

Algoritmo de Reconfiguração de Sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Evolução Diferencial

Caio F. V. Oliveira
Departamento de
Engenharia Elétrica
Universidade Federal do
Ceará - UFC
Fortaleza, Ceará.
caio_vas@hotmail.com

Dr. Giovanni C.
Barroso
Departamento de Física
Universidade Federal do
Ceará - UFC
Fortaleza, Ceará.
gcb@fisica.ufc.br

José R. Bezerra
Departamento de
Teleinformática
Instituto Federal de E., C.
e T. do Ceará (IFCE)
Fortaleza, Ceará.
jbroberto@ifce.edu.br

Ruth P. S. Leão
Departamento de
Engenharia Elétrica
Universidade Federal do
Ceará – UFC
Fortaleza, Ceará.
rleao@dee.ufc.br

Resumo — Este artigo apresenta a proposta e a implementação de um algoritmo de reconfiguração automática para redes de distribuição de energia elétrica (SDE) baseado em evolução diferencial. A metodologia proposta utiliza como dados de entrada valores de potências ativa e reativa ligadas às barras do sistema de distribuição, informações de topologia, configuração inicial da rede, capacidade dos condutores e de fornecimento das fontes. Como resultado, a reconfiguração ótima da rede considerando o número mínimo de cargas desenergizadas e de perdas é apresentada. São consideradas restrições operacionais típicas de redes elétricas radiais. Testes com o algoritmo foram realizados para os sistemas elétricos de 16 e 33 barras e os resultados foram comparados com outras metodologias. Os resultados dos testes apontam que a implementação do algoritmo em redes de distribuição de concessionárias pode contribuir para maior satisfação do consumidor e melhoria nos indicadores de qualidade de serviço da concessionária.

Palavras-Chave—redes elétricas inteligentes; eficiência energética; reconfiguração automática; sistemas de recomposição automática; sistemas de distribuição de energia elétrica.

I. INTRODUÇÃO

Redes Elétricas Inteligentes (REI) constituem um paradigma amplamente estudado em todo o mundo, para modernizar as redes elétricas por meio de controle automático, técnicas de comunicação e tecnologia da informação [1].

Sistemas inteligentes para automação de redes de distribuição de energia elétrica estão entre os temas de REI mais pesquisados no Brasil e no mundo [1]. No âmbito da automação de sistemas elétricos, muitos pesquisadores e empresas de energia estão investindo no desenvolvimento de sistemas de recomposição automática (SRA) [2]-[6].

Um SRA, ou de sistema de auto recomposição (self-healing, no inglês), é capaz de identificar o trecho da rede em falta e os trechos não defeituosos, porém desenergizados como resultado da falta, restaurar o maior número possível de trechos

sem defeito baseado em critérios de segurança operacional e prioridades de restabelecimento definidos pela concessionária, e retornar a operação da rede elétrica ao seu estado seguro de forma automática [5]. Dentre os benefícios advindos da implantação de um SRA para as empresas de energia elétrica estão: as condições anormais da rede são automaticamente conhecidas; as alterações na rede são automaticamente realizadas; os operadores não necessitam realizar manobras de ligar/desligar a rede; diminui o tempo de interrupção de energia ao cliente; diminui os custos de deslocamento de equipes de campo; melhora os indicadores de qualidade e de satisfação do cliente; e reduz situações de estresse às quais os operadores são submetidos [4].

Além do serviço de restauração, há situações em que o sistema elétrico se encontra em condições normais de operação e, com a presença de variações de cargas ao longo do dia, o mesmo é reconfigurado através de operações de chaveamento para promover uma redução das perdas elétricas e/ou proporcionar um balanceamento de cargas entre os alimentadores [7]. Ambos os casos consistem em problemas de reconfiguração de sistemas de distribuição (RSD). RSD é o processo de mudança de estado da topologia da rede através da abertura e fechamento de chaves de encontro visando otimizar os parâmetros da rede [8].

Diante do elevado número de chaves presentes em um sistema de distribuição de médio a grande porte, surge um elevado número de possibilidades de reconfiguração final da rede elétrica, devendo-se escolher aquela que proporcione uma otimização dos parâmetros da mesma, devendo obedecer sempre às restrições operacionais de segurança do sistema. Desta forma, a reconfiguração ótima de um sistema de distribuição de energia elétrica (SDE) é um problema complexo de programação não linear inteira mista [9], onde o espaço de busca cresce de forma exponencial conforme aumenta o número de chaves presentes no sistema.

O problema de RSD para minimização das perdas elétricas foi inicialmente abordado por Merlin e Back [10] em 1975. No

trabalho os autores empregaram otimização e heurística com uma estrutura de extensão de árvore para determinar a configuração de operação com perdas mínimas em uma condição específica de carga. Cinvanlar et al [11] adotaram um algoritmo baseado no método *branch exchange*, em que uma fórmula simples foi desenvolvida para avaliar o quanto uma permutação da localização da chave normalmente aberta (NA) impacta nas perdas ativas em um SDE.

Em anos recentes, diversos trabalhos vêm sendo publicados propondo algoritmos para solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição para minimização de perdas elétricas. São encontrados na literatura métodos baseados em inteligência artificial, como exemplo recozimento simulado [12], redes neurais artificiais [13], algoritmos genéticos [14] busca tabu [7], colônia de formigas [14], otimização por enxame de partículas [8] e colônia artificial de abelhas [16].

Abordando o problema de RSD, neste trabalho é proposto e desenvolvido um algoritmo baseado em evolução diferencial (ED), para a reconfiguração ótima da rede elétrica, em condições normais ou sob falta, com as perdas ativas mínimas e número máximo de cargas restabelecidas, respeitando sempre as restrições operacionais de segurança do sistema elétrico e mantendo a propriedade radial da rede. ED foi escolhido por se tratar de um método de otimização robusto e eficiente [18]. A validação do método desenvolvido é realizada por meio do uso de sistemas testes de 16 e 33 barras. Os resultados são comparados com os de outras metodologias encontradas na literatura.

O restante deste trabalho é dividido nas seguintes seções: Seção II trata da formulação do problema, onde é apresentada a função objetivo e as condições do problema; Seção III apresenta os conceitos fundamentais de evolução diferencial; na Seção IV é apresentado o método utilizado para o cálculo do fluxo de potência, Seção V apresenta a metodologia proposta; Seção VI apresenta as simulações e resultados obtidos com os sistemas de teste de 16 e 33 barras; e por fim na Seção VII as conclusões são discutidas.

II. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para o problema de reconfiguração abordado neste artigo, o interesse é minimizar as perdas ativas:

$$Função\ Objetivo = Min(Perdas\ Ativas) \quad (1)$$

Para o caso especial de recomposição, deseja-se, além de minimizar as perdas ativas, maximizar o número de cargas restabelecidas. Para tanto, o número de chaves abertas para a nova configuração do sistema deve ser igual ao número de chaves abertas na configuração inicial (N) e, uma destas chaves deve ser a chave referente ao ramo com defeito. As outras N-1 chaves abertas serão escolhidas pelo método de forma a otimizar a topologia do sistema.

Para calcular as perdas ativas no SDE radial foi utilizado o método de Varredura Direta/Inversa por Potências para o cálculo do fluxo de potência da rede [20]. Desta forma consegue-se obter com precisão os valores das tensões nas cargas e a perda em cada ramo da rede.

A. Restrições

As reconfigurações estão sujeitas às normas operacionais de distribuição de energia elétrica típicas das concessionárias. Se alguma restrição é transgredida, a reconfiguração proposta não será aceita. As restrições consideradas são:

1) Capacidade de Condução dos Condutores

A corrente em cada ramo deve ficar dentro dos limites de especificação dos condutores. Sendo I_{ramo} a corrente no ramo considerado e I_{max} a ampacidade do condutor, então:

$$I_{ramo} \leq I_{max} \quad (2)$$

2) Limite de Potência das Fontes

A potência nominal de cada fonte (subestação) não deve ser ultrapassada. Sendo P_{imax} a potência nominal da fonte i considerada e P_i a carga total suprida pela mesma na configuração proposta, então:

$$P_i \leq P_{imax} \quad (3)$$

3) Radialidade

Toda reconfiguração deve manter a radialidade da rede de distribuição, ou seja, não devem existir circuitos em anel.

4) Falta Isolada

O trecho com falta deve ser isolado do sistema por meio da abertura das chaves em sua vizinhança em um caso de recomposição.

III. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

Evolução Diferencial (ED) foi proposto por Price e Storn em 1995 [17]. É um algoritmo de otimização global simples, robusto e eficiente que contém apenas alguns parâmetros de controle [18]. De acordo com estudos frequentemente relatados [18]-[19], ED apresenta melhor desempenho que vários outros métodos de otimização em termos de velocidade de convergência e robustez diante de funções comuns de referência e problemas clássicos.

Evolução Diferencial é um método de busca direta baseado em população [19]. Como em outros algoritmos evolucionários (AE), inicia-se com um vetor de população gerado aleatoriamente, quando nenhum conhecimento preliminar sobre o espaço de solução está disponível. Suponha que $X_{i,G}$ ($i = 1, 2, \dots, N_p$) sejam os vetores população (target vectors) da geração G , em que N_p é o número da população inicial. As populações sucessoras são geradas adicionando a diferença ponderada entre dois vetores selecionados aleatoriamente a um terceiro vetor selecionado aleatoriamente. A seguir serão apresentadas as definições dos operadores de mutação, cruzamento e seleção para o ED clássico (*DE/rand/1/bin*).

Mutação – Para cada vetor $X_{i,G}$ da geração G , o *mutant vector* $V_{i,G}$ é definido como:

$$V_{i,G} = X_{r_1,G} + F \cdot (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad (4)$$

em que $i = \{1, 2, \dots, N_p\}$ e r_1, r_2 e r_3 são índices inteiros randômicos mutuamente distintos selecionados do conjunto $\{1, 2, \dots, N_p\}$, que satisfazem $N_p \geq 4$. F é uma constante real pertencente ao intervalo $[0, 2]$ que determina o fator de ponderação de $(X_{r_2,G} - X_{r_3,G})$ a ser adicionado. Valores elevados para F resultam em maior diversidade na população gerada e valores baixos proporcionam uma aceleração na convergência.

Cruzamento – ED utiliza a operação de cruzamento para gerar novas soluções misturando vetores concorrentes, além de aumentar a diversidade da população. *Trial Vector* é definido a seguir:

$$U_{i,G} = (U_{1i,G}, U_{2i,G}, \dots, U_{Di,G}) \quad (5)$$

em que $j = 1, 2, \dots, D$; D é a dimensão do problema, e

$$U_{ji,G} = \begin{cases} V_{ji,G} & \text{se } \text{rand}_j(0,1) \leq C_r \vee j = k \\ X_{ji,G} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

$C_r \in (0,1)$ é a taxa de cruzamento predefinida e $\text{rand}_j(0,1)$ é a j -ésima avaliação do gerador de números randômicos uniforme.

Seleção – Parte do algoritmo que decide qual vetor ($U_{i,G}$ ou $X_{i,G}$) deve fazer parte da próxima geração $G + 1$. O vetor tentativa $U_{i,G}$ é comparado com o vetor alvo $X_{i,G}$ utilizando o *critério guloso*. Para um problema de minimização, o vetor que possui a menor função de aptidão é escolhido.

Na Figura 1 são ilustradas as etapas do algoritmo do ED clássico (*DE/rand/1/bin*).

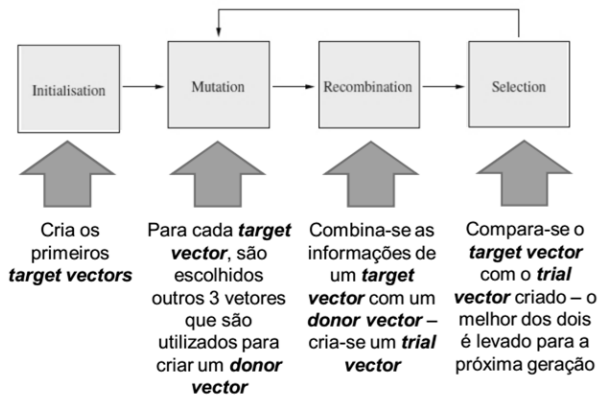


Figura 1. Etapas do Algoritmo ED clássico (*DE/Rand/1/bin*).

IV. MÉTODO PARA CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA

O método de Varredura Direta/Inversa é o mais utilizado para determinar o fluxo de potência de sistemas de distribuição radiais [22]. A propriedade única de que esses sistemas de distribuição apresentam um único caminho da fonte para uma dada barra é utilizada como vantagem para a velocidade de convergência deste método. Existem dois métodos de Varredura Direta/Inversa conhecidos: Método de Soma de Potências (MSP) e Método de Soma de Correntes (MSC).

Em ambos os métodos, existem dois estágios para se obter as variáveis do sistema:

Estágio de Varredura Inversa: partindo dos nós (barras) extremos da rede e usando uma estimativa inicial das tensões nodais, calculam-se as correntes (MSC) ou fluxos de potências (MSP) nas linhas até o nó raiz (subestação). Ao final, têm-se os valores das potências P_k e Q_k em todas as barras da rede no MSP ou os valores das correntes I_k em todos os ramos da rede no MSC.

Estágio de Varredura Direta: partindo da subestação e com a estimativa das injeções de correntes nos ramos ou potências das barras, atualizam-se os valores das tensões das barras da rede até os nós extremos.

O processo de varredura direta/inversa é repetido até que a diferença entre as tensões para cada uma das barras entre duas iterações consecutivas não ultrapasse um valor de tolerância preestabelecido.

Neste trabalho foi utilizado o MSP por ter apresentado melhores resultados para redes de distribuição radiais em termos de precisão dos resultados, tempo total de computação e facilidade de modelagem dos componentes do sistema [22], onde as equações utilizadas são apresentadas a seguir.

Método de Soma de Potências (MSP)

Dadas as magnitude e fase da tensão do nó raiz, os mesmos valores são atribuídos para todas as barras da rede para a primeira iteração.

No processo de varredura inversa, as seguintes equações são utilizadas:

$$P_k^{eq} = P_k + \sum P_j + \sum PL_{kj} \quad (7)$$

$$Q_k^{eq} = Q_k + \sum Q_j + \sum QL_{kj} + Q_k^{sh} \quad (8)$$

em que P_k^{eq} é a potência ativa equivalente da barra k ; P_k é a carga ativa da barra k ; $\sum P_j$ é o somatório das potências equivalentes das barras j diretamente conectadas após a barra e $\sum PL_{kj}$ é o somatório das perdas ativas nos ramos conectados entre a barra k e as barras j .

Para a Equação (8), as definições são análogas, com a adição do termo Q_k^{sh} : que representa a potência reativa shunt injetada na barra k , sendo positiva se capacitiva ou negativa se indutiva.

Para a primeira iteração, considera-se que as perdas são nulas.

Dada a Figura 2, utilizam-se as seguintes equações para o cálculo do módulo das tensões nodais de cada barra:

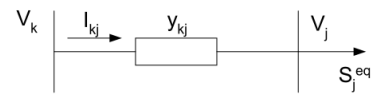


Figura 2. Ramo de um sistema de Distribuição.

$$A \cdot |V_j|^4 + B \cdot |V_j|^2 + C = 0 \quad (9)$$

$$A = g_{kj}^2 + b_{kj}^2 \quad (10)$$

$$B = 2 \cdot (P_j^{eq} \cdot g_{kj} - Q_j^{eq} \cdot b_{kj}) - y_{kj}^2 \cdot |V_k|^2 \quad (11)$$

$$C = (P_j^{eq})^2 + (Q_j^{eq})^2 \quad (12)$$

em que g_{kj} e b_{kj} são condutância e susceptância do ramo entre as barras k e j , respectivamente.

Para o cálculo do ângulo de fase da tensão de cada barra, é utilizada a seguinte expressão:

$$\theta_j = \theta_k + \varphi_{kj} + \arctan \left(\frac{Q_j^{eq} - b_{kj} \cdot |V_j|^2}{P_j^{eq} + g_{kj} \cdot |V_j|^2} \right) \quad (13)$$

em que a admitância do ramo entre as barras k e j é dada por:

$$y_{kj} = g_{kj} + j \cdot b_{kj} = |y_{kj}| \angle \varphi_{kj} \quad (14)$$

O cálculo das perdas no ramo entre as barras k e j é realizado através das expressões:

$$PL_{kj} = |I_{kj}| \cdot r_{kj} = \left(\frac{|S_{kj}^{eq}|}{|V_j|} \right)^2 \cdot r_{kj} \quad (15)$$

$$QL_{kj} = |I_{kj}| \cdot x_{kj} = \left(\frac{|S_{kj}^{eq}|}{|V_j|} \right)^2 \cdot x_{kj} \quad (16)$$

em que r_{kj} e x_{kj} são a resistência e a reatância do ramo entre as barras k e j , respectivamente.

A função objetivo é minimizar a soma das perdas ativas (em kW) de todos os ramos presentes na rede que estejam transportando energia. As perdas são dadas pela seguinte equação:

$$Perdas\ Ativas\ (kW) = \sum_{r_{kj} \in \Omega} PL_{kj} \quad (17)$$

em que Ω representa o conjunto de ramos presentes na rede. Os ramos r_{kj} associados às chaves abertas, ou seja, que não estão transportando energia, apresentam valor $PL_{kj}=0$.

V. ALGORITMO PROPOSTO

O algoritmo proposto faz o uso de ED e função objetivo definida como a soma das perdas ativas de todos os ramos presentes na rede, como definida no item anterior. O problema

de reconfiguração de SDE utilizando ED é dividido em três etapas:

- Especificação do número de dimensões.
- Definição do espaço de busca de cada dimensão.
- Utilização de ED para encontrar a reconfiguração ótima do SDE a partir do espaço de busca.

A. Especificação do Número de Dimensões

Cada indivíduo da população do ED proposto representa o conjunto de chaves que devem estar abertas de forma a minimizar a função objetivo, maximizar o número de cargas restabelecidas e atender às restrições mencionadas anteriormente (seção II).

Para se determinar o número de dimensões do problema RSD, supõe-se que as chaves de encontro do sistema estejam fechadas, e com isso serão formados laços. O número de laços presentes no sistema dará a dimensão do problema.

B. Definição do Espaço de Busca de Cada Dimensão

De forma a proporcionar uma aceleração na convergência do algoritmo, o espaço de busca é definido por dimensões, em que cada dimensão do ED representa o conjunto de chaves presentes em um determinado laço em que ao menos uma delas deve estar aberta de forma a manter a radialidade do sistema. Para as chaves presentes em mais de um laço, a escolha da dimensão que a mesma irá pertencer deve ser feita de forma aleatória, de modo que, ao final, cada chave esteja representada por um índice em somente uma das dimensões.

Considere por exemplo o sistema da Figura 3(a), composto por 15 nós de carga, 17 ramos e duas chaves de encontro. Foram supostos fechados os estados de todas as chaves (inclusive das chaves de encontro), concluindo-se a existência de dois laços na rede (I e II). As chaves que não pertencem a nenhum dos laços não são representadas no espaço de busca, de forma que o sistema pode ser simplificado de acordo com a Figura 3(b). Cada dimensão será definida pelas chaves que pertencem ao laço que a mesma representa. Conclui-se desta forma que o problema terá duas dimensões e que serão definidas por: $d_1 = [14, 15, 16, 17, 6]$ e $d_2 = [3, 10, 11, 12, 13]$, em que a dimensão a qual as chaves 4 e 5 irão pertencer será feita de forma aleatória. Pode-se ter ao final, por exemplo, as dimensões definidas por $d_1 = [14, 15, 16, 17, 6, 5, 4]$ e $d_2 = [3, 10, 11, 12, 13]$.

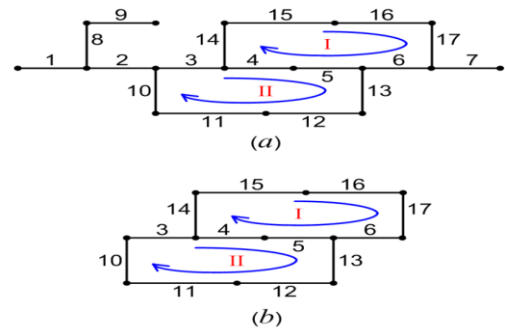


Figura 3. Simplificação de um Sistema de Distribuição.

C. Utilizando ED para encontrar a reconfiguração ótima do SDE a partir do espaço de busca

Definido o espaço de busca, cada indivíduo da população será da forma $X_{i,G} = [X_{1i,G}, X_{2i,G}, \dots, X_{Di,G}]$, onde cada elemento $X_{ji,G}$ representa o número inteiro associado à posição da chave na dimensão d_j que deve ser aberta, sendo D o número total de dimensões do problema e G a geração. O algoritmo ED utilizado é conforme explicado na seção III cuja função objetivo é dada pela Equação (17).

VI. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

O algoritmo proposto foi implementado utilizando o software MATLAB® R2010a e computador com Intel® Core™ i3, 3.07 GHz e 4,00 GB de memória RAM. Para teste e validação da metodologia proposta foram utilizados os sistemas de 16 barras encontrado em [10] e 33 barras encontrado em [31].

A. Sistema de 16 Barras

O sistema de 16 barras alimentado em 23 kV consiste em uma rede de distribuição com 3 alimentadores, 16 barras (cargas), 13 chaves seccionalizadoras (normalmente fechadas) e 3 chaves de encontro (normalmente abertas). A configuração inicial da rede é mostrada na Figura 4.

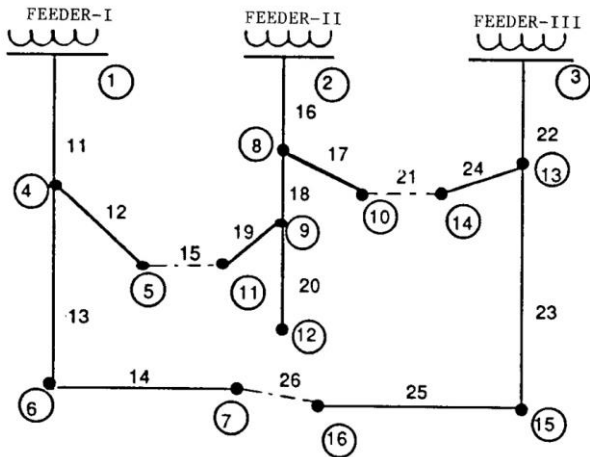


Figura 4. Sistema de Distribuição de 16 Barras.

As linhas cheias na Figura 4 representam chaves seccionalizadoras e as linhas pontilhadas representam chaves de encontro (15, 21 e 26). Os barramentos (cargas) são representados por pontos (numerados de 1-16). As cargas da rede são assumidas serem constantes e seus dados estão disponíveis em [10]. A potência base adotada foi $S_{base} = 100$ MVA.

Para a configuração inicial o total de perdas ativas de acordo com a Figura 4 é de 511.4 kW. A tensão mínima no sistema antes da reconfiguração é de 0.9682 p.u. no nó 9.

Para este caso teste, o problema possui três dimensões e foram adotados os seguintes valores para os parâmetros do algoritmo ED: população inicial (NP=10), taxa de cruzamento C.R.=0.9 e F=0.5. Os resultados da simulação em comparação com [17] são apresentados na Tabela I.

Tabela I. Reconfiguração Sistema 16 Barras - Condições Normais.

	Chaves Abertas	Perdas Ativas (kW)	Tensão Mínima (p.u.)	Tempo Computacional (s)
Configuração Inicial	15, 21, 26	511	0.9693 Barra 9	-
Config. Final Método Proposto	19, 17 e 26	464	0.9707 Barra 9	0.97
Config. Final Ref [17]	19, 17 e 26	464	0.9682 Barra 9	4.3

Considere agora uma falta no ramo correspondente à chave 16 após a reconfiguração ótima da rede. Tal chave deve ser aberta para isolar o defeito, o que resulta na desenergização das barras 8, 10 e 12. Tais barras devem ser recompostas através de manobras de determinadas chaves. Os resultados da simulação em comparação com [9] são apresentados na Tabela II.

Tabela II. Reconfiguração Sistema 16 Barras - Falta no Ramo 6.

	Chaves Abertas	Cargas Restabelecidas	Tensão Mínima (p.u.)	Tempo Computacional (s)
Configuração Falta Isolada	19, 16, 17, 26	-	-	-
Config. Final Método Proposto	16, 18 e 26	100 %	0.9517 Barra 12	0.95
Config. Final Ref [9]	16, 18 e 26	100 %	0.9517 Barra 12	-

B. Sistema de 33 Barras

O sistema de 33 barras alimentado em 12.66 kV consiste em uma rede de distribuição com um alimentador, 33 barras, carga total de 3715 kW, 33 chaves seccionalizadoras (normalmente fechadas) e 5 chaves de encontro (normalmente abertas). A configuração inicial da rede é mostrada na Figura 5.

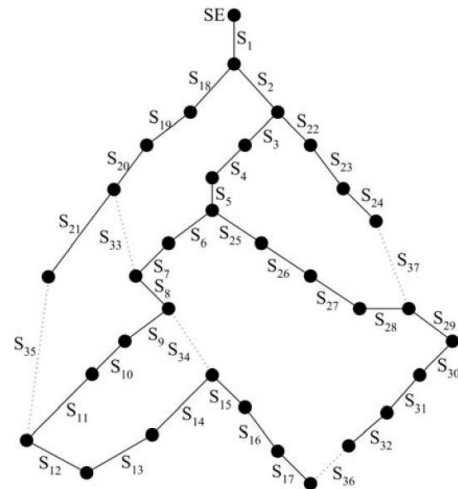


Figura 5. Sistema de Distribuição de 33 Barras.

Em sua configuração inicial, as perdas ativas totais do sistema somam 203 kW e a tensão mínima é de 0,9131 p.u. encontrada na barra 18. Os resultados da simulação em comparação com [8] são apresentados na Tabela III.

Tabela III. Reconfiguração Sistema 33 Barras - Condições Normais.

	Chaves Abertas	Perdas Ativas (kW)	Tensão Mínima (p.u.)	Tempo Computacional (s)
Configuração Inicial	33, 34, 35, 36 e 37	203	0.9131 Barra 18	-
Config. Final Método Proposto	7, 9, 14, 32 e 37	140	0.9478 Barra 32	12.85
Config. Final Ref [8]	7, 9, 14, 32 e 37	140	0.9478 Barra 32	5.3

Considere duas faltas simultâneas, nos ramos correspondente às chaves 5 e 35 após a reconfiguração ótima da rede. Tais chaves devem ser abertas para isolar os defeitos, o que resulta na desenergização das barras 5, 6, 9-13 e 25-31, que devem ser recompostas através de manobras de determinadas chaves. Os resultados da simulação em comparação com [9] são apresentados na Tabela IV.

Tabela IV. Reconfiguração Sistema 33 Barras - Falta nos Ramos 5 e 35.

	Chaves Abertas	Cargas Restabelecidas	Tensão Mínima (p.u.)	Tempo Computacional (s)
Configuração Falta Isolada	5, 7, 9, 14, 32, 35 e 37	-	-	-
Config. Final Método Proposto	5, 6, 14, 35 e 32	100 %	0.9328 Barra 18	6,26
Config. Final Ref. [9]	5, 6, 14, 35 e 36	100 %	0.9328 Barra 18	-

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um algoritmo para reconfiguração de sistemas elétricos de distribuição tanto em condições normais quanto em condições de falta utilizando conceitos do método metaheurístico evolução diferencial. Duas topologias distintas de sistemas de distribuição foram utilizadas para validação do método. Os resultados foram comparados com trabalhos encontrados na literatura. Ao final foram alcançados os objetivos previamente estabelecidos. O método proposto tem uma rápida convergência diante do pequeno número de gerações necessárias para apontar uma solução para o problema imposto. O tempo de resposta do algoritmo para casos de recomposição foi bastante inferior ao limite máximo de três minutos impostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Desta forma conclui-se que tal método foi validado e que o mesmo pode ser aplicado para a elaboração de sistemas de reconfiguração que visam agregar eficiência e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica.

REFERENCES

[1] Redes elétricas inteligentes: contexto nacional. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência, Tecnologia e Inovação (CGEE)/Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Série Documentos Técnicos. Outubro 2012. N°16.

[2] R. F. Sampaio, J. V. C. Barros, R. P. S. Leão, G. C. Barroso, R. M. Araújo, R. P. S. L., G. C. Barroso, E. B. de Medeiros, K. M. Canuto, J. G. Silveira, K. Queiroz, F. A. Barros, A. L. E. Valentim, L. E. P. Formiga, J. R. Bezerra, R. A. P. da Silva, T. N. S. Pontes, L. S. Melo, L. M. Ferreira, C. F. V. de Oliveira, M. B. Sá, "Metodologia para Desenvolvimento de um Sistema de Reposição Automática para um

Projeto Piloto de Redes Inteligentes," in *Proc. 2012 XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

- [3] C. J. S. MOURA. "Estudo para Implantação de um Sistema de Recomposição Automática para a Rede de Distribuição do Campus do Pici," Monografia, Dept. Eng. Elétrica, Universidade Federal do Ceará - UFC, 2010, 73p.
- [4] K. M. Canuto, G. C. Barroso, M. P. S. Neto, R. F. Sampaio, R. P. S. Leão, E. B. de Medeiros, "Fluent Restoration Modelling Applied to a Real Power System Using Colored Petri Nets," in *Proc. International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, 28th to 30th March 2012, Santiago de Compostela, Spain.
- [5] A. T. Ohara, "Sistema de Recomposição Automática de Redes de Distribuição - A Aplicação Do Conceito de Self-Healing," in *Proc. VI CIERTEC - Seminário Internacional sobre Smart Grid em Sistemas de Distribuição e Transmissão de Energia Elétrica*, Minas Gerais, Brasil, Out. 2009.
- [6] T. D. Sudhakar, K. N. Srinivas. "Restoration of power network - a bibliographic survey," *European Transactions On Electrical Power*, vol.21:, pp. 635-655, 2011.
- [7] T. Thakur and T. Jaswanti, "Tabu search based algorithm for multiobjective network reconfiguration problem," *Energy Science and Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 1-10, 2011.
- [8] T. M. Khalil e A. V. Gorpinich, "Reconfiguration for Loss Reduction of Distribution Systems Using Selective Particle Swarm Optimization," *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, vol. 3, n. 6, Junho 2012.
- [9] T. T. Borges, S. Carneiro Jr, P. A. N. Garcia e J. L. R. Pereira, "Restabelecimento De Sistemas De Distribuição Utilizando Fluxo De Potência Ótimo," *Revista Controle & Automação*, vol. 23, no. 6, Nov. e Dez. 2012.
- [10] A. Merlin and H. Back, "Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system," *Proc. 5th Power Syst. Comput. Conf. (PSCC)*, Cambridge, UK, pp. 1-18, 1975.
- [11] S. Civanlar, J.J. Grainger, H. Yin, S.S.H. Lee, "Distribution feeder reconfiguration for loss reduction", *IEEE Transactions Power Delivery* 3, pp. 1217-1223, 1988.
- [12] H. C. Chang and C. C. Kuo, "Network reconfiguration in distribution system using simulated annealing," *Electric Power Systems Research*, vol. 29, pp. 227-238, May 1994.
- [13] H. Kim, Y. Ko, and K. H. Jung, "Artificial neural networks based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 8, no. 3, pp. 1356-1366, July 1993.
- [14] Y.-Y. Hong and S.-Y. Ho, "Determination of network configuration considering multiobjective in distribution systems using genetic algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 1062-1069, May 2005.
- [15] C.-T. Su, C.-F. Chang, and J.-P. Chiou, "Distribution network reconfiguration for loss reduction by ant colony search algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 75, pp. 190-199, August 2005.
- [16] R. S. Rao, S. V. L. Narasimham e M. Ramalingaraju, "Optimization of Distribution Network Configuration for Loss Reduction Using Artificial Bee Colony Algorithm," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, n. 45, 2008.
- [17] R. Storn and K. Price, "Differential evolution—A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces," Berkeley, CA, Tech. Rep. TR-95-012, 1995.
- [18] K. Price, R. M. Storn, and J. A. Lampinen, "Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization," *Natural Computing Series*, 1st ed. New York: Springer, 2005, ISBN: 3540209506.
- [19] J. Vesterstroem and R. Thomsen, "A comparative study of differential evolution, particle swarm optimization, and evolutionary algorithms on numerical benchmark problems," *Proc. Congr. Evol. Comput.*, vol. 2, pp. 1980-1987, 2004.
- [20] Fluxo de Potência em Redes de Distribuição Radiais. COPPE/UFRJ. Programa de Engenharia Elétrica., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ.