

ALGORITMO PARA RECONFIGURAÇÃO E PROCEDIMENTOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO FPO

Gustavo José Santiago Rosseti

Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário, Bairro São Pedro, Juiz de Fora-MG
gustavo.rosseti@ifsudestemg.edu.br

Edimar José de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário, Bairro São Pedro, Juiz de Fora-MG
edimar.oliveira@ufjf.edu.br

Leonardo Willer de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Campus Universitário, Bairro São Pedro, Juiz de Fora-MG
leonardo.willer@ufjf.edu.br

RESUMO

Este artigo apresenta um algoritmo de otimização heurístico passo a passo para a resolução do problema de reconfiguração de sistemas elétricos radiais de distribuição, com o objetivo de minimização das perdas técnicas. A metodologia de otimização baseia-se em um Conjunto Dinâmico de Chaves (CDC), que é atualizado de acordo com as mudanças de topologia do sistema, diminuindo a possibilidade de encerramento precoce do algoritmo de busca em soluções de ótimo local. Além disso, o algoritmo determina a sequência de manobras das chaves do sistema durante o processo de reconfiguração, a fim de viabilizar a operação nos estágios intermediários do processo. Um modelo de fluxo de potência ótimo (FPO) é apresentado para a obter os multiplicadores de Lagrange utilizados na determinação da sequência de manobras.

PALAVRAS CHAVE. Algoritmo de Otimização Heurístico, Fluxo de Potência Ótimo, Reconfiguração de Sistemas de Distribuição

Área principal: EN - PO na Área de Energia

ABSTRACT

This paper presents a step-by-step heuristic optimization algorithm for solving the reconfiguration of radial electrical distribution systems, aiming at the technical loss minimization. The optimization methodology is based on a Dynamic Switches Set (DSS), which is updated due to topological changes in the electrical network, and avoids the premature converge of the algorithm in suboptimal solutions. Besides, the algorithm determines the sequence of switching operations during the reconfiguration process, in order to obtain feasible operation points in the intermediate stages of the process. An optimal power flow (OPF) model is presented for obtaining the Lagrange multipliers used to determine the switching operations.

KEYWORDS. Heuristic Optimization Algorithm, Optimal Power Flow, Reconfiguration of Distribution Networks

Main area: Operational Research in the Energy Sector

1. Introdução

A otimização de Sistemas de Distribuição de Energia (SDE), através de reconfiguração de sua rede elétrica, é uma tarefa complexa devido à natureza das variáveis envolvidas e às restrições sistêmicas e operacionais, como a estrutura de rede radial (Zhu, 2002). Isto implica que a rede não pode ter malhas ou caminhos fechados. Além disto, todas as barras ou nós da rede devem ser conectados (Carreno et al. 2008), para evitar interrupções no fornecimento de energia aos consumidores. Estas restrições devem ser consideradas no problema de reconfiguração, que consiste na determinação da topologia que otimiza o estado da rede, através, por exemplo, de redução de perdas técnicas (Kalantar et al., 2006), ou seja, perdas por dissipação de potência nos cabos dos alimentadores da rede. Estas características configuram um campo promissor para a aplicação de ferramentas de otimização na área de energia.

Mais especificamente, a reconfiguração de uma rede elétrica resulta em transferência de cargas entre alimentadores com diferentes níveis de carregamento (Pfitscher et al. 2013), através de redefinição dos estados das chaves manobráveis (aberto ou fechado). Estas chaves são acopladas a determinados trechos de alimentadores a fim de aumentar a confiabilidade do sistema e são compostas de seccionadoras, ou normalmente fechadas (NF), e chaves de interconexão, ou normalmente abertas (NA) (Guan et al., 2015).

Além das restrições de radialidade e conectividade de uma rede elétrica de distribuição, é importante observar restrições como limites de tensão para uma operação viável, tanto durante quanto após operações de manobra de chaves (Naveen et al. 2015). As características da função objetivo e/ou restrições, juntamente com a natureza discreta das variáveis de decisão (chave aberta ou fechada), resulta em um problema de programação não linear inteira mista de natureza combinatória (Barbosa et al. 2013), que pode ser de porte considerável em se tratando de redes reais de distribuição. Estas características e restrições dificultam a resolução do problema de reconfiguração, justificando o desenvolvimento de métodos heurísticos para esta tarefa.

Diversas metodologias de otimização para a reconfiguração de redes de distribuição podem ser encontradas na literatura. Uma classe de métodos heurísticos baseia-se na utilização de algoritmos iterativos que partem da configuração em malha: Merlin e Back (1974), Shirmohammadi e Hong (1989), Gomes et al. (2005), Raju e Bijwe (2008) e Singh et al. (2009). Daí, estes algoritmos efetuam a abertura sequencial de chaves, com informações de índices de sensibilidade, até a obtenção de uma configuração radial com perdas mínimas.

Outra classe de métodos heurísticos também utiliza algoritmos iterativos, porém partindo de uma topologia radial: Civanlar et al. (1988), Baran e Wu (1989), Kashem et al. (2000), Mena e Garcia (2012) e Oliveira et al. (2014). A transição desta topologia para a configuração ótima é realizada através de manobras de chaves, também guiadas por índices de sensibilidade. Metodologias baseadas em metaheurísticas e inteligência artificial também têm sido propostas, como em Das (2006), Chiou et al. (2005), Salazar et al. (2006), Carpaneto e Chicco (2008), Abdelaziz et al. (2010) e Torres et al. (2013).

Considerando a importância do problema e a aplicabilidade de métodos de otimização, o presente trabalho apresenta um algoritmo heurístico passo a passo para a reconfiguração de SDE, baseado em um Conjunto Dinâmico de Chaves (AHCDC), que determina a topologia associada a perdas mínimas a partir de uma configuração radial base. Para tanto, o índice de sensibilidade de Oliveira et al. (2009) e Oliveira et al. (2010) é utilizado, calculado através de parâmetros operativos do sistema e por multiplicadores de Lagrange, obtidos da execução de um modelo de fluxo de potência ótimo. Em cada passo do algoritmo heurístico, uma nova solução radial é obtida no sentido de redução de perdas. Adicionalmente, as decisões tomadas durante o processo iterativo fornecem a sequência de manobras desde a rede base até a rede radial final, que pode então ser incorporada aos procedimentos seguidos pelos operadores da rede. Para a resolução do problema de FPO, propõe-se a aplicação do método de pontos interiores de Oliveira et al. (2015). A combinação do AHCDC de Oliveira et al. (2014) com o índice de sensibilidade proposto em Oliveira et al. (2010) é inédita. A metodologia de otimização proposta é testada em sistemas de distribuição conhecidos na literatura.

2. Formulação matemática do problema

O problema de otimização para a reconfiguração de redes radiais de distribuição, visando à minimização de perdas técnicas, pode ser modelado e formulado como em Oliveira et al. (2010):

$$\text{Min } FOB = \sum_{km=1}^{NC} X_{km} \cdot L_{km} \quad (1.1)$$

Sujeito a:

$$Pg_k - Pl_k - \sum_{m \in \Omega_k} X_{km} \cdot P_{km} = 0 \quad (\lambda p_k) \quad (1.2)$$

$$Qg_k - Ql_k - \sum_{m \in \Omega_k} X_{km} \cdot Q_{km} = 0 \quad (1.3)$$

$$L_{km} = g_{km} \cdot (V_k^2 + V_m^2 - 2 \cdot V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}) \quad (1.4)$$

$$\bar{Z}^{\min} \leq \bar{Z} \leq \bar{Z}^{\max} \quad (1.5)$$

$$X_{km} = 0 \text{ ou } 1 \quad (1.6)$$

Em que:

<i>FOB</i>	Representa a função objetivo;
<i>NC</i>	Representa o número de trechos do sistema;
X_{km}	Representa a variável binária referente à posição da chave no trecho <i>k-m</i> . Se igual a 1, representa chave fechada, enquanto que zero representa chave aberta;
L_{km}	Representa a perda de potência ativa no trecho <i>k-m</i> ;
Pg_k	Representa a potência ativa gerada na barra <i>k</i> ;
Pl_k	Representa a carga ativa conectada à barra <i>k</i> ;
P_{km}	Representa o fluxo de potência ativa no trecho <i>k-m</i> ;
Ω_k	Representa o conjunto de barras conectadas à barra <i>k</i> por trechos de distribuição;
λp_k	Representa o multiplicador de Lagrange associado à restrição de balanço de potência ativa da barra <i>k</i> ;
Qg_k	Representa a potência reativa gerada na barra <i>k</i> ;
Ql_k	Representa a carga reativa conectada à barra <i>k</i> ;
Q_{km}	Representa o fluxo de potência reativa no trecho <i>k-m</i> ;
g_{km}	Representa a condutância do trecho <i>k-m</i> ;
V_k, V_m	Representam os módulos de tensão das barras <i>k</i> e <i>m</i> , respectivamente;
θ_{km}	Representa a defasagem angular entre as barras <i>k</i> e <i>m</i> ;
\bar{Z}	Representa o conjunto de variáveis do problema com limites físicos e/ou operacionais;
$\bar{Z}^{\min}, \bar{Z}^{\max}$	Representam os limites, inferior e superior respectivamente, das variáveis do conjunto \bar{Z} .

A função objetivo do problema de reconfiguração, formulada na equação (1.1), expressa o somatório das perdas de potência ativa nos trechos do sistema. Cada parcela deste somatório, correspondente a um determinado trecho *k-m*, é multiplicada pelo valor de posição da respectiva chave (X_{km}). Este valor é igual a zero para chave aberta, e igual a 1 para chave fechada. Logo, se X_{km} é igual a zero, não há fluxo de potência no trecho *k-m* e, portanto, este trecho não contribui nas perdas do sistema.

As restrições (1.2) e (1.3) fazem o balanço de potência ativa e reativa, respectivamente, nas barras do sistema. A equação (1.4) é utilizada para cálculo da perda de potência ativa no trecho *k-m*. Os limites das variáveis do problema, tais como de tensão nodal, são observados através da restrição (1.5). Por fim, a restrição (1.6) estabelece a natureza discreta das variáveis

associadas às chaves manobráveis.

A presença de variáveis inteiras, restrição (1.6), dificulta a resolução do problema de reconfiguração através de métodos clássicos de programação matemática. As diversas combinações possíveis de valores de posição (X_{km}) para as chaves manobráveis contribuem para esta dificuldade, resultando em elevada natureza combinatória. Estas variáveis discretas, juntamente com variáveis contínuas, como os módulos das tensões nodais (V_k, V_m), resultam em um problema de programação inteira-mista. Além disto, o produto de variáveis tanto na função objetivo como nas restrições define a não-linearidade do problema de otimização.

A fim de resolver este problema de programação não linear inteira-mista, o presente trabalho apresenta um algoritmo heurístico para uma busca eficiente na região factível de soluções. Este algoritmo é apresentado a seguir.

3. Algoritmo heurístico do Conjunto Dinâmico de Chaves (AHCDC)

O Algoritmo Heurístico do Conjunto Dinâmico de Chaves (AHCDC), de Oliveira et al. (2014), inicia o processo de reconfiguração de uma topologia radial com o objetivo de obter outra topologia com perdas mínimas.

O AHCDC baseia-se na construção e atualização de um Conjunto Dinâmico de Chaves. Este conjunto é atualizado a cada passo do algoritmo para representar um procedimento de mudança, ou seja, o fechamento de uma chave aberta e a abertura de uma chave fechada, sendo esta adicionada ao CDC. O fechamento de uma chave resulta na formação de um laço no sistema, identificado no algoritmo pela teoria de grafo como apresentado em Ahuja et al. (1993). Para tornar o sistema novamente radial, uma chave do laço, identificada por um índice de sensibilidade, é aberta. Assim, as alterações na topologia da rede radial ocorrem gradativamente e as restrições de conectividade e radialidade são asseguradas.

Como esta abordagem garante sempre as restrições de conectividade e de radialidade, não é necessário verificar a estrutura de rede após a mudança de estado de alguma chave. Esta estratégia reduz os esforços computacionais para a convergência, alcançada quando o CDC permanecer o mesmo em duas iterações consecutivas. Além disso, a atualização do CDC diminui a possibilidade de convergência prematura para soluções locais, pois permite que uma chave pouco promissora no início do processo de reconfiguração possa ser reavaliada durante as etapas do AHCDC. O fluxograma do AHCDC é apresentado na Figura 1 e cada passo descrito na sequência.

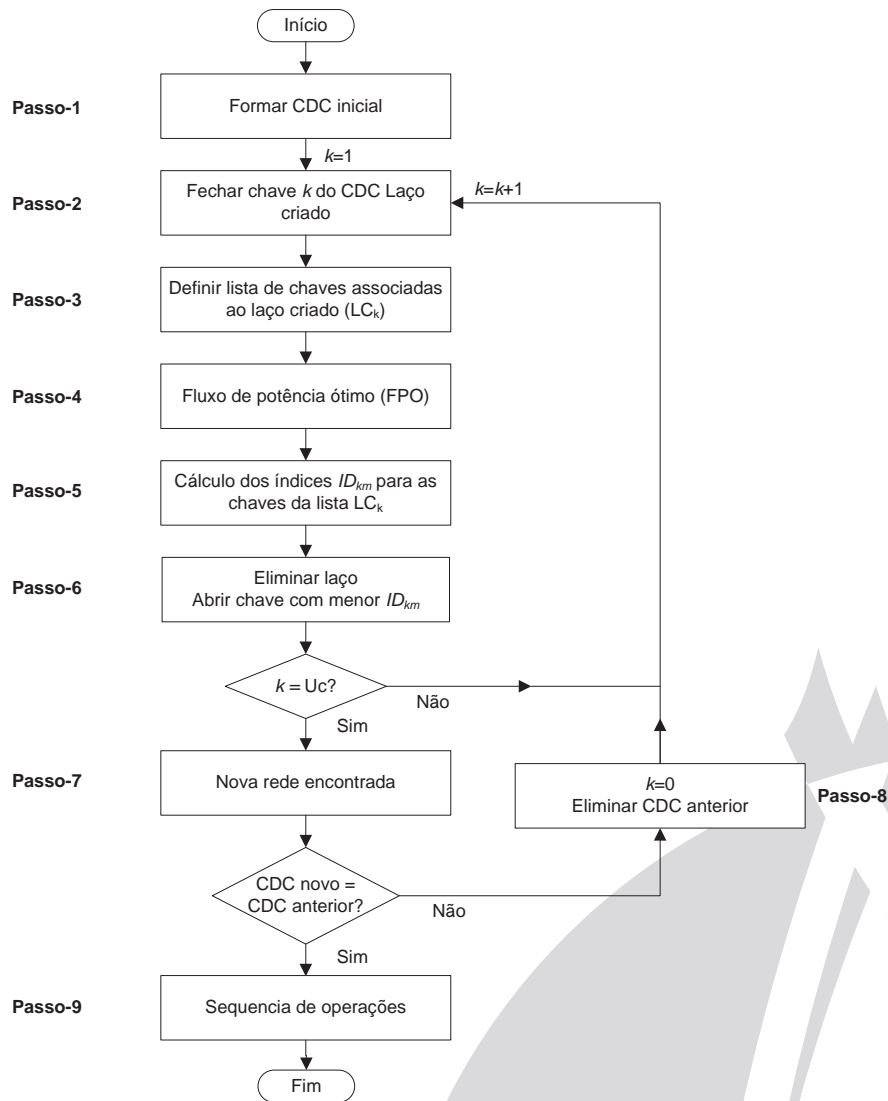


Figura 1. Fluxograma AHCDC

Passo-1: Consiste na formação do CDC inicial ($CDC_{k=0}$), composto pelas chaves NA. A ordem das chaves NA neste conjunto é definida através do somatório das cargas do laço formado pelo fechamento individual de cada chave. As chaves são inseridas no CDC inicial em ordem crescente de carga do respectivo laço. Esta ordenação foi adotada para reduzir o impacto das mudanças topológicas no início do processo de reconfiguração.

Passo-2: Fechamento da chave de ordem k ($k = 1, \dots, U_c$) do CDC, em que U_c representa o número de chaves deste conjunto.

Passo-3: Definição da lista de chaves (LC_k) pertencentes ao laço criado pelo fechamento da chave k .

Passo-4: Cálculo de fluxo de potência ótimo formulado em (1.1) a (1.6) relaxado. O relaxamento deste modelo consiste em se considerar um problema contínuo, ou seja, a restrição (1.6) é relaxada considerando-se as variáveis X_{km} no intervalo contínuo entre 0 e 1. Apenas as variáveis associadas às chaves fechadas de acordo com o CDC são representadas. Em outras palavras, as chaves abertas do CDC permanecem abertas neste modelo de FPO relaxado, enquanto que as variáveis X_{km} são calculadas no intervalo contínuo $[0, 1]$ apenas para as chaves fechadas. Neste modelo, a rede é parcialmente malhada, com a formação de apenas um laço, definido pela lista LC_k , e o objetivo é definir a melhor chave desta lista para abertura, com base

nos valores de X_{km} e dos multiplicadores de Lagrange. Para a resolução do FPO relaxado, propõe-se o método primal-dual de pontos interiores de Oliveira et al. (2015).

Passo-5: Cálculo dos índices de sensibilidade (ID_{km}) para as chaves da lista LC_k , a partir da solução do FPO considerando a rede com apenas um laço. Desta forma, as sensibilidades são calculadas para uma configuração próxima da radial e, portanto, mais próxima da condição de operação. Este aspecto melhora a sensibilidade obtida em comparação com métodos que partem da rede completamente malhada.

Passo-6: Este passo consiste em eliminar o laço formado no Passo-2. Para tanto, deve-se abrir a chave da lista LC_k com o menor ID_{km} , a fim de proporcionar o menor acréscimo nas perdas ativas do sistema devido à abertura de trecho.

Passo-7: Neste passo, está determinada uma nova rede radial, obtida através de modificações sucessivas das chaves do CDC. Se esta nova rede não diferir da rede radial definida anteriormente ao Passo-2, então o processo de reconfiguração converge. Caso contrário, este processo deve continuar através do Passo-8.

Passo-8: Reinicia-se a contagem de chaves ($k = 0$), elimina-se o CDC obtido anteriormente ao Passo-2 e define-se o novo CDC como sendo o inicial da próxima execução dos Passos-2 a 6. A partir daí, retorna-se ao Passo-2, reiniciando o AHCDC ($k = k + 1$).

Passo-9: Após o processo iterativo, o AHCDC fornece a sequência de operações de chaveamento a ser seguida desde a configuração radial inicial até atingir a configuração radial final. Esta sequência constitui-se, portanto, no procedimento a ser seguido pelo operador, e apresenta-se como uma vantagem de se manter a radialidade da rede durante o processo de reconfiguração. Esta abordagem é conhecida como otimização dinâmica, que visa não somente determinar a solução ótima para um problema, mas também fornecer os procedimentos necessários para atingir esta solução.

3. Índice de Sensibilidade

De acordo com Oliveira et al. (2009) e Oliveira et al. (2010), a chave selecionada para abertura em um sistema em malha pode ser determinada através de um índice de sensibilidade (ID_{km}), dado por:

$$ID_{km} = \left| X_{km} \cdot (\lambda p_k - \lambda p_m) \cdot \frac{S_{km}}{(V_k - V_m)} \right| \quad (2)$$

Em que S_{km} representa o fluxo de potência aparente no trecho $k-m$. O índice ID_{km} é proporcional ao valor de posição da chave X_{km} . Embora os valores de X_{km} na solução do problema de reconfiguração sejam 0 (chave aberta) ou 1 (chave fechada), no FPO relaxado do Passo-4 do algoritmo heurístico, estas variáveis assumem valores contínuos entre 0 e 1. Quanto menor o valor contínuo de X_{km} , maior é a tendência de abertura do trecho $k-m$.

O fator $(\lambda p_k - \lambda p_m)$ corresponde à diferença entre os impactos na função objetivo devido a variações das potências ativas injetadas nas barras k e m . Em outras palavras, quanto menor $(\lambda p_k - \lambda p_m)$, menor será a influência nas perdas devido à abertura do trecho $k-m$.

O índice de decisão ID_{km} também é função do fluxo de potência aparente S_{km} , pois a abertura de uma determinada chave resulta em uma redistribuição de fluxos por toda a rede de distribuição. A abertura da linha com menor S_{km} causa menos alterações na rede e, em consequência, mínimo afastamento do ponto de operação obtido com a rede em malha.

Adicionalmente, o índice ID_{km} é inversamente proporcional à diferença $(V_k - V_m)$. Isto retrata a condição de que a linha que apresenta grande valor de queda de tensão deve ser evitada para conduzir potência neste período e, portanto, terá preferência para abertura.

Através dos aspectos abordados anteriormente, conclui-se que a chave preferencial para abertura é aquela que apresenta o menor índice de sensibilidade ID_{km} , pois sua abertura resulta no menor acréscimo de perdas em relação à configuração parcialmente malhada.

4. Resultados

Os resultados da aplicação do algoritmo heurístico apresentado neste artigo são avaliados e comparados com outros métodos para um sistema de 16 barras e um sistema de 33 barras. Em ambos os casos, as tensões das barras das subestações (SE) são consideradas como 1,0 p.u. As simulações foram realizadas utilizando-se um microcomputador Intel(R) Core(TM) i7, 2,93 GHz, 8,00 GB de memória RAM, a partir de implementações em MATLAB.

4.1. Sistema 16 barras

A Figura 2 apresenta a configuração radial inicial do sistema de 16 barras, composto por 3 alimentadores, 16 trechos, 13 chaves seccionadoras, representadas por linhas contínuas, e 3 chaves de interconexão, representadas por linhas tracejadas. Os dados completos do sistema podem ser encontrados em Civanlar et al. (1988). Para a configuração inicial, as perdas são de 511,44 kW.

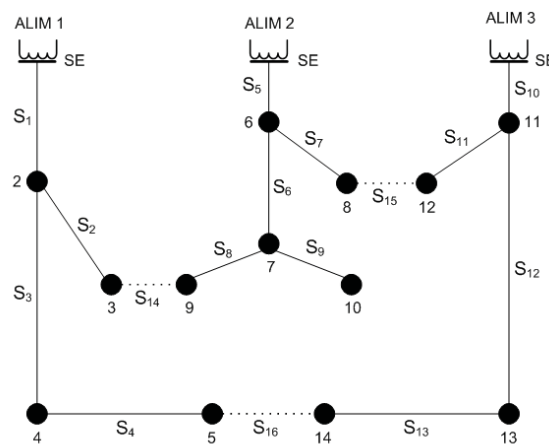


Figura 2. Sistema de 16 barras: configuração inicial.

O Passo-1 do AHCDC identifica o CDC formado pelas chaves NA S_{14} , S_{15} e S_{16} . Para ordenar estas chaves neste conjunto, calcula-se a carga de cada laço obtido com o fechamento individual das chaves NA. A Tabela 1 apresenta a composição dos laços e as respectivas cargas.

Tabela 1. Composição dos laços e cargas respectivas.

Laço	Fechar Chave	Composição do laço	Carga Ativa (kW)
L1	S_{14}	$S_{14}, S_8, S_6, S_5, S_1, S_2$	14,6
L2	S_{15}	$S_{15}, S_{11}, S_{10}, S_5, S_7$	7,0
L3	S_{16}	$S_{16}, S_{13}, S_{12}, S_{10}, S_1, S_3, S_4$	9,6

Conforme descrito na seção anterior, as chaves NA são dispostas no CDC inicial em ordem crescente das cargas calculadas nos laços respectivos. Logo, da Tabela 1, verifica-se que $CDC_{k=0} = \{S_{15}, S_{16}, S_{14}\}$.

Seguindo, o Passo-2 fecha a primeira chave do CDC, chave S_{15} , formando o laço L2. O Passo-3 identifica a lista $LC_{k=1}$ de chaves que compõem este laço, ou seja, $LC_{k=1} = L2 = \{S_{15}, S_{11}, S_{10}, S_5, S_7\}$.

A Tabela 2 apresenta os índices ID_{km} obtidos no Passo-4 para as chaves de $LC_{k=1}$. Neste caso, a chave S_7 , que apresenta o menor ID_{km} , deve ser aberta a fim de eliminar o laço L2, modificando o CDC para $CDC_{k=1} = \{S_7, S_{16}, S_{14}\}$.

 Tabela 2. Índice de Sensibilidade (ID_{km}) – laço L2.

X_{km}	S_{15}	S_{11}	S_{10}	S_5	S_7
ID_{km}	0,0293	0,0582	15,6430	16,0736	0,0152

Continuando, verifica-se que a próxima chave do $CDC_{k=1}$ é S_{16} . O fechamento desta chave no Passo-2 (agora com $k = 2$) resulta em um novo laço: L3. Logo, a lista de chaves identificada no Passo-3 passa a ser $LC_{k=2} = L3 = \{S_{16}, S_{13}, S_{12}, S_{10}, S_1, S_3, S_4\}$.

A Tabela 3 apresenta os índices obtidos no Passo-4 para esta lista. A chave S_{16} apresenta o menor ID_{km} . Logo, o CDC permanece inalterado, ou seja, $CDC_{k=2} = \{S_7, S_{16}, S_{14}\}$.

 Tabela 3. Índice de Sensibilidade (ID_{km}) – laço L3.

X_{km}	S_{16}	S_{13}	S_{12}	S_{10}	S_1	S_3	S_4
ID_{km}	0,0003	0,0602	0,0572	13,6377	16,9240	0,0574	0,0205

O fechamento da próxima chave do $CDC_{k=2}$, chave S_{14} , no Passo-2 (para $k = 3$) resulta em $LC_{k=3} = L1 = \{S_{14}, S_8, S_6, S_5, S_1, S_2\}$ no Passo-3.

A Tabela 4 apresenta os índices obtidos no Passo-4 para $LC_{k=3}$, em que S_8 tem o menor ID_{km} , devendo, portanto, ser aberta, resultando no $CDC_{k=3} = \{S_7, S_{16}, S_8\}$.

 Tabela 4. Índice de Decisão (ID_{km}) – laço L1.

X_{km}	S_{14}	S_8	S_6	S_5	S_1	S_2
ID_{km}	0,0499	0,0264	0,1758	15,5305	14,3348	0,1036

Como neste ponto, $k = U_c = 3$, o Passo-7 é executado. Neste caso, verifica-se que o CDC atual, $CDC_{k=3} = \{S_7, S_{16}, S_8\}$, difere do $CDC_{k=0} = \{S_{15}, S_{16}, S_{14}\}$. Em outras palavras, a nova rede radial definida por $CDC_{k=3}$ é diferente da rede radial inicial da Figura 2, definida por $CDC_{k=0}$. Neste caso, o AHDCDC deve ser reinicializado ($k = 0$), a partir do Passo-2.

Na segunda execução do algoritmo, o CDC inicial ($CDC_{k=0}$) passa a ser igual ao conjunto final obtido na execução anterior, ou seja, $CDC_{k=0} = \{S_7, S_{16}, S_8\}$. Para esta nova configuração radial, as perdas de potência ativa são de 466,13 kW.

Partindo desta nova solução, os passos anteriormente descritos são novamente executados, não resultando em alterações topológicas neste caso. Assim, o AHDCDC alcança a convergência, através de 6 simulações de FPO.

Vale notar que, em cada execução do AHDCDC, o Passo-4 efetua a simulação de um FPO para cada um dos 3 laços da rede. Como duas execuções do AHDCDC foram necessárias, o total FPO é igual a 6. O resultado encontrado pela metodologia proposta é igual ao obtido na literatura em Civanlar et al. (1988), Gomes et al. (2005), Chiou et al. (2005), Raju e Bijwe (2008), Oliveira et al. (2010) e Oliveira et al. (2014).

Como resultado adicional da aplicação do método proposto, tem-se a sequência de chaves que devem ser manobradas para que o sistema opere na configuração radial ótima (Passo-9). Esta sequência é obtida a partir da evolução do CDC durante o processo iterativo do AHDCDC, conforme Tabela 5.

Tabela 5. Evolução do CDC durante o processo iterativo.

Configuração radial 1	$CDC_1 = \{S_{15}, S_{16}, S_{14}\}$
Configuração radial 2	$CDC_2 = \{S_7, S_{16}, S_{14}\}$
Configuração radial 3	$CDC_3 = \{S_7, S_{16}, S_8\}$

As Figuras 3 e 4 apresentam a tensão mínima e as perdas do sistema, respectivamente, para cada CDC obtido durante o processo de reconfiguração, conforme Tabela 5. Destaca-se que para os três CDCs obtidos, as tensões mínimas ocorreram na barra 10.

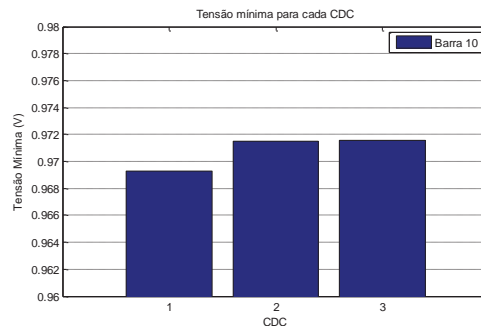


Figura 3. Tensões mínimas para cada CDC obtido, sistema 16 barras.

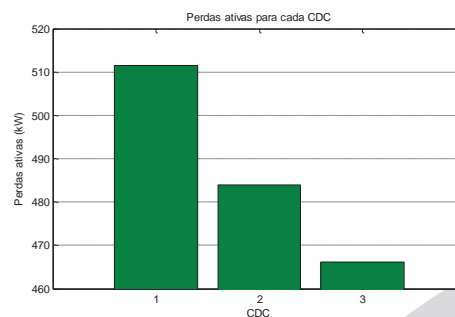


Figura 4. Perdas para cada CDC obtido, sistema 16 barras.

Observa-se da Figura 3 que, a tensão mínima do sistema está acima do limite operacional inferior (0,90 p.u.) para todas as configurações radiais obtidas. Além disto, observa-se que este valor mínimo se eleva a cada evolução do CDC. Este comportamento se deve ao fato de que as manobras indicadas pelo índice ID_{km} sempre conduzem o sistema a uma nova condição radial, com perdas inferiores à condição operativa anterior. Portanto, uma operação com menos perdas está associada a maiores níveis de tensão.

Tendo em vista que cada manobra necessária para conduzir o sistema da topologia inicial à configuração ótima resulta em melhoria das condições operativas, observando as restrições de rede, estas manobras podem ser utilizadas na definição dos procedimentos de reconfiguração. A Tabela 6 resume estes procedimentos para o caso de estudo.

Tabela 6. Procedimentos de reconfiguração, sistema de 16 barras.

1	Fechar chave S_{15} e abrir chave S_7
2	Fechar chave S_{14} e abrir chave S_8

4.2. Sistema 33 barras

O sistema de 33 barras é composto por 37 linhas, carga total de 3.715,0 kW e 2.300,0 kVar. Neste caso, o CDC inicial, cujas perdas são de 202,68 kW, é formado por 5 chaves de interconexão ($S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{36}, S_{37}$). Os dados completos do sistema podem ser encontrados em Baran e Wu (1989).

Após 10 execuções de FPO pelo AHDC, obtém-se a nova configuração da rede. A configuração ótima para o sistema de 33 barras corresponde ao seguinte conjunto de chaves abertas: CDC = $\{S_{14}, S_7, S_9, S_{37}, S_{32}\}$. Como resultado, as perdas são reduzidas para 139,55 kW,

em conformidade com a solução de Baran e Wu (1989), Raju e Bijwe (2008), Oliveira et al. (2010) e Oliveira et al. (2014).

A Tabela 7 apresenta os conjuntos dinâmicos de chaves obtidos durante a reconfiguração do sistema de 33 barras. As Figuras 5 e 6 apresentam as tensões mínimas e as perdas para cada CDC da Tabela 7.

Tabela 7. CDCs para o sistema de 33 barras.

CDC ₁	S ₃₄ , S ₃₃ , S ₃₅ , S ₃₇ , S ₃₆
CDC ₂	S ₁₄ , S ₃₄ , S ₃₅ , S ₃₆ , S ₃₇
CDC ₃	S ₁₄ , S ₇ , S ₃₅ , S ₃₆ , S ₃₇
CDC ₄	S ₁₄ , S ₇ , S ₉ , S ₃₆ , S ₃₇
CDC ₅	S ₁₄ , S ₇ , S ₉ , S ₃₇ , S ₃₂

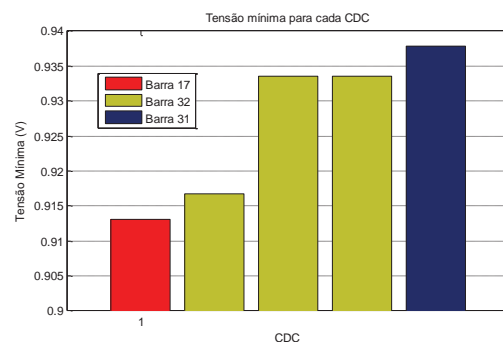


Figura 5. Tensões mínimas para cada CDC obtido, sistema 33 barras.

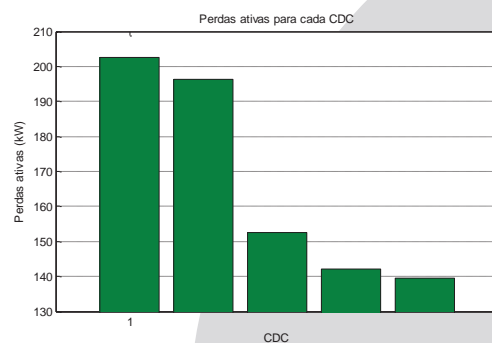


Figura 6. Perdas para cada CDC obtido, sistema 33 barras.

A Figura 5 mostra que a tensão mínima está acima do limite de 0,9 p.u. para todos os CDCs obtidos, sendo elevada à medida que estes conjuntos evoluem. Além disto, com a evolução do CDC, as perdas se reduzem, conforme Figura 6. Estes resultados confirmam o potencial de utilização da sequência de manobras obtida pelo AHDCDC para definição dos procedimentos de reconfiguração, conforme Tabela 8.

Tabela 8. Procedimentos de reconfiguração, sistema de 33 barras.

1	Fechar chave S ₃₄ e abrir chave S ₁₄
2	Fechar chave S ₃₃ e abrir chave S ₇
3	Fechar chave S ₃₅ e abrir chave S ₉
4	Fechar chave S ₃₆ e abrir chave S ₃₂

5. Conclusões

Este artigo apresentou um algoritmo heurístico construtivo para a otimização de sistemas de distribuição de energia, através de reconfiguração da rede elétrica, combinado com um modelo de fluxo de potência ótimo e análise de índice de sensibilidade. O algoritmo heurístico tem como base um conjunto dinâmico de chaves. O índice de sensibilidade para cada chave é determinado utilizando-se parâmetros operativos e multiplicadores de Lagrange, obtidos do modelo de fluxo de potência ótimo. A evolução, passo a passo, da topologia radial do sistema durante o processo iterativo reduz a possibilidade de convergência prematura em ótimos locais. Destaca-se que a combinação do algoritmo heurístico utilizado com o índice de sensibilidade da literatura é inédita. Os resultados obtidos foram comparados com outros métodos da literatura e apresentaram eficácia compatível. Adicionalmente, a metodologia de otimização apresentada determina a seqüência de manobras a serem realizadas, desde a configuração inicial até a topologia final, informação que pode ser usada para os procedimentos de operação. Em cada passo do algoritmo ocorre aumento nos níveis de tensão do sistema e redução das perdas técnicas, o que é desejável nestes procedimentos.

Referências

- Abdelaziz, A. Y., Mohaned, F. M., Mekhamer, S. F. e Badr, M. A. L.** (2010), Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm, *Electric Power Systems Research*, 80, n. 8, 943–953.
- Ahuja, R. K., Magnati, T. L. e Orlin, J.B.** *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*, Prentice-Hall, 1993.
- Baran, M. E. e Wu, F. F.** (1989), Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing, *IEEE Trans. Power Delivery*, 4, n. 2, 1401-1407.
- Barbosa, C. H. N. R., Alexandre, R. F. e Vasconcelos, J. A.** (2013), A practical codification and its analysis for the generalized reconfiguration problem, *Electric Power Systems Research*, 97, 19–33.
- Carpaneto, E., e Chicco, G.** (2008), Distribution system minimum loss reconfiguration in the hyper-cube ant colony optimization framework, *Electric Power Systems Research*, 78, 2037–2045.
- Carreno, E. M., Romero, R. e Feltrin, A., P.** (2008), An Efficient Codification to Solve Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Problem, *Trans. Power Systems*, 23, n. 4, 1542-1551.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H. e Lee, S. S. H.** (1988), Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Trans. Power Delivery*, 3, n. 3, 1217-1223.
- Chiou, J. P., Chung, C. F. e Su, C. T.** (2005), Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems, *IEEE Trans. Power Systems*, 20, n. 2, 668-674.
- D, Das.** (2006), Reconfiguration of distribution system using fuzzy multi-objective approach, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 28, 331–338.
- Gomes, F. V., Carneiro, S., Pereira, J. L. R., Vinagre, M. P., Garcia, P. A. N., Oliveira, E. J. e Araújo, L. R.** (2005), A new distribution system reconfiguration approach using optimal power flow technique and sensitivity analysis for loss reduction, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 1, n. 1, 1-5.
- Guan, W., Tan, Y., Zhang, H. e Song, J.** (2015), Distribution system feeder reconfiguration considering different model of DG sources, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 68, 210–221.

- Kalantar, M., Dashti, R. e Dashti R.** (2006), Combination of network reconfiguration and capacitor placement for loss reduction in distribution system with based genetic algorithm, *Proc. 41st International Universities Power Engineering Conf.*, Newcastle upon Tyne, UK, I, 308–312.
- Kashem, M. A., Jasmon, G. B. e Ganapathy, V.** (2000), A new approach of distribution system reconfiguration for loss minimization, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 22, 269–276.
- Mena, A. J. G. e Garcia, J. A. M.** (2012), An efficient heuristic algorithm for reconfiguration based on branch power flows direction, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 41, 71–75.
- Merlin, A. e Back, G.** (1975), Search for minimum-loss operational spanning tree configuration for urban power distribution system, *Proc. 5th Power System Conf.*, Cambridge, pp. 1–18.
- Naveen, S., Kumar, K. S., Rajalakshmi, K.** (2015), Distribution system reconfiguration for loss minimization using modified bacterial foraging optimization algorithm, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69, 90-97.
- Oliveira, L. W., Carneiro Junior, S., Oliveira, E. J., Pereira, J. L. R., Silva Junior, I. C. e Costa, J. S.** (2009). Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia, *Revista da Sociedade Brasileira de Automática*, 20, 226-238.
- Oliveira, L. W., Oliveira, E. J., Carneiro Jr., S., Pereira, J. L. R., Costa, J. S. e Silva Jr., I. C.** (2010), Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for Energy Losses minimization, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32, 840-848.
- Oliveira, E. J., Rosseti, G. J. S., Oliveira, L. W., Gomes F.V. e Peres, W.** (2014), New algorithm for reconfiguration and operating procedures in electric distribution systems, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 57, 129-134.
- Oliveira, E. J., Oliveira, L. W., Pereira, J. L. R., Honório, L. M., Silva, I. C. e Marcato, A. L. M.** (2015), An optimal power flow based on safety barrier interior point method, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 977-985.
- Pfitscher, L. L., Bernardon, D. P., Canha, L. N., Montagner, V. F., Garcia, V. J. e Abaide, A. R.** (2013), Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 97, 84-92.
- Raju, G. K. V. e Bijwe, P. R.** (2008), An efficient algorithm for loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics. *IEEE Trans. Power Systems*, 23, n. 3, 1280-1287.
- Salazar, H., Gallego, R. e Romero, R.** (2006), Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems, *IEEE Transactions. Power Delivery*, 21, 1735-1742.
- Shirmohammadi D. e Hong, H. W.** (1989), Reconfiguration of electric distribution for resistive line loss reduction, *IEEE Transactions Power Delivery*, 4, 1492–1498.
- Singh, S. P., Raju, G. S., Rao, G. K. e Afsari M.** (2009), A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31, 309–314.
- Torres, J., Guardado, J. L., Rivas-Dávalos, F., Maximov, S. e Melgoza E.** (2013), A genetic algorithm based on the edge window decoder technique to optimize power distribution systems reconfiguration, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 45, 28–34.
- Zhu, J. Z.** (2002), Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm, *Electric Power Systems Research*, 62, 37–42.