

ALOCÇÃO ÓTIMA DE MEDIDORES DE QUALIDADE DE ENERGIA VISANDO A ESTIMAÇÃO DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

PAULO ESTEVÃO T. MARTINS, WILINGTHON G. ZVIETCOVICH

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
RUA TRINTA E SEIS, 115 - JOÃO MONLEVADE, MINAS GERAIS

E-MAILS: PAULOESTEVAOTM@YAHOO.COM.BR, WILLGUECH@GMAIL.COM

Abstract— This paper presents the implementation and application of Clonal Selection Algorithm technique to solve the optimal allocation problem of power quality monitors for short duration voltage variations (SDVVs) assessment, in order to monitor short-circuit conditions occurring in the electrical network. It is considered possible conditions of symmetry which may occur in the optimization process. These conditions make the problem even more complicated. All the proposed method steps are described, from the construction of the antibodies, cloning, mutation of clones, maturation, to the selection of novel antibodies. The algorithm starts with a large number of monitors, then decrease this number to find a configuration with a minimum number of monitors that ensure monitoring of SDVVs in the system buses. The results are presented in a 63 buses subtransmission and distribution network.

Keywords— Clonal Algorithm, Power Quality Monitors, Allocation.

Resumo— Este artigo apresenta a implementação e aplicação da técnica Algoritmo de Seleção Clonal para resolver o problema de alocação ótima de medidores de qualidade de energia elétrica frente às variações de tensão de curta duração (VTCDs), visando monitorar condições de curto circuito que ocorrem na rede elétrica. Considera-se no processo de otimização aquelas condições de simetria que possam acontecer, o que torna o problema ainda mais complexo. É descrito todas as etapas da implementação da técnica, desde a construção dos anticorpos, clonagem, mutação dos clones, maturação, até a seleção dos novos anticorpos. O algoritmo inicia com um número elevado de medidores, para depois diminuir até encontrar uma configuração com o menor número de medidores, de modo a garantir o monitoramento das VTCDs nas barras do sistema. São apresentados os resultados numa rede de subtransmissão e distribuição de 63 barras.

Palavras-chave— Algoritmo Clonal, Medidores de Qualidade, Alocação.

1 Introdução

A crescente reclamação dos clientes das concessionárias com relação aos prejuízos com equipamentos devidos à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) fornecida motivou o começo do monitoramento das redes para avaliação de problemas de QEE. Dentre esses fatores as Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) são os mais frequentes e difíceis de prever, devido à sua natureza aleatória de ocorrência.

Nasce destas reclamações a motivação por parte das empresas em implantar sistemas de monitoramento nas suas redes, instalando o menor número de medidores, de forma a garantir a observação de todas as ocorrências de VTCDs.

Diversas pesquisas já foram desenvolvidas nesse tema. Ammer & Renner (2004) começaram tratando o problema utilizando técnicas estatísticas de correlação e regressão. Olguin *et al.* (2006) propuseram uma abordagem mais determinística baseada em simulações de curtos-circuitos ao longo de toda a rede teste para verificação de ocorrência de VTCDs. Muitos trabalhos seguiram os conceitos que foram introduzidos neste trabalho (Almeida & Kagan, 2011; Ibrahim *et al.*, 2011; Ibrahim *et al.*, 2012a; Ibrahim *et al.*, 2012b; Kazemi *et al.*, 2013; Zvietcovich *et al.*, 2013; Ibrahim *et al.*, 2014).

Eldery *et al.* (2006) estudaram o problema de Alocação de Medidores de uma forma diferenciada. O método de solução proposto neste trabalho é baseado em equações e restrições características da forma construtiva da rede em avaliação, e os monitores são alocados

no sistema elétrico de forma a garantir a observabilidade do estado da rede elétrica. Outros trabalhos acompanharam essa ideia (Reis *et al.*, 2008; Wan *et al.*, 2014). Este último além fornecer uma alocação visando à estimativa das VTCDs é considerada a localização das faltas. Nessa abordagem o aspecto da presença de simetrias é mencionado, mas não introduzido na formulação do problema.

Este trabalho tem um foco nas ocorrências de simetrias de condições de falta, quando ambas produzem valores iguais ou muito próximos de tensão residual em uma ou mais barras com medidores alocados. Estes eventos podem dificultar a localização de condições de falta, sendo alvo desse estudo a minimização destas ocorrências. São retomados os conceitos introduzidos por Olguin *et al.* (2006) e é proposta a técnica Algoritmo Clonal para solucionar o problema.

O trabalho está dividido em seis seções, contando com a presente. Na seção dois o problema é descrito matematicamente. Em seguida é apresentada a técnica do Algoritmo de Seleção Clonal aplicado ao problema de Alocação de Medidores. Posteriormente é implementada a metodologia para solução do problema e são mostrados os resultados da aplicação da técnica proposta. Por fim, são apresentadas as conclusões e principais contribuições deste trabalho.

2 Descrição do Problema

As VTCDs são eventos caracterizados por afundamentos ou elevações de tensão na rede elétrica, ou seja, uma redução ou elevação do valor eficaz da tensão, causados principalmente por curtos-circuitos ao

longo do sistema. Também são causados pela partida de motores de grande potência, que devido à sua elevada corrente de partida pode provocar afundamentos de tensão nas barras vizinhas.

Com o objetivo de se avaliar a proporção dos danos causados aos consumidores ligados à rede elétrica, é necessário ser feita uma estimativa do estado da rede no instante de ocorrência da falta. Este problema é conhecido como Estimativa de Estados, e para a sua solução é preciso inicialmente identificar as condições de falta que geraram as VTCDs nas barras monitoradas, sendo necessária a utilização das informações de medidores de qualidade instalados na rede elétrica. A partir das medições efetuadas é possível determinar aquela condição de falta que gerou VTCDs no (s) medidor (res) instalado (os) e então, estimar o estado da rede para essa condição (Keszunovic *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2005).

Uma característica frequentemente encontrada em redes de médio a grande porte é a simetria de eventos, e esta pode dificultar a identificação das condições de falta na rede elétrica. Este aspecto apresenta-se quando duas ou mais condições de falta (eventos) diferentes provocam tensões iguais ou muito próximas em uma ou mais barras (com medidores instalados). Na Figura 1 as condições de falta F1 e F2 provocam valores semelhantes de VTCDs nas barras M1 e M2. Dizemos que esses dois eventos são simétricos com relação à essas duas barras, mas não são simétricos com respeito a outra barra (em outra parte da rede elétrica). A presença de simetrias na rede dificulta a localização das faltas, como mostra a estimativa do ponto de defeito P na Figura 1, onde percebe-se um erro grosseiro na estimativa deste local. Portanto é necessária uma Alocação de Medidores de forma a minimizar esses casos. Uma outra maneira de reduzir as simetrias em uma rede é eliminar as redes paralelas (Figura 1).

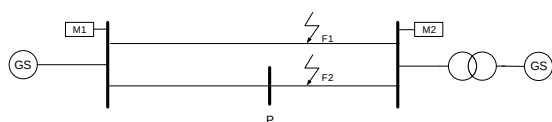


Figura 1. Exemplo de ocorrência de simetria

Para determinar a condição de falta é necessário o conhecimento de três parâmetros: o tipo da falta, o local de falta e a impedância de defeito associada ao curto-circuito. Quanto ao tipo de faltas, podem ser trifásicas, monofásicas-terra, bifásicas e bifásicas-terra. O local diz respeito ao ponto de ocorrência da falta. Caso a falta seja num trecho (entre barras) é desejado saber a quantos quilômetros ou metros de uma barra específica ocorreu a falha. A impedância de defeito é dada em ohms e é um valor que modela as características e condições do local da falta, como: resistência associada ao arco elétrico formado entre o condutor e a terra ou entre dois condutores, a resistência do solo no instante da falta, entre outros fatores.

3 Algoritmo de Seleção Clonal CLONALG

Este algoritmo forma parte da computação evolutiva e está baseado no sistema imunológico. Foi originalmente proposto por de Castro & Von Zuben (2002), consistindo em duas versões, a primeira para resolver problemas de aprendizagem de máquina e reconhecimento de padrões (antígenos) e a segunda para resolver problemas de otimização. Baseia-se no princípio de seleção clonal, o qual é utilizado para descrever as características básicas de uma resposta imune adaptativa a estímulos antigênicos. Ele estabelece a ideia de que somente as células capazes de reconhecer antígenos irão se proliferar, sendo assim selecionadas em detrimento das outras. Durante a reprodução celular, estas células (clones) estarão sujeitas a um processo de mutação somática com taxas elevadas que, juntamente com uma forte pressão seletiva, resultará no aumento da afinidade entre o anticorpo e o antígeno que o selecionou. Dessa forma, é possível concluir que estes processos são parcialmente responsáveis pela aprendizagem e memória imunológica, características particularmente interessantes sob o ponto de vista da engenharia.

Das características dos processos biológicos, o princípio do algoritmo de seleção clonal no qual os processos de seleção e maturação são responsáveis pela geração de indivíduos cada vez melhores adaptados ao ambiente no qual estão inseridos. Isso representa uma ferramenta para a solução de problemas de aprendizagem de máquina, reconhecimento de padrões e otimização. Em que os processos de seleção e maturação são responsáveis pela geração de indivíduos cada vez melhores adaptados ao ambiente no qual estão inseridos.

Uma analogia entre variáveis do problema de otimização e o sistema imunológico é: antígeno é a função objetivo (problema); anticorpos são as soluções candidatas para resolver o problema; afinidade é o valor de fitness dos anticorpos.

Algoritmo:

1. Geração da população inicial de N anticorpos;
2. Avaliação da população inicial;
3. Seleção dos melhores indivíduos da população inicial;
4. Hipermutação dos clones: os anticorpos com baixa afinidade têm uma taxa maior de mutação;
5. Edição de receptores: os piores indivíduos são trocados por outros gerados aleatoriamente, para manter a diversidade;
6. Retorna ao passo 2 até que um critério de parada seja alcançado.

4 Metodologia utilizada no Problema de Alocação

Para solucionar o problema de alocação foi necessário criar um banco de informações referentes às VTCDs causadas por eventos que possam ocorrer nas barras da rede elétrica e em diferentes pontos ao longo

das suas linhas. Por meio de um ambiente de simulação de curto-circuito foram construídas duas matrizes, uma de observabilidade (Olguin *et al.*, 2006) e outra de simetrias. A Figura 3-a ilustra a Matriz de Tensões de Falta para uma rede de 4 barras e 10 condições de falta. Os elementos desta matriz são os valores de tensão (os menores - trifásico) obtidos em cada barra para uma determinada condição de curto-circuito. A partir desta matriz é construída a Matriz de Observabilidade mostrada na Figura 3-b. As normas internacionais de Qualidade de Energia Elétrica (IEEE Std. 1346, 1998) estabelecem que valores entre 0,10 e 0,90 p.u e acima de 1,10 são considerados VTCDs, afundamentos e elevações, respectivamente. Na Matriz de Observabilidade valores iguais a 1 representam VTCDs. De forma matemática esta matriz pode ser expressa através da Equação (1):

$$mo_{ij} = \begin{cases} 1, & mt_{ij} \leq n_d \\ 0, & mt_{ij} > n_d \end{cases} \quad (1)$$

onde mo_{ij} é o elemento da linha i e coluna j da Matriz de Observabilidade, mt_{ij} é o elemento da Matriz de Tensões de Falta, situado na linha i e coluna j , e n_d é o nível de disparo do medidor de QEE.

Condições de Falta	Barras					Condições de Falta	Barras				
		1	2	3	4			1	2	3	4
	1	0,22	0,81	0,95	0,71		1	1	1	0	1
	2	0,23	0,79	0,85	0,44		2	1	1	1	1
	3	0,95	0,92	0,99	0,47		3	0	0	0	1
	4	0,88	0,63	0,80	0,72		4	1	1	1	1
	5	0,79	0,60	0,80	0,94		5	1	1	1	0
	6	0,66	0,91	0,93	0,93		6	1	0	0	0
	7	0,35	0,93	0,27	0,84		7	1	0	1	1
	8	0,41	0,97	0,90	0,96		8	1	0	0	0
	9	0,42	0,91	0,73	0,32		9	1	0	1	1
	10	0,94	0,89	0,98	0,31		10	0	1	0	1

Figura 3. a) Matriz de Tensões de Falta. b) Matriz de Observabilidade

Da mesma forma as elevações de tensão são contabilizadas, assumindo valor 1 na Matriz de Observabilidade, Equação (2):

$$mo_{ij} = \begin{cases} 1, & mt_{ij} \geq n_d \\ 0, & mt_{ij} < n_d \end{cases} \quad (2)$$

A Figura 4 ilustra a Matriz de Simetrias (MS), com as mesmas dimensões que a Matriz de Observabilidade. Nessa matriz são armazenados os pares de eventos simétricos com relação a cada barra do sistema. Foi considerado um intervalo de tolerância de mais ou menos 0,05 p.u. para se assumir que dois valores de tensão são iguais. Duas condições de falta são consideradas simétricas com relação a uma barra somente se os valores das tensões de todas as 3 fases obedecerem à tolerância estipulada. Na Figura 4 observa-se em cada

coluna (barra) a existência de números repetidos. Isso significa a existência de simetria, como é o caso das condições 3 e 10 com relação às barras 1 e 3.

Condições de Falta	Barras				
		1	2	3	4
	1	1	1	1	1
	2	1	1	0	2
	3	2	2	2	2
	4	0	3	3	1
	5	0	3	3	3
	6	0	2	1	3
	7	0	4	0	0
	8	3	4	0	0
	9	3	5	0	4
	10	2	5	2	4

Figura 4. Matriz de Simetrias

4.1 Codificação de uma solução

Uma possível solução para o problema consiste em uma determinada configuração de medidores, ou seja, as barras nas quais estão instalados os medidores. Esta alocação de medidores pode ser representada de duas formas: utilizando o Vetor-Alocação Binário ou o Vetor-Alocação Inteiro.

O Vetor-Alocação Binário é um vetor cujo tamanho é o número de barras do sistema. Ele é preenchido com zeros e uns. Este último representa a presença de um medidor de QEE na barra em questão. A expressão (3) define este vetor:

$$V_{Aloc}(i) = \begin{cases} 1, & \text{se houver um medidor instalado na barra } i \\ 0, & \text{se não houver um medidor instalado na barra } i \end{cases} \quad (3)$$

De acordo com essa representação o número de medidores fica livre, indo até o número de barras, visto que cada barra tem a possibilidade de ter ou não um medidor instalado nela. Este vetor é sempre fixo e corresponde ao número total de barras do sistema analisado. A Figura 5 ilustra uma possível alocação de dois medidores seguindo essa representação para o exemplo da Figura 3.

1	0	0	1
---	---	---	---

Figura 5. Vetor-Alocação Binário Transposto

O Vetor-Alocação Inteiro possui tamanho fixado no número de medidores simulados e cada posição desse vetor contém um número inteiro representando a barra na qual será simulado um medidor. A equação (4) mostra a construção desse vetor:

$$V_{Aloc}(i) = n \quad (4)$$

De acordo com a expressão (4) n representa o número da barra onde o medidor deve ser instalado. O Vetor-Alocação Binário da Figura 5 pode ser expresso nessa outra representação de acordo com a Figura 6:

1	4
---	---

Figura 6. Vetor-Alocação Inteiro Transposto

4.2 Função Objetivo

A função objetivo ou fitness é determinada através da multiplicação da Matriz de Observabilidade pelo Vetor-Alocação Binário. O resultado será o vetor chamado Vetor-Redundância, com dimensão igual ao número de condições de curto-circuito considerada. Cada valor deste vetor representa o número de medidores que observam (registram) a condição de curto-circuito avaliada. Valores maiores que 1 representam redundância. Valores iguais a zero indicam que nenhum medidor registrou a condição de curto-circuito. Matematicamente este vetor é obtido utilizando a seguinte expressão matemática:

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

Se todos os valores do Vetor-Redundância são diferentes de zero, significa que todas as condições de falta foram observadas e que o objetivo foi alcançado. A Figura 7 ilustra o Vetor-Redundância correspondente ao exemplo da Figura 3-a:

2	2	1	2	1	1	2	1	2	1
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 7. Vetor-Redundância

Como pode ser visto para este exemplo o sistema de monitoração sugerido pela Figura 5 é uma solução ótima para o problema, todos os curtos-circuitos são monitorados pelo menos por um medidor de qualidade.

A Matriz de Simetrias é utilizada para contabilizar o número de simetrias de uma solução (configuração de medidores). Por exemplo, para a Figura 3-b, com medidores simulados nas barras 1 e 3, observa-se na Figura 4 a existência de uma simetria, condições de falta 3 e 10. Este valor acompanha ao valor da função objetivo. Ele é utilizado para desempatar caso 2 ou mais configurações apresentem o mesmo valor de função objetivo.

4.3 Critério de Parada

O critério de parada leva em conta indicadores de qualidade, como: (i) limite de número de transições sem se produzir uma melhoria da função de aptidão; (ii) esforço computacional total; (iii) e tempo computacional sem produzir uma melhoria da função objetivo. Para este problema, o indicador adequado foi o número de transições da população que não produz uma melhoria do melhor anticorpo da população atual. Este critério se reflete no esforço computacional.

4.4 Algoritmo

Antes de utilizar a metodologia proposta é necessário estabelecer valores iniciais de algumas variáveis, como são:

Nº inicial de medidores = Nmedidores

Nº de anticorpos ou tamanho da população = N

Nº máximo de iterações que não se produz melhoria = Nmelhora

Fator multiplicativo usado na definição da quantidade de clones e mutação = beta

Quantidade de anticorpos com baixa afinidade que será substituída = d

Em seguida detalha-se o algoritmo:

PASSO 1: Geração da população inicial de N anticorpos → Gera-se N configurações (soluções) de alocação de medidores de forma aleatória com a finalidade de dotar ao algoritmo diversidade, característica importantíssima quando se utiliza este tipo de técnica.

PASSO 2: Avaliação da população inicial → Avalia-se a função objetivo para cada anticorpo da população inicial, utilizando a equação (5). Também determina-se o número de simetrias para cada anticorpo.

PASSO 3: Seleção dos melhores indivíduos da população inicial → Ordena-se a população começando pelo anticorpo com melhor função objetivo. A seleção é feita quando a população atual é maior que a população inicial. Isso ocorre no processo de otimização.

PASSO 4: Hipermutação dos clones → É gerado um número de clones para cada anticorpo, sendo este número diferente para cada anticorpo. É calculado por uma função linear que garante que o melhor dos anticorpos (beta)*(N) clones, e o pior dos anticorpos tenha (1 - (beta))*(N) clones.

Uma vez gerado os clones, é realizada a mutação apenas para os clones, de modo a garantir que os anticorpos originais sejam mantidos inalterados na população. O raio de mutação varia de acordo com a função objetivo de cada anticorpo. Aqueles anticorpos com melhor função objetivo têm um raio pequeno de mutação, sofrendo poucas alterações, e anticorpos com pior função objetivo têm um raio grande de mutação e, portanto, sofrem maiores mutações. Foi utilizada uma função de aptidão baseada no ranking das soluções: a melhor solução é atribuída com 1, à segunda melhor é atribuída com 2, e assim por diante. A mutação foi feita de forma aleatória.

PASSO 5: Edição de receptores → Os piores anticorpos são trocados por outros gerados aleatoriamente com a finalidade de manter a diversidade. Foram considerados 10% do número de anticorpos.

PASSO 6: Retorna ao passo 2 até que um critério de parada seja alcançado → Como mencionado o critério adotado neste trabalho foi o número de transições da população que não produz uma melhoria do melhor anticorpo da população atual.

5 Resultados e Discussões

Este método foi implementado num ambiente de programação Matlab. Para gerar as matrizes de observabilidade e simetria foi implementada computacionalmente uma análise de curto-circuito.

Com o objetivo de avaliar a metodologia proposta foi utilizada uma rede de subtransmissão e distribuição primária, com um total de 63 barras. Esta rede teste foi escolhida com base no fato de que a maioria dos consumidores industriais está conectada na rede elétrica com níveis de tensão primária e subtransmissão. Este sistema elétrico possui duas unidades geradoras, quatro condensadores síncronos, cinco transformadores e 67 linhas (Figura 8). O sistema opera com quatro níveis de tensão: 11 kV (barras 11 e 13), 132 kV (barras 1-9 e 28), 13.8kV (barras 31-63), e 33 kV (barras restantes). Os dados desta rede podem ser encontrados em (Baran & Wu, 1989; University of Washington, 1993).

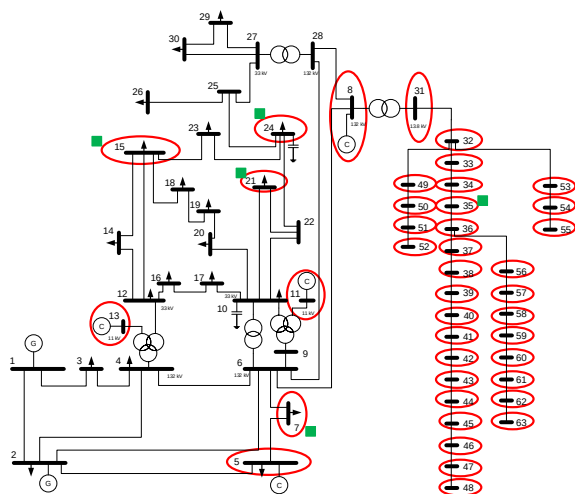


Figura 8. Rede Teste de 63 barras

Foram simuladas 13000 condições de falta, que pertencem a curtos-circuitos do tipo trifásico, bifásico, monofásico-terra e bifásico-terra, com impedância de defeito entre 0 e 0,6 p.u., ao longo de todas as barras da rede e a cada 10% do comprimento dos trechos. Embora tenham sido simuladas 13000 condições de falta as matrizes MO e MS resultantes possuem uma dimensão 170x32. Isso ocorre porque no processo de construção dessas matrizes são gerados dados redundantes (linhas e colunas iguais ou zeradas), que precisam ser eliminados antes do método de otimização ser executado.

O método proposto encontrou para esta rede teste um número mínimo de 17 medidores localizados nas barras: [3 7 9 10 12 14 15 16 17 18 20 21 22 23 24 25 35].

Uma outra solução para o problema com o mesmo número de medidores é: [3 7 9 10 12 14 15 16 17 18 20 21 22 23 24 27 35]. Estas duas soluções são praticamente iguais, a única diferença se dá na troca do medidor instalado na barra 25

pela barra 27. O fato destes dois locais serem equivalentes com respeito à estas duas soluções, pode ser explicado pela observabilidade relacionada a cada um. Dentre os 170 eventos um medidor instalado na barra 25 consegue observar 94 deles, e um medidor na barra 27 observa 78 condições de falta. Estes dois valores são bem próximos de forma que a instalação do medidor em qualquer uma destas duas barras garante o grau de observabilidade máximo do sistema elétrico. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre essas 2 soluções encontradas pelo Algoritmo de Seleção Clonal. De acordo com a Tabela 1 estas duas soluções apresentam apenas um caso de simetria, o que é excelente do ponto de vista do problema de localização de faltas. Pensando na estimação de estados quanto maior o número de medidores que registram uma determinada condição de falta maiores serão as chances de um processo de estimação ser bem-sucedido.

Tabela 1. Comparação das soluções obtidas para a rede de 63 barras

Solução:		1	2
Número de condições de falta observadas por:	1 medidor	26	27
	2 medidores	15	15
	3 medidores	17	17
	4 ou mais medidores	112	111
Número de Simetrias		1	1

Portanto, apesar da diferença sutil entre as duas soluções a primeira delas é considerada melhor pela quantidade maior de condições de falta observadas por um número maior de medidores.

A Figura 9 mostra as melhores soluções encontradas pelo CLONALG para um dado número de medidores. O número de condições de falta não monitoradas e simetrias é elevado para um número reduzido de medidores e vai caindo com o aumento de medidores de QEE disponíveis para a alocação. A solução com 5 medidores está representada na Figura 8, onde as barras com os medidores de qualidade instalados estão simbolizadas com um quadrado. Do total de 63 barras essa configuração garante a observabilidade de 41 delas, onde estão situados grandes consumidores com cargas sensíveis às VTCDs.

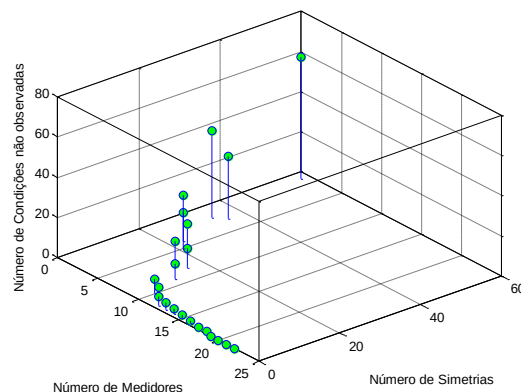


Figura 9. Melhores soluções encontradas para a rede de 63 barras

6 Conclusões

Foi apresentada uma metodologia para solucionar o problema de alocação ótima de medidores, visando o monitoramento de VTCDs em todas as barras de um sistema elétrico. A principal contribuição é a aplicação do Algoritmo de Seleção Clonal como ferramenta para a solução do problema. A metodologia mostrou-se viável para aplicação nas redes das empresas concessionárias de energia elétrica.

Foram utilizadas as principais características do Algoritmo de Seleção Clonal, sendo que alguns parâmetros da metodologia foram obtidos através de vários testes. Esta característica é própria daqueles métodos que visitam soluções num espaço de soluções.

Em redes de maior porte deverá restringir-se a monitoração, devido à quantidade elevada de medidores. Esta restrição pode ser no número de barras ou em uma região limitada, na qual se precise monitorar, por exemplo, uma região industrial.

Através de uma ótima alocação de medidores de qualidade de energia elétrica uma empresa concessionária poderia monitorar as VTCDs, visando identificar regiões de risco frente às VTCDs. Uma vez identificada, medidas corretivas e/ou preventivas poderiam ser tomadas para se reduzir o número de VTCDs e, conseqüentemente, reclamações dos consumidores.

Referências Bibliográficas

- Almeida, C. F. M. and Kagan, N. (2011). Using Genetic Algorithms and Fuzzy Programming to Monitor Voltage Sags and Swells. *IEEE Intelligent Systems*, Vol.26, No. 2; pp. 46–53.
- Ammer, C. and Renner, H. (2004). Determination of the optimum measuring positions for power quality monitoring. In *11th International Conference on Harmonics and Quality of Power*. Lake Placid: IEEE PES, pp. 684–689.
- Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No. 2; pp. 1401–1407.
- de Castro, L. N. and Von Zuben, F. J. (2002). Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.6, No. 3; pp. 239–251.
- Eldery, M. A. et al. (2006). A Novel Power Quality Monitoring Allocation Algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.21, No. 2; pp. 768–777.
- Ibrahim, A. A. et al. (2011). Optimal power quality monitor placement in power systems based on particle swarm optimization and artificial immune system. In *3th Conference on Data Mining and Optimization*. Selangor: IEEE Advancing Technology for Humanity, pp. 141–145.
- Ibrahim, A. A. et al. (2012a). A New Approach for Optimal Power Quality Monitor Placement in Power System Considering System Topology. *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol.88, No. 1; pp. 272–276.
- Ibrahim, A. A., Mohamed, A. and Shareef, H. (2012b). A Novel Quantum-inspired Binary Gravitational Search Algorithm in Obtaining Optimal Power Quality Monitor Placement. *Journal of Applied Sciences*, Vol.12, No. 9; pp. 822–830.
- Ibrahim, A. A., Mohamed, A. and Shareef, H. (2014). Optimal power quality monitor placement in power systems using an adaptive quantum-inspired binary gravitational search algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol.57, pp. 404–413.
- IEEE Std. 1346. (1998), IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment. New York.
- Kazemi, A. et al. (2013). Optimal power quality monitor placement using genetic algorithm and Mallow's Cp. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol.53, pp. 564–575.
- Kezunovic, A., Luo, S. and Sevcik, D. R. (2002). A novel method for transmission network fault location using genetic algorithms and sparse field recordings. In *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*. Chicago: IEEE, pp. 1101–1106.
- Olguin, G., Vuinovich, F. and Bollen, M. H. J. (2006). An optimal monitoring program for obtaining voltage sag system indexes. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.21, No. 1; pp. 378–384.
- Reis, D. C. S. et al. (2008). Transmission Systems Power Quality Monitors Allocation. In *IEEE PES General Meeting*. Pittsburgh: IEEE PES, pp. 1–7.
- University of Washington (1993). Arquivos de dados para os casos de teste do IEEE. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>. Acessado: 2016-09-05.
- Wang, B., Xu, W. and Pan, Z. (2005). Voltage sag state estimation for power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.20, No. 2; pp. 806–812.
- Wan, Y. et al. (2014). Optimization of the power quality monitor number in smart grid. In *5th IEEE International Conference on Smart Grid Communications*. Venice: IEEE Communications Society, pp. 230–235.
- Zvietcovich, W. G., Cardoso, E. M. and Galvis Manso, J. C. (2013). Optimal allocation of meters for monitoring voltage sags and swells using the GRASP-VNS optimisation algorithm. In *2th Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America)*. São Paulo: IEEE PES, pp. 1–5.