

# SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE SELF-HEALING PARA REDES DE DISTRIBUIÇÃO RADIAIS ATRAVÉS DE OTIMIZAÇÃO VIA ALGORITMO GENÉTICO

LUCAS ROBERTO FERREIRA<sup>1</sup>, LUCIANO CAVALCANTE SIEBERT<sup>1</sup>, HELON AYALA<sup>1</sup>,  
ALEXANDRE RASI AOKI<sup>1</sup>, LUIZ CARLOS MENEZES DIREITO<sup>2</sup>.

1. LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Departamento de Eletricidade, Divisão de Sistemas Elétricos

BR 116 km 98 N° 8813, Centro Politécnico da UFPR, Curitiba – PR.

E-mails: [lucas.ferreira@lactec.org.br](mailto:lucas.ferreira@lactec.org.br), [luciano.siebert@lactec.org.br](mailto:luciano.siebert@lactec.org.br),  
[helon.ayala@lactec.org.br](mailto:helon.ayala@lactec.org.br), [aoki@lactec.org.br](mailto:aoki@lactec.org.br)

2. LIGHT S.E.S.A, Gerência de Tecnologia e Medição

Av Marechal Floriano 168, Rio de Janeiro - RJ

E-mail: [luiz.direito@light.com.br](mailto:luiz.direito@light.com.br)

**Abstract**— The application of Smart Grids is growing due to the benefits that its implementation brings to both utilities and consumers, e.g. energy efficiency, real-time information of the distribution network. One of the features of the Smart Grid, the process of service restoration of distribution networks through self-healing actions comes to improve network reliability and provide a quick response to faults. In this paper, a methodology for self-healing through process optimization via genetic algorithm is presented, aiming to maximize the useful life of network devices and minimize the load not supplied in a faulted network. Using real data of five urban feeders from the utility LIGHT SESA for the case study, three scenarios were considered: one, two and three faults, respectively, in different feeders. Results showed the possibility of service restoration as well as fault isolation.

**Keywords**— Smart Grid, Self-Healing, Genetic Algorithm, Binary Optimization.

**Resumo**— A aplicação das redes inteligentes (*smart grids*) vem crescendo devido aos benefícios que a aplicação trás tanto para a concessionária quanto para o consumidor, como eficiência energética, informações em tempo real da rede de distribuição, entre outros. Como uma das funcionalidades do *smart grid*, o restabelecimento da rede de distribuição através de ações de auto-cura (*self-healing*) vem com o objetivo de melhorar a confiabilidade da rede e ter uma resposta rápida quando da ocorrência de falhas. No presente trabalho foi elaborada uma metodologia de *self-healing* através de processo de otimização via algoritmo genético visando maximizar a vida útil dos equipamentos da rede e minimizar a quantidade de carga não atendida após uma falha. Utilizaram-se dados reais de cinco alimentadores urbanos da concessionária LIGHT SESA para o estudo de caso, considerando três cenários: uma, duas e três falhas, respectivamente, sempre em alimentadores distintos. Os resultados mostraram a possibilidade de transferência de cargas não supridas, assim como isolamento das faltas.

**Palavras-chave**— Redes Inteligentes, Auto-Cura, Algoritmo Genético, Otimização Binária.

## 1 Introdução

Redes elétricas inteligentes ou *smart grids* consistem basicamente na otimização e gerenciamento do sistema elétrico, desde a geração até o consumo, utilizando para isso sensores, monitores, acesso remoto, automação e sistemas integrados visando melhorias dos sistemas elétricos, tanto a nível de eficiência bem como da segurança do sistema (Gellings, 2009).

Segundo Momoh (2012) a rede de distribuição (RD) atualmente tem características como consumidores desinformados e não participantes da rede; lentas respostas em problemas na qualidade de energia e vários obstáculos para inserção de fontes de energia distribuída. Portanto, à tendência das novas redes inteligentes possuem fontes distribuídas e ativas que permitam a comutação e reconfiguração de seus equipamentos, é natural repensar a forma como se operam as redes de modo a comportar maiores funcionalidades e permitir assim benefícios tanto ao consumidor de energia quanto para as concessionárias (DOE, 2007) – através de modicidade tarifária e melhor provimento de energia, por exemplo.

Como uma das funcionalidades do *smart grid*, o *self-healing* vem com o objetivo de melhorar a confiabilidade da rede e ter uma resposta rápida quando ocorre uma falha na RD, isolando a falta e reduzindo o período de falta na rede (IEA, 2011).

Os benefícios da aplicação do conceito de *self-healing* em sistemas elétricos incluem: (i) rápida restauração do sistema ao modo operativo; (ii) restauração de maior quantidade de cargas e (iii) menor necessidade de enviar equipes de campo para reconfigurar a rede (Qualmakran, Melendez e Herraiz, 2012).

Há vasta literatura relativa ao restabelecimento de redes de distribuição quando da existência de faltas. A seguir alguns dos métodos utilizados na aplicação do *self-healing* como: utilização do método de enxame de partículas para a otimização, a fim de resolver o problema de reconfiguração do sistema em conjunto com uma regra heurística para aumentar a eficiência da metodologia (Guerra, Galvis e Vinicius, 2012); utilização da heurística *fuzzy* para um processo de busca para o restabelecimento de energia em sistemas radiais de distribuição (Delbem, Bretas e Carvalho, 2000); Borges (2012), também destaca

outros métodos como a busca exaustiva; lógicas de automação; sistemas inteligentes (tais como lógica *fuzzy*, algoritmo genético, redes neurais artificiais); métodos matemáticos; etc.

O objetivo deste artigo é elaborar uma metodologia de *self-healing* que trabalhe na reconfiguração da rede de distribuição, a partir de uma ou mais falhas em alimentadores interconectados utilizando o algoritmo genético para manipular as chaves nos alimentadores e entre eles.

O artigo é dividido nas seguintes seções: uma breve explicação do algoritmo genético e sua aplicação no *self-healing* (2); a metodologia para *self-healing* desenvolvida, apresentando a função objetivo e suas restrições (3); estudo de caso considerando alimentadores da concessionária LIGHT SESA (4); os resultados da técnica construída aplicada no estudo de caso (5); e por fim a conclusão (6).

## 2 Algoritmo Genético

Desenvolvido por Holland (1975), o algoritmo genético (AG) é baseado nos princípios da genética e seleção natural. Primeiramente o AG cria uma população que pode ser gerada aleatoriamente ou de forma heurística. Segue então a execução do AG que passa por dois estágios de processo: primeiro cria-se uma população intermediária, utilizando a função de *fitness*, em que cada indivíduo é avaliado e alocado um valor de performance de oportunidade de reprodução (seleção dos melhores indivíduos), depois é aplicado o cruzamento e mutação para criar a próxima geração possível para a solução (Russell e Norvig 2004) (Lee e El-Sharkawi, 2008).

Algumas das aplicações de AG para restabelecimento da RD podem ser encontradas em: Bretas, Delbem e Carvalho (2001) onde utiliza o AG para restabelecer uma RD radial através de uma cadeia de grafos; Fukuyama e Chiang (1995) empregam o AG paralelo para restaurar a RD considerando a minimização das cargas não atendidas e contrabalancear as margens de capacidade de suprimento; em Chavali, Pahwa e Das (2002) é apresentado o processo de obtenção de uma sequência de chaveamento em uma RD, considerando o conceito de *cold-load pickup*, realizando assim chaveamentos sequenciais para evitar um pico de demanda no sistema através de otimização via AG; Luan, Irving e Daniel (2002) acham a melhor solução para o restabelecimento da RD usando o AG com a permutação de números inteiros, onde cada cromossomo é a lista dos índices das chaves.

## 3 Metodologia

A presente seção apresenta a metodologia desenvolvida para *self-healing* em alimentadores de distribuição. Para isso é tecida comentários em relação aos passos necessários, assim como a função objetivo e restrições.

A metodologia proposta utiliza a informação do estado das chaves pré e pós-falta de modo a inferir, através de um procedimento de classificação, onde a falta se encontra. Ora, ao obter a informação do local onde a falta está localizada, define-se então o espaço de busca de soluções e número de variáveis de decisão que serão definidas no problema de otimização, que realizará o *self-healing* através da definição do estado das chaves no estado de reconfiguração. Para isso é tomado como premissa que os sistemas de proteção presentes na rede estão devidamente coordenados, ou seja, quando de uma falta em trecho de alimentador, teremos como um estado de pós-falta o acionamento da proteção nos equipamentos (chaves e disjuntores) entre essa falta e a subestação.

Outra premissa considerada foi a necessidade de isolamento da falta, isto é, as chaves que estão diretamente ligadas ao trecho com falta são excluídas do campo de busca no processo de otimização. O cenário onde todas as chaves de recurso se encontram abertas e as demais chaves (incluindo os disjuntores) encontram-se fechadas é considerado o estado normal de operação.

Sendo definido o campo de busca, é disparado então o procedimento de otimização que realizará a busca no espaço de soluções, utilizando para isso um algoritmo genético. A função objetivo utilizada e as restrições consideradas são descritas a seguir:

### 3.1 Função Objetivo

$$f_{obj}(N_C, P_C) = \frac{N_C}{N_T} + \frac{P_T}{P_C + 1} \quad (1)$$

onde  $N_T$  é o total de chaveamentos possíveis, dado um conjunto de falhas isoladas,  $N_C$  é o número de chaveamentos totais na corrente solução,  $P_T$  é o total de carga em todos os alimentadores considerados e  $P_C$  representa a carga atendida na presente configuração de chaveamento.

A função objetivo a ser minimizada, descrita em (1), aponta que as soluções a serem encontradas pelo algoritmo de busca visarão:

- 1º termo – minimizar o número de manobras, conservando assim a vida útil dos equipamentos e facilitando a execução do procedimento de *self-healing*;
- 2º termo – maximizar a carga total a ser atendida por um dado chaveamento.

O segundo termo da equação possibilita diminuir as penalidades que a concessionária pode receber devido a interrupções no fornecimento, especificamente o DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) (ANEEL, 2012).

### 3.2 Restrições

A Equação (2) apresenta os limites de tensão que são verificadas após cada nova configuração das chaves, conforme ANEEL (2012). Caso o limite de tensão "V" em qualquer barra "i" não seja respeitado, a  $f_{obj}$  será penalizada.

$$0,93 \text{ p. u.} \leq V_i \leq 1,05 \text{ p. u.} \quad (2)$$

Outra restrição imposta ao algoritmo é a manutenção da estrutura radial nos alimentadores de distribuição, ou seja, configurações de chaveamento que impliquem em anéis ou paralelismo entre subestações serão penalizadas.

#### 4 Estudo de Caso

Nesta seção será descrita o estudo de caso, apresentando dados dos alimentadores reais tais como carga alimentada, disposição das chaves e cenários a serem simulados.

Para a validação da metodologia desenvolvida, foram utilizados dados reais de cinco alimentadores da cidade do Rio de Janeiro, Brasil, concessão da LIGHT SESA. Como pode ser verificado na Figura 1 cada alimentador conta com duas chaves telecomandáveis (retângulos em branco com código indicando a qual alimentador e bloco pertencem), alocadas de forma a dividir o alimentador em três blocos, um disjuntor situado na subestação e uma ou mais chaves de recurso (retângulos cinza com o código indicando em quais alimentadores a chave se conecta).

Todos alimentadores são urbanos, de média tensão (13,0kV) e possuem, em sua configuração normal, respectivamente a seguinte carga atendida e extensão: 1) 2,90 MVA e 3,76 km; 2) 5,62 MVA e 6,65 km; 3) 6,42 MVA e 9,71 km; 4) 5,42 MVA e 6,45 km; 5) 6,33 MVA e 7,96 km.

Para validar a solução de *self-healing* foram propostos três cenários para análise:

- Cenário 1 – Falta entre o Dj\_3 e a Ch\_31;

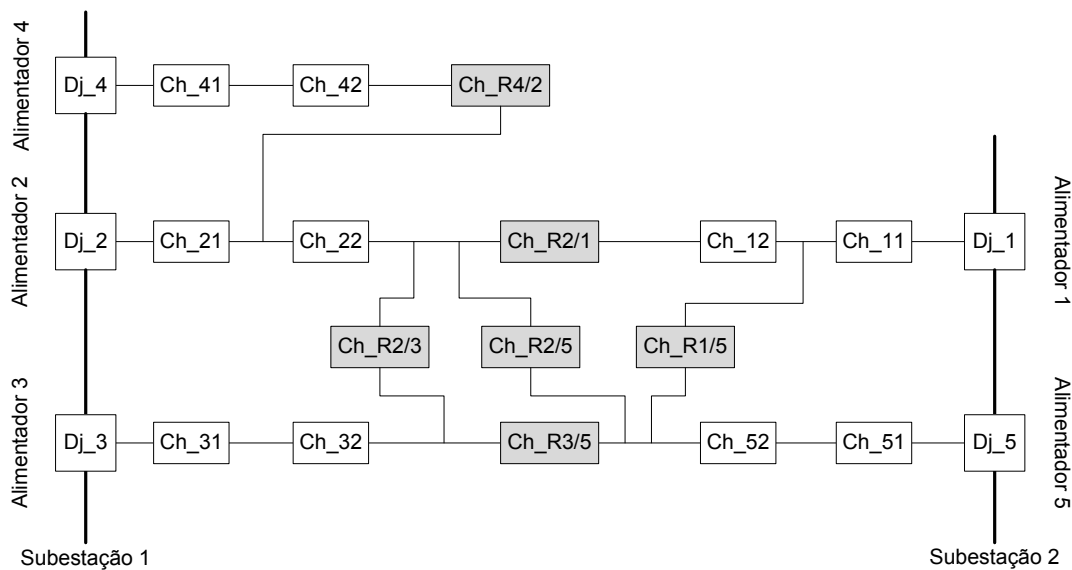


Figura 1. Disposição das chaves entre os cinco alimentadores

- Cenário 2 – Cenário 1 + Falta entre o Dj\_5 e Ch\_51;
- Cenário 3 – Cenário 2 + Falta entre o Dj\_2 e Ch\_51.

Com os cenários apresentados pretende-se verificar a eficácia da metodologia desenvolvida tanto para casos simples quanto para situações mais complexas, tais como diversas faltas simultâneas.

#### 5 Resultados

Nessa seção serão apresentados e analisados os resultados do estudo de caso, incluindo uma descrição detalhada do cenário 3, com múltiplas faltas.

Para as simulações foi utilizado o programa MATLAB® (MATrix LABORatory) e usou-se a “Global Optimization Toolbox”, no qual encontra-se a função do Algoritmo Genético (AG). A parametrização do AG é feita conforme a Tabela 1.

A quantidade de variáveis de decisão (indivíduo) é calculada automaticamente após o isolamento da falta.

Tabela 1. Configuração dos parâmetros do AG.

Parâmetros	Especificação
Tipo da População	Binário
Taxa de Mutação Uniforme	15%
Gerações	50
Tamanho da População	40
Cruzamento	Disperso ( <i>scattered</i> )
População inicial	Aleatória com distribuição uniforme
Seleção	Estocástica uniforme
Elitismo	2

A Figura 2 mostra a evolução do valor da função objetivo para uma simulação do algoritmo genético, para cada cenário, todas com as mesmas parametrizações do algoritmo citadas anteriormente. Pode-se notar que os valores da função objetivos atingidos, para os cenários 1, 2 e 3, crescem nesta ordem. De fato, quando aumenta-se o número de faltas, diminui-se a quantidade total de carga que pode ser atendida, o que implica em obter um valor maior da função objetivo segundo (1). Nota-se também, através desta mesma figura, que o chaveamento ótimo é obtido a partir de, no máximo, 30 iterações no algoritmo de busca. Tal fato pode servir como base para recomendação de parametrização em uma ferramenta de *self-healing* quando da resolução de um problema de similar complexidade.

A seguir, são descritos os chaveamentos ótimos para cada cenário da solução de menor valor de função objetivo. Faz-se uso da nomenclatura exposta na Figura 1 para denotar as chaves que são definidas abertas ou fechadas segundo o procedimento de otimização.

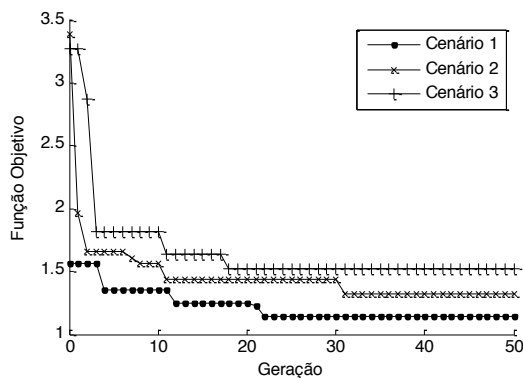


Figura 2. Evolução do valor da função objetivo para cada cenário.

### 5.1 Cenário 1

Neste cenário, é simulada uma falta no bloco localizado entre Dj\_3 e Ch\_31. Assim, no estado pós-falta os trechos compreendidos entre as chaves Ch\_31 e as de recurso do alimentador 3 não são alimentadas apesar de não conterem falta.

Como resultado do procedimento de busca, todas as chaves internas nos alimentadores 1, 2, 4 e 5 se encontram fechadas. No alimentador 3, onde encontra-se a falta, por sua vez, as chaves Dj\_3 e Ch\_31 estão abertas e a Ch\_32 fechada – note que pelo fato de Dj\_3 e Ch\_31 encontrarem-se abertas temos que a falta é corretamente isolada. As chaves de recurso que se encontram abertas, após o restabelecimento, são todas menos a chave de recurso Ch\_R3/5. Nesta configuração de chaveamento, as cargas dos alimentadores 1, 2 e 4 continuam sendo alimentadas como na situação nominal, e a carga do alimentador 3 possível de restabelecimento é repassada ao alimentador 5. Desta forma, a falta é corretamente isolada e as cargas possíveis de serem atendidas são restabelecidas pelo alimentador 5.

### 5.2 Cenário 2

O cenário 2 simula a ocorrência de duas faltas, a saber: (i) falta no bloco localizado entre Dj\_3 e Ch\_31 e (ii) falta no bloco localizado entre Dj\_5 e Ch\_51. Desta forma, no estado pós-falta os trechos compreendidos entre as chaves Ch\_31, Ch\_51 e as de recurso dos alimentadores 3 e 5 não são alimentadas apesar de não conterem faltas.

O resultado do procedimento de otimização foi o seguinte: todas as chaves nos alimentadores 1, 2 e 4 se encontram fechadas. No alimentador 3 e 5, onde se encontram as faltas, as chaves Dj\_3, Dj\_5, Ch\_31 e Ch\_51 se encontram abertas e as chaves Ch\_32 e Ch\_52 fechadas. Novamente, como no resultado do Cenário 1, as faltas foram corretamente isoladas. As chaves de recurso que se encontram abertas, após o restabelecimento, são todas menos as chaves de recurso Ch\_R1/5 e Ch\_R3/5. Tal reconfiguração estabelece que as cargas dos alimentadores 1, 2 e 4 continuam sendo alimentadas como na situação pós-falta, e a carga dos alimentadores 3 e 5, possível de restabelecimento, é repassada ao alimentador 1. Assim sendo, as faltas foram corretamente isoladas, e as cargas dos alimentadores 3 e 5 afetadas pelas faltas foram restabelecidas através do remanejamento de cargas entre os alimentadores.

### 5.3 Cenário 3

Neste cenário são simuladas três faltas em trechos distintos do circuito mostrado na Figura 1, a saber: faltas nos blocos localizados entre (i) Dj\_2 e Ch\_21; (ii) Dj\_5 e Ch\_51 e (iii) Dj\_3 e Ch\_31. Tal cenário para faltas faz com que o estado pós-falta do circuito mantenha as cargas não energizadas entre as chaves Ch\_21, Ch\_31, Ch\_51 e as de recurso dos alimentadores 2, 3 e 5 – obstante não conterem faltas.

Nesta configuração o resultado da aplicação do algoritmo genético quando da minimização de (1) foi o seguinte: todas as chaves nos alimentadores 1 e 4 se encontram fechadas. Nos alimentador 2, 3 e 5, onde se encontram as faltas, as chaves Dj\_2, Dj\_3, Dj\_5, Ch\_21, Ch\_31 e Ch\_51 se encontram abertas e as chaves Ch\_22, Ch\_32 e Ch\_52 fechadas. As faltas foram corretamente isoladas, dada a configuração descrita para as chaves. Encontram-se abertas as chaves de recurso, após o restabelecimento, todas menos as chaves de recurso Ch\_R1/5, Ch\_R3/5 e Ch\_R4/2. A configuração das chaves citada acima faz com que as cargas dos alimentadores 1 e 4 continuem sendo alimentadas como na situação pós-falta, e a carga dos alimentadores 2, 3 e 5, possível de restabelecimento, é repassada aos alimentadores 1 e 4. Desta maneira, as faltas são corretamente isoladas. Ademais, as cargas dos alimentadores 2, 3 e 5 afetadas pelas faltas são restabelecidas através do repasse para os alimentadores 1 e 4.

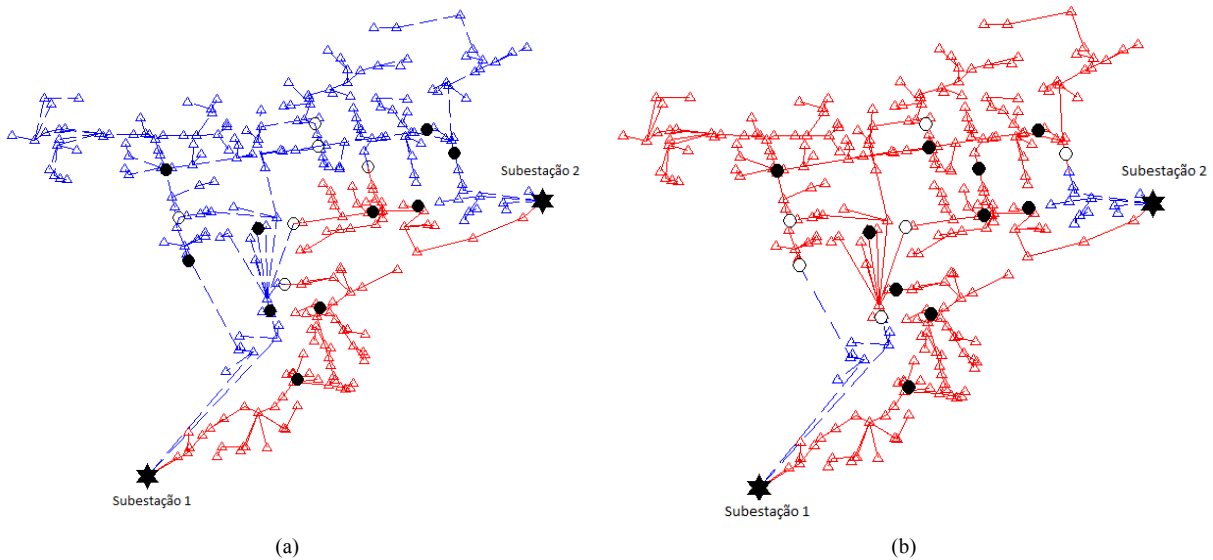


Figura 3. Topologia dos cinco alimentadores (a) pós falta e (b) chaveamento ótimo do cenário 3.

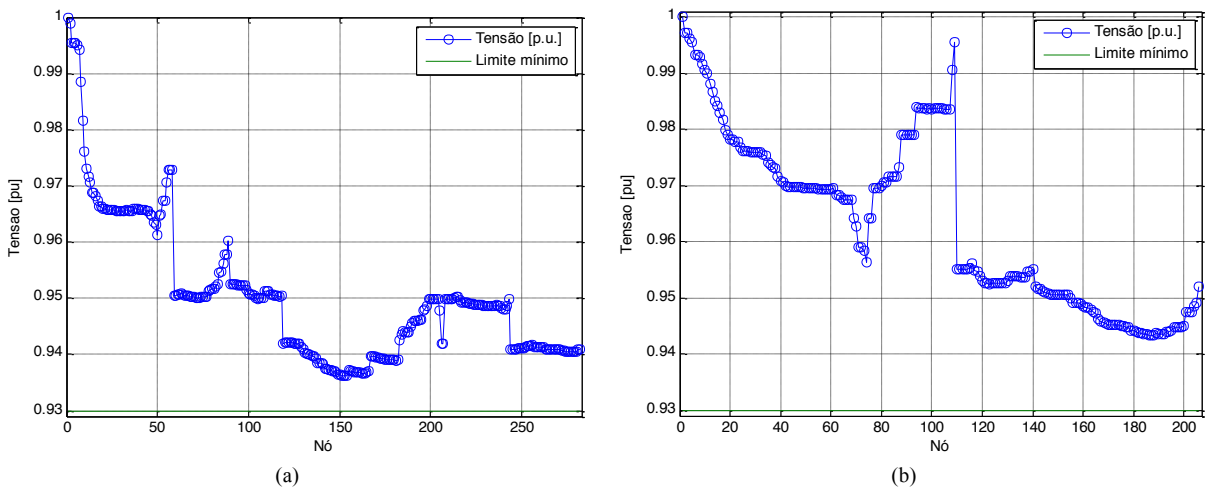


Figura 4. Perfil de tensão do (a) alimentador 1 e (b) alimentador 4.

Na Figura 3(a) pode-se observar o cenário pós-falta em coordenadas geo-referenciadas do cenário 3, conforme premissas de coordenação da proteção anteriormente citadas. A Figura 3(b), por sua vez, apresenta o chaveamento ótimo obtido pelo algoritmo para o reestabelecimento do sistema. Nessas figuras a estrela de seis pontas representa uma subestação, os círculos são as chaves telecomandadas (coloração preta representando chaves fechadas e coloração branca chaves abertas). As cargas alimentadas são expressas por triângulos na cor vermelha e as não alimentadas na cor azul, assim como as linhas pontilhadas indicam linhas não atendidas.

Na Figura 4 pode-se visualizar o perfil de tensão nos alimentadores 1 e 4 da solução ótima do cenário 3. Vale ressaltar que os alimentadores 2, 3 e 5, por possuírem uma falta logo na saída da subestação, não são analisados. Percebe-se que mesmo com o aumento de carga suprida pelos alimentadores 1 e 4, nenhum deles violou limites de tensão.

Percebe-se ainda que o valor da função objetivo encontrado na solução ótima do cenário 3 poderia

também ser atingido através do atendimento dos blocos não faltosos dos alimentadores 3 e 5 através da chave de recurso Ch\_R2\_5 ao invés da Ch\_R1/5 (considerando operação normal dos alimentadores antes da falta).

## 6 Conclusão

No presente artigo uma metodologia para *self-healing* em alimentadores de distribuição, considerando a possibilidade de ocorrência de múltiplas falhas foi apresentada.

Os resultados das simulações apontam que o algoritmo foi capaz de encontrar a solução ótima de chaveamento para o estudo de caso. O perfil de tensão obtido nos resultados do cenário 3, de múltiplas falhas, apontaram a possibilidade da aplicação do chaveamento proposto. Porém, como diversas cargas tendem a ter um comportamento variável, outra abordagem para análise tal como a realizada em estudos preliminares a esse trabalho, documentadas

em Siebert *et al* (2013), deverão ser posteriormente realizadas.

Em trabalhos futuros, a possibilidade de considerar a minimização de perdas técnicas no processo de otimização será explorada, visando dirimir possíveis soluções redundantes como as encontradas no cenário 3. A adição de mais uma função objetivo no problema pode ser encarada como uma formulação de otimização multi-objetivo, passível de solução via metaheurísticas tais como o Nondominated Sorted Genetic Algorithm-II (NSGA-II) ou Multiobjective Particle Swarm Optimization (MOPSO).

### Agradecimentos

O presente trabalho foi apoiado financeiramente e institucionalmente pelo programa *Smart Grid* da concessionária Light.

### Referências Bibliográficas

- ANEEL(Agência Nacional de Energia Elétrica), (2012), “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.”
- Borges, T. T., (2012), “Restabelecimento de Sistemas de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo”. 384 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Borges, T. T., (2012), “Restabelecimento de Sistemas de Distribuição Utilizando Fluxo de Potência Ótimo”. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, p.135.
- Bretas, N. G., Delbem, A. C. B., Carvalho A., (2001), “Representação por cadeias de grafo para AG aplicados ao restabelecimento ótimo em sistemas de distribuição radiais.”. Revista Controle e Automação SBA, v.12, n.1(Jan-Abr), pp. 42-51.
- Chavali, S., Pahwa, A., Das, S., (2002), “A genetic algorithm approach for optimal distribution feeder restoration during cold load pickup”. In: Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, v.2, pp. 1816 – 1819, Honolulu, Hawaii, May.
- Chen, P.; Chen, Z.; Bak-Jensen, B., (2008), “Probabilistic Load Flow: A Review. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies”, pp. 1586-1591.
- Delbem, A. C. B., Bretas, N. G., Carvalho, A., (2000), “Algoritmo de Busca com Heurísticas Fuzzy para Restabelecimento de Energia em Sistemas Radiais de Distribuição”. Revista Controle e Automação SBA, v.11, n.1(Jan-Abr), pp. 55-60.
- DOE (Department of Energy) - Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, (2007), “A System View of the Modern Grid – Appendix A1 Self Heals”. Disponível em: <[http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/Self\\_Heals\\_Final\\_v2\\_0.pdf](http://www.smartgridnews.com/artman/uploads/1/Self_Heals_Final_v2_0.pdf)>. Acesso em 26/05/2013.
- Fukuyama, Y., Chiang, H., (1995), “A parallel genetic algorithm for service restoration in electric power distribution systems”. In: International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and The Second International Fuzzy Engineering Symposium, v.1, pp. 275 – 282, Yokohama, Mar.
- Gellings C. W., (2009), The Smart Grid: enabling energy efficiency and demand response. The Fairmont Press, Inc.
- Ghosh, D., Sharman, R., Rao, H. R., Upadhyaya, S., (2007), “Self-healing systems — survey and synthesis,” Decision Support Systems, vol. 42, no. 4, pp. 2164–2185.
- Guerra, W., Galvis, J. C., Vinicius, M., (2012), “Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Utilizando Otimização por Nuvem de Partículas,” pp. 1–6.
- Holland, J. H., (1975), “Adaptation in Natural and Artificial Systems,” Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan”, EUA.
- IEA (Internacional Energy Agency), (2011), “Technology Roadmap - Smart Grid.” pp. 1–48.
- Lee, K.Y. and El-Sharkawi, M.A., (2008), “Modern Heuristic Optimization Techniques: Theory and Applications to Power Systems”, Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press.
- Luan, W. P., Irving, M.R., Daniel, J.S., 2002, “Genetic algorithm for supply restoration and optimal load shedding in power system distribution networks”. In: Proceedings of the IEE Generation, Transmission and Distribution, v. 149, n. 2, pp. 145-151, Mar.
- Momoh, J. A., (2012), “Smart Grid - Fundamentals of Design and Analysis”, Hoboken, New Jersey, Wiley-IEEE Press.
- Oualmakran, Y.; Melendez, J.; Herraiz, S., (2012), “Self-healing for smart grids: Problem formulation and considerations”. 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), pp.1,6, 14-17 Oct. 2012.
- Pareja, L.A.G., (2009), “Fluxo de Potência em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Incertezas”. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- Russell, S., Norvig, P., (2004), “Inteligência Artificial”, Elsevier, Rio de Janeiro.
- Siebert, L., Aoki, A. R., Souza, A. R. R., Ferreira, L. R., Bonelli, A. F., Toledo, Fábio O., (2013), “Deterministic Versus Probabilistic Approaches to Self-Healing in Smart Grid”. 22<sup>nd</sup> International Conference on Electricity Distribution (CIRED), 10-13 Jun. 2013.