10 % dos trechos de linhas, totalizando 1770 defeitos.

Foram executadas duas simulações independentes. Em ambas simulações foram consideradas 200 gerações e 100 in-

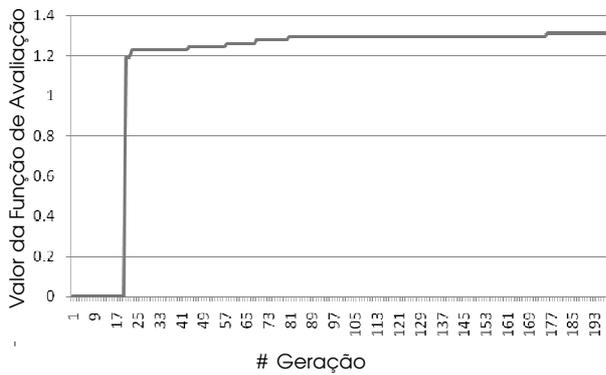


Figura 9 - Desempenho do AG

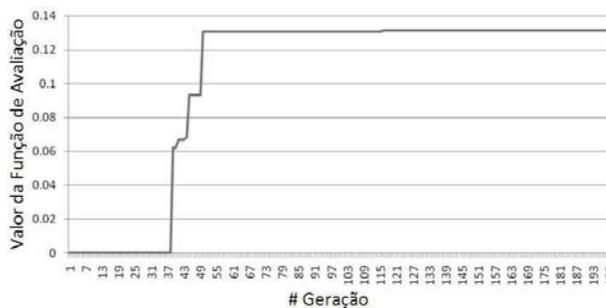


Figura 10 - Desempenho do AG

divíduos por geração. Cada indivíduo foi modelado com 10 genes, implicando em um sistema de monitoração com no máximo 10 medidores. As taxas de Cruzamento e Mutação foram fixadas em 70 % e 5 %, respectivamente.

A metodologia proposta neste artigo determinou a instalação de 7 medidores, nas duas simulações. Em uma simulação a convergência ocorreu na 11ª geração, e na outra simulação a convergência ocorreu na 16ª geração. A Figura 12 ilustra os *Vetores-Alocação* obtidos em cada uma das simulações desenvolvidas para este caso. Na Figura 13, foram indicadas as alocações de medidores sugeridas pelos *Vetores-Alocação* da Figura 12. As elipses contínuas indicam os locais de instalação determinados na primeira simulação e as elipses tracejadas indicam os locais determinados na segunda simulação.

Assim como para a rede de 154 barras, nesta simulação também observou-se que a determinação dos pontos onde os mesmos vão ser instalados pode variar de acordo com as possíveis combinações das capacidades de **Observabilidade** das barras do SEP. As duas simulações executadas estabeleceram que a monitoração completa da rede poderia ser executada através de 7 medidores. Porém, a localização dos equipamentos não foi exatamente a mesma. A primeira simulação determinou a instalação de um medidor na barra #30, en-

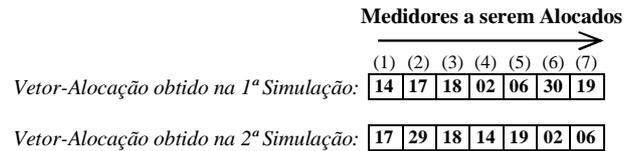


Figura 12 - *Vetores-Alocação* obtidos para a Rede IEEE 30-barras

quanto a segunda simulação determinou que o mesmo medidor fosse instalado na barra #29. Como o número de medidores não variou, nem mesmo a posição dos demais medidores, pode-se dizer que, sob o ponto de vista do SEP, ambas as barras possuem capacidades de **Observabilidade** semelhantes, e que a monitoração de qualquer uma das duas se faz necessária para garantir que o SEP seja completamente monitorado.

Os resultados obtidos foram comparados com aqueles fornecidos em (Eldery *et al.*, 2004) através da Figura 14. Nesta figura, assim como na Figura 13, as elipses contínuas indicam os locais de instalação determinados na primeira simulação e as elipses tracejadas indicam os locais determinados na segunda simulação. Losângulos pretos indicam os locais e instalação propostos em (Eldery *et al.*, 2004).

Observou-se uma redução do número de medidores (Eldery *et al.*, 2004, indicam a instalação de 10 medidores). Uma vez que neste trabalho apenas abordou-se as VTCDs, essa redução do número de equipamentos necessários era esperada. Através dos resultados fornecidos em (Eldery *et al.*, 2004), também nota-se uma inconsistência na metodologia usada, uma vez que os autores sugerem a instalação de um medidor no centro-estrela do transformador de três enrolamentos (barra #9). Tal inconsistência não acontece na metodologia proposta neste artigo, uma vez que a mesma parte de simulações de curto-circuito no sistema real, ao invés na análise topológica e de conectividade realizada em (Eldery *et al.*, 2004).

Ainda vale a pena mencionar que, para o caso da rede IEEE 30-barras, a avaliação de cada indivíduo (possível configuração do sistema de monitoração) leva aproximadamente 0.08 ms em um computador com processador Intel Core 2 Duo de 2,66 GHz. Logo, o problema apresentou uma solução em 88 ms (11 gerações x 100 indivíduos x 0.08 ms); enquanto que em uma busca cega, a solução seria apontada após, aproximadamente, 24 horas de simulação (2^{30} possíveis combinações x 0.08ms).

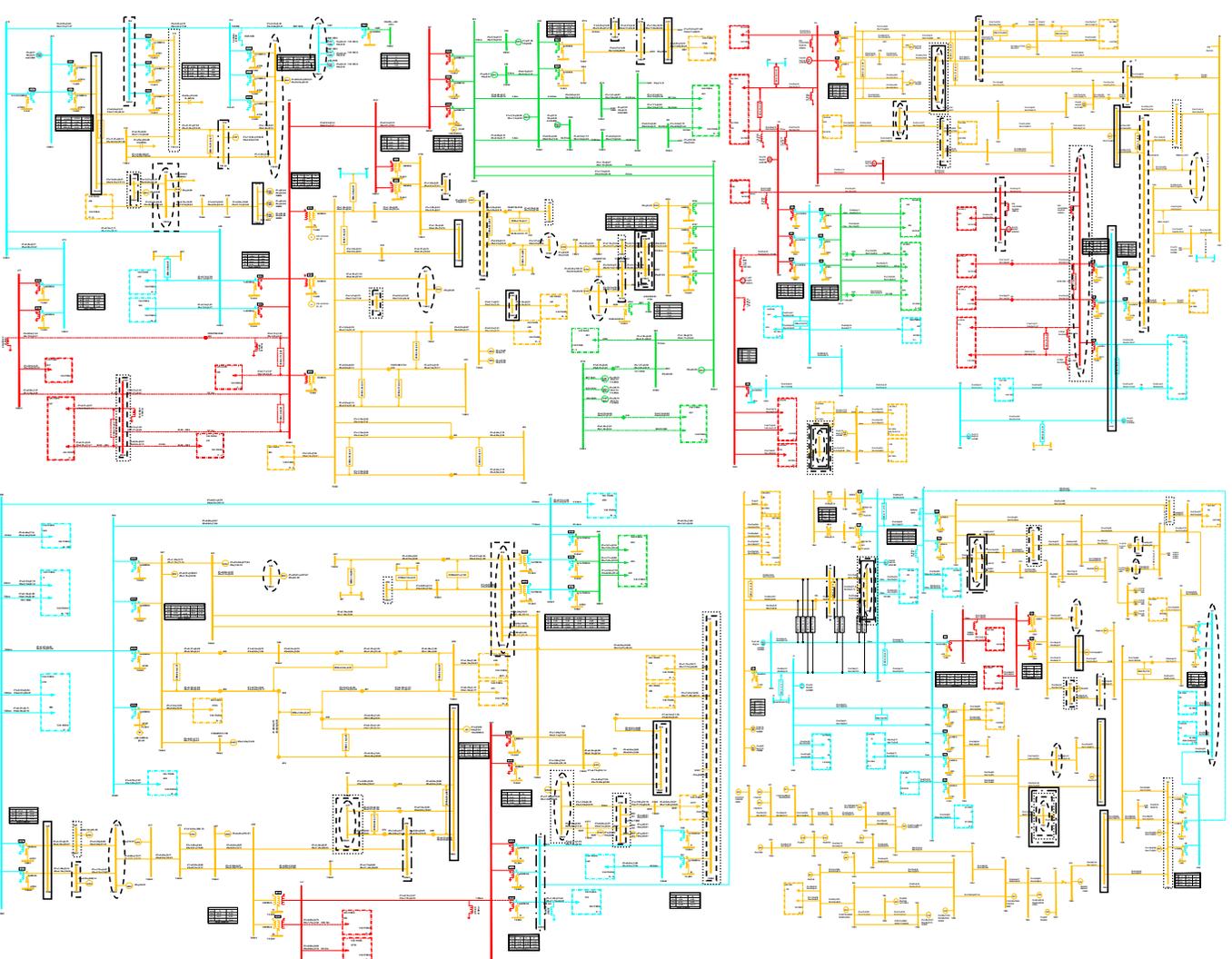


Figura 11 - Rede de Transmissão - 154 Barras

CONCLUSÕES

Metodologia desenvolvida, foram obtidos resultados em a utilização de AGs em problemas de tomada para a rede elétricas com número de barras conside-

ravelmente alto, a utilização de uma busca cega para a determinação da solução ótima acaba tornando-se inviável, obrigando a utilização de métodos de busca inteligente, como o que foi mostrado neste artigo.

Os resultados orientam as Concessionárias na aquisição de equipamentos de medição, de forma a atender necessida-

- tage Dips. IEE Colloquium, Tools and Techniques for Dealing with Uncertainty (Digest No. 1998/200).
- BOLLEN, M. H. J.; QADER M. R.; ALLAN, R. N. (1999), Stochastic Prediction of Voltage SAGs in a Large Transmission System. New York: IEEE Transactions on Industry Applications, Jan/ Feb.
- ELDERY, M. A.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. (2004), Optimum Number and Location of Power Quality Monitors. New York: ICHQP.
- GALLEGO, R. A.; MONTICELLI, A. J.; Romero, R. (2001), Optimal Capacitor Placement in Radial Distribution Networks. New York: IEEE Transactions on Power Systems, vol. 16, n^o. 4.
- GOLBERG, D. E. (1989), Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. New York: Addison-Wesley.
- IEEE Std. 1346. (1998), IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. New York.
- KAGAN, N. (1999), Configuração de Redes de Distribuição Através de Algoritmos Genéticos e Tomada de Decisão Fuzzy. São Paulo: Tese de Livre Docência, EPUSP.
- KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C. B. (1999), Fuzzy Decision Model for the Reconfiguration of Distribution Networks using Genetic Algorithms. in: Power Systems Computation Conference, 12., Trodheim. PSCC: Proceedings. Zurich.
- OLGUIN G.; BOLLEN, M. H. J. (2003), Optimal Dips Monitoring Program for Characterization of Transmission System. IEEE Power Engineering Society General Meeting.
- OLGUIN, G. (2003), Stochastic Assessment of Voltage Dips Caused by Faults in a Large Transmission System. Sweden, Göteborg: Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology.
- OLGUIN, G. (2005), Voltage Dip (Sag) Estimation in Power Systems based on Stochastic Assessment and Optimal Monitoring. Sweden, Göteborg: PhD Thesis, Department of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology.
- REIS, D. C. S. ; VILLELA, P. R. C. ; DUQUE, C. A. ; RIBEIRO, P. F. (2008), Transmission Systems Power Quality Monitors Allocation. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh.
- REIS, D. C. S.; DUQUE, C. A. ; VILLELA, P. R. C. (2007), Algoritmo *Branch and Bound* para Solucionar o Problema da Alocação de Monitores de Qualidade de Energia Elétrica em Redes de Transmissão. VII Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos.
- UNIVERSIDADE DE WASHINGTON (2009), Arquivos de dados para os casos de teste do Sistema de Potência IEEE. Disponível em <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>. Acessado em maio de 2009.