



**XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica  
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro  
Rio de Janeiro - RJ - Brasil**

<b>Gustavo José Santiago Rosseti</b>	<b>Ivo Chaves da Silva Junior</b>
<b>Universidade Federal de Juiz de Fora</b>	<b>Universidade Federal de Juiz de Fora</b>
<b>gustavo.rosseti@engenharia.ufjf.br</b>	<b>ivo.junior@ufjf.edu.br</b>

<b>Leonardo Willer de Oliveira</b>	<b>Edimar Jose de Oliveira</b>
<b>Universidade Federal de Juiz de Fora</b>	<b>Universidade Federal de Juiz de Fora</b>
<b>leonardowiller@yahoo.com.br</b>	<b>edimar.oliveira@ufjf.edu.br</b>

**Algoritmo para reconfiguração e procedimentos de operação de sistemas de distribuição de energia elétrica**

**Palavras-chave**

Conjunto Dinâmico de Chaves  
Minimização de Perdas  
Reconfiguração de Redes de Distribuição  
Sequência de Chaveamento

**Resumo**

Este artigo apresenta um algoritmo heurístico passo a passo para a reconfiguração de sistemas elétricos radiais de distribuição, com o objetivo de minimização das perdas de potência ativa. A metodologia proposta baseia-se em um Conjunto Dinâmico de Chaves (CDC), que é atualizado de acordo com as mudanças de topologias do sistema evitando que soluções de mínimo local encerrem precocemente o algoritmo de busca. Além disso, o algoritmo proposto determina a sequência de manobras das chaves do sistema durante o processo de reconfiguração, a fim de viabilizar a operação nos estágios intermediários deste processo. Para determinação do estado da rede em cada estágio, o fluxo de potência convencional é utilizado.

## **1. Introdução**

Os sistemas de distribuição de energia (SDE) envolvem redes elétricas configuradas tradicionalmente de forma radial, pois este tipo de topologia apresenta vantagens operativas [1]. Para aumentar sua confiabilidade, estes sistemas são providos de chaves manobráveis acopladas a determinados trechos dos alimentadores. No entanto, a característica radial, juntamente com outros fatores, elevam as perdas técnicas na rede, reduzindo a eficiência do serviço de distribuição.

Uma alternativa para reduzir tais perdas consiste na transferência de cargas entre alimentadores com diferentes níveis de carregamento, através da reconfiguração da rede elétrica [2]. Esta opção redefine os estados (aberto ou fechado) das chaves manobráveis, compostas de seccionadoras, normalmente fechadas (NF), e chaves de interconexão, normalmente abertas (NA).

Para uma operação viável do sistema, é importante observar restrições como limites de tensão, radialidade e conectividade da rede, tanto durante quanto após as operações de manobra das chaves.

A determinação de configurações associadas a perdas mínimas conduz a um problema de programação não linear inteira mista de natureza combinatória. Considerando-se as dimensões dos SDE de médio e grande porte, a busca por configurações ótimas é bastante complexa, devido ao número elevado de alternativas. Além disto, as restrições topológicas de rede, relativas à radialidade e à conectividade, tornam mais complexo o problema de reconfiguração.

Diversas metodologias de reconfiguração de redes de distribuição podem ser encontradas na literatura. Uma classe de métodos heurísticos baseia-se na utilização de algoritmos iterativos que partem de uma configuração malhada do sistema. Daí, estes algoritmos efetuam a abertura sequencial de chaves, com informações de índices, até a obtenção de uma configuração radial com perdas mínimas [4]-[9].

Outra classe de métodos heurísticos também utiliza algoritmos iterativos, porém partindo de uma topologia radial [10]-[14]. A transição desta topologia para a configuração ótima é realizada através de manobras de chaves, guiadas por índices de sensibilidade.

O presente trabalho propõe um algoritmo heurístico passo a passo para a reconfiguração de SDE, que determina a topologia associada à perdas mínimas a partir de uma configuração radial base de operação. Para tanto, um índice de sensibilidade, calculado através de variável do sistema obtida de um fluxo de carga convencional, é proposto. Em cada passo, uma nova solução radial é obtida no sentido de redução das perdas do sistema. Este algoritmo apresenta como vantagem a resolução do problema com um número reduzido de simulações, sem perda de qualidade da solução. Adicionalmente, as decisões tomadas durante o processo iterativo fornecem a sequência de manobras a ser realizada desde a rede base até a rede radial final. Esta sequência pode, portanto, ser incorporada aos procedimentos seguidos pelos operadores da rede. A metodologia proposta é testada em sistemas conhecidos na literatura.

## **2. Desenvolvimento**

### **2.1. Formulação do Problema de Reconfiguração**

O problema de minimização de perdas em sistemas de distribuição através de reconfiguração da rede elétrica pode ser formulado como [9]:

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

Sujeito a:

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

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

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

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

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

Em que:

- FOB* Representa a função objetivo;
- NC* Representa o número de trechos do sistema;
- Pg<sub>k</sub>* Representa a potência ativa gerada na barra *k*;
- Pl<sub>k</sub>* Representa a carga ativa conectada à barra *k*;
- P<sub>km</sub>* Representa o fluxo de potência ativa no trecho *k-m*;
- Chave<sub>km</sub>* Representa a variável binária referente à posição da chave no trecho *k-m*. Se igual a 1, representa chave fechada, enquanto que zero representa chave aberta;
- Ω<sub>k</sub>* Representa o conjunto de barras conectadas à barra *k*;
- Qg<sub>k</sub>* Representa a potência reativa gerada na barra *k*;
- Ql<sub>k</sub>* Representa a carga reativa conectada à barra *k*;
- Q<sub>km</sub>* Representa o fluxo de potência reativa no trecho *k-m*;
- g<sub>km</sub>* Representa a condutância do trecho *k-m*;
- V<sub>k</sub>, V<sub>m</sub>* Representam os módulos de tensão das barras *k* e *m*, respectivamente;
- θ<sub>km</sub>* Representa a defasagem angular entre as barras *k* e *m*;
- L<sub>km</sub>* Representa a perda de potência ativa no trecho *k-m*;
- $\bar{Z}$  Representa o conjunto de variáveis do problema que têm limites físicos e/ou operacionais;
- $\bar{Z}^{\min}, \bar{Z}^{\max}$  Representa os limites inferior e superior das variáveis do conjunto  $\bar{Z}$ , respectivamente.

A função objetivo do problema de reconfiguração, formulada na equação (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 (*Chave<sub>km</sub>*). Este valor é igual a zero para chave aberta, e igual a 1 para chave fechada. Logo, se *Chave<sub>km</sub>* 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 tensão nodal, são observados através da restrição (1.5). Por fim, a restrição (1.6) expressa 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 (*Chave<sub>km</sub>*) para as chaves manobráveis contribuem para esta dificuldade, resultando em elevada natureza combinatoria. A fim de viabilizar a resolução deste problema, o presente trabalho propõe um algoritmo heurístico para uma busca eficiente na região factível de soluções. Este algoritmo é apresentado a seguir.

## 2.2. Algoritmo Heurístico do Conjunto Dinâmico de Chaves (AHCDC)

O algoritmo heurístico proposto (AHCDC) considera como solução inicial do problema de reconfiguração a topologia radial base do sistema. A partir desta solução, a estratégia utilizada consiste no fechamento seqüencial de cada chave NA, com a respectiva abertura de outra chave.

O fechamento de uma chave de manobra NA implica na formação de um laço na rede elétrica de distribuição. Daí, para atender à restrição de radialidade do problema, outro trecho deste laço deve ser aberto, através da manobra de uma chave NF. A chave selecionada para abertura é determinada através do índice de sensibilidade ou de decisão proposto ( $ID_{CH}$ ) dado por:

$$ID_{CH_{km}} = I_{km} \quad (2)$$

Em que:

$ID_{CH_{km}}$  Representa o índice de decisão para a chave no circuito  $k-m$ ;

$I_{km}$  Representa a corrente no circuito  $k-m$ .

A justificativa para o índice  $ID_{CH}$  é dada pelo impacto que a abertura de um trecho causa nas perdas do sistema. Esta abertura implica em aumento das perdas, em contrapartida ao objetivo do problema. Portanto, busca-se determinar a chave cuja abertura causa o menor impacto. Este impacto se deve à redistribuição do fluxo de corrente que passa na chave entre os demais trechos da rede. Logo, quanto menor é a corrente no trecho ( $I_{km}$ ), menor é o impacto. Daí, as chaves que apresentam os menores índices  $ID_{CH}$  devem ser prioritárias para abertura.

A aplicação do índice  $ID_{CH}$  conduz o sistema a uma nova configuração radial, de menor perda, após cada operação conjunta de fechamento e abertura de chaves. A nova topologia radial obtida é associada a um novo conjunto de chaves abertas. A partir desta nova configuração, o processo de fechamento e abertura de trechos é reinicializado, sendo o conjunto de chaves NA atualizado. Este conjunto foi denominado Conjunto Dinâmico de Chaves (CDC). A Figura 1 apresenta o fluxograma do algoritmo proposto AHCDC e seus passos são descritos a seguir.

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 trocas de ligações 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 não linear convencional, baseado no método completo de *Newton Raphson* [15].

Passo-5: Cálculo dos índices de sensibilidade ( $ID_{CH}$ ) para as chaves da lista  $LC_k$ , a partir da solução do fluxo de potência considerando a rede parcialmente malhada, ou seja, 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.

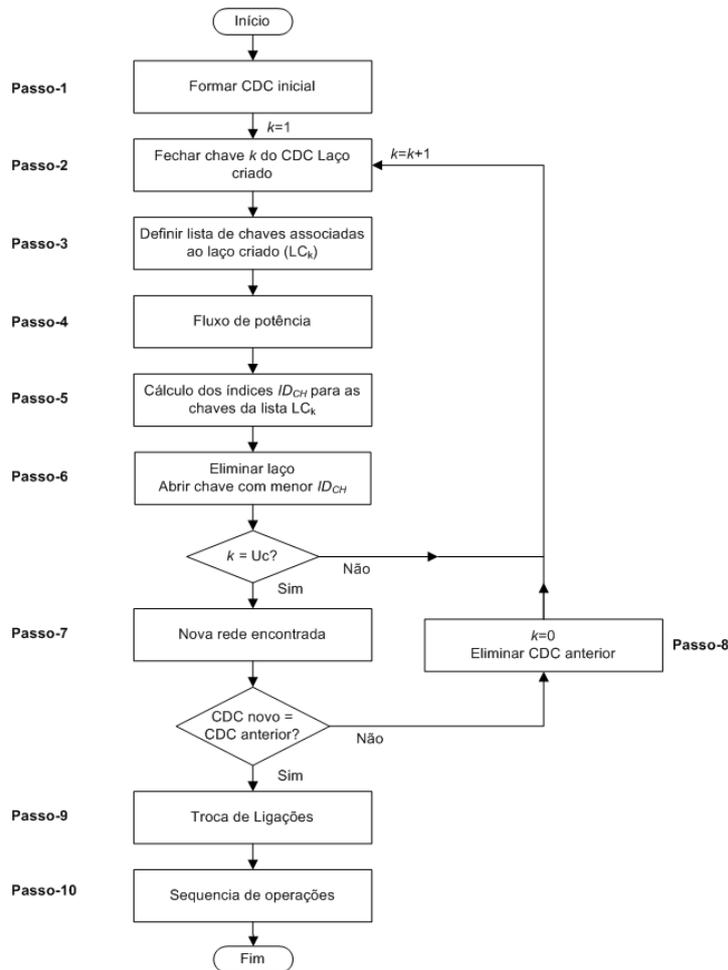


Figura 1. Fluxograma do AH CDC

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  $ID_{CH}$ , 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 difere 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 AH CDC ( $k = k + 1$ ).

Passo-9: Este passo avalia a possibilidade de troca de ligações entre cada chave  $k$  do CDC determinado nos passos anteriores, e a segunda melhor chave pertencente ao mesmo laço de  $k$ , conforme índice  $ID_{CH}$ . Este processo é denominado troca de ligações de primeiro grau e tem como objetivo avaliar a possibilidade de melhoria da solução encontrada. Destaca-se que esta troca é avaliada somente quando a segunda melhor chave de cada laço possuir  $ID_{CH}$  no máximo 3 vezes maior que o  $ID_{CH}$  da melhor chave.

Se a condição anterior de comparação entre os dois melhores  $ID_{CH}$  for verdadeira, realiza-se uma troca de ligações de segundo grau a fim de melhorar o refinamento da solução. Neste caso, deve-se trocar cada chave do CDC pela terceira melhor chave do mesmo laço, de acordo com o índice  $ID_{CH}$ . Esta troca de ligações de segundo grau é avaliada somente quando a terceira chave de um laço possuir  $ID_{CH}$  no máximo 5 vezes maior que o  $ID_{CH}$  da respectiva chave do CDC. Estes procedimentos resultaram em uma busca mais

apurada pelo espaço de soluções para todos os sistemas testados.

Passo-10: Após o processo iterativo, o AHCDC fornece a sequência de operações de chaveamento a ser seguida para partir da configuração radial inicial e atingir a configuração radial final. Este processo será detalhado na seção subsequente.

Destaca-se que o ponto crucial do AHCDC proposto consiste na formação e atualização do CDC. Pode-se observar que à medida que o processo evolui, ocorrem sucessivas trocas de chaves. Este aspecto é de extrema importância porque permite que uma chave não selecionada no início do processo possa ser selecionada em outra condição, obtida pela mudança topológica da rede. Desta forma, evita-se que o algoritmo estabilize prematuramente em soluções subótimas. No entanto, há de se reconhecer que o AHCDC, assim como qualquer método baseado em heurística, não garante a solução ótima global.

Adicionalmente, o processo de atualização do CDC conduz à sequência ótima de chaveamentos a ser realizada desde a rede radial inicial até a rede 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.

### 2.3. Resultados

Os resultados da aplicação do algoritmo proposto (AHCDC) são avaliados e comparados com outros métodos para um sistema de 16 barras, um de 33 barras e para outro sistema de 94 barras.

#### 1) Sistema 16 Barras

A Figura 2 apresenta a configuração radial inicial do sistema de 16 barras [10], composto por 3 alimentadores, 16 trechos, 13 chaves seccionadoras, representadas por linhas contínuas, e 3 chaves de interconexão, representadas por linhas tracejadas. Os dados nominais deste sistema são 23 kV e 100 MVA. Para a configuração inicial, as perdas são de 511,44 kW. 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.

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

Tabela 1. Composição dos laços e cargas respectivas.

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

Tabela 2. Índice de Decisão ( $ID_{CH}$ ) – laço L2.

CH	$S_{15}$	$S_{11}$	$S_{10}$	$S_5$	$S_7$
$ID_{CH}$	0,028	0,034	0,077	0,132	0,014

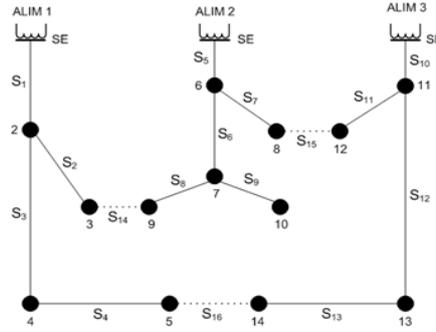


Figura 2. Sistema de 16 barras: configuração inicial.

Continuando, verifica-se que a próxima chave do  $CDC_{k=1}$  é **S16**. 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  $LC_{k=2} = L3 = \{S16, S13, S12, S10, S1, S3, S4\}$ . A Tabela 3 apresenta os índices obtidos no Passo-4 para esta lista. A chave **S16** apresenta o menor  $ID_{CH}$ . Logo, o CDC permanece inalterado, ou seja,  $CDC_{k=2} = \{S7, S16, S14\}$ .

Tabela 3. Índice de Decisão ( $ID_{CH}$ ) – laço L3.

CH	S16	S13	S12	S1	S3	S4
$ID_{CH}$	0,005	0,026	0,036	0,085	0,031	0,014

O fechamento da próxima chave do  $CDC_{k=2}$ , chave **S14**, no Passo-2 (para  $k = 3$ ) resulta em  $LC_{k=3} = L1 = \{S14, S8, S6, S5, S1, S2\}$  no Passo-3. A Tabela 4 apresenta os índices obtidos no Passo-4 para  $LC_{k=3}$ , em que **S8** tem o menor  $ID_{CH}$ , devendo, portanto, ser aberta, resultando no  $CDC_{k=3} = \{S7, S16, S8\}$ .

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

CH	S14	S8	S6	S5	S1	S2
$ID_{CH}$	0,029	0,023	0,075	0,118	0,119	0,059

Como neste ponto,  $k = U_c = 3$ , o Passo-7 é executado. Neste caso, verifica-se que o CDC atual,  $CDC_{k=3} = \{S7, S16, S8\}$ , difere do  $CDC_{k=0} = \{S15, S16, S14\}$ . 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 AHCDC deve ser reinicializado ( $k = 0$ ), a partir do Passo-2.

Na segunda execução do algoritmo, o CDC inicial ( $CDC_{k=0}$ ) passa a ser o conjunto final da execução anterior, ou seja,  $CDC_{k=0} = \{S7, S16, S8\}$ . 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 algoritmo segue para o Passo-9, referente a troca de ligações, e verifica que não há melhoras na solução, comprovando a eficácia do índice proposto.

Portanto, o AHCDC alcança a convergência, através de 12 simulações de fluxo de carga, descritas a seguir:

- 6 fluxos no Passo-4. Vale notar que, em cada execução do AHCDC, o Passo-4 efetua cálculo de fluxo de potência para cada um dos 3 laços da rede. Como duas execuções do AHCDC foram necessárias, o total de fluxos de potência neste passo foi igual a 6;
- 6 fluxos no Passo-9, pois cada chave do CDC foi avaliada para troca com duas chaves, de primeiro e segundo grau do respectivo laço, de acordo com o índice  $ID_{CH}$  conforme descrito anteriormente. O resultado encontrado pela metodologia proposta é igual ao obtido na literatura [1], [7], [16] e [17].

Como resultado adicional, tem-se a sequência de chaves que devem ser manobradas para que o sistema opere na configuração radial ótima (Passo-10). Esta sequência é obtida a partir da evolução do CDC durante o processo iterativo do AHCDC, 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	$CDC_3 = \{S_7, S_{16}, S_8\}$

Destaca-se que para os três CDCs obtidos, a tensão mínima ocorreu na barra 10, tendo seu valor elevado do primeiro CDC (0,9693 pu) para o segundo (0,9715 pu), e do segundo para o terceiro CDC (0,9716 pu), estando, portanto, acima do limite operacional inferior (0,90 pu) em todas as topologias intermediárias. As perdas, por sua vez, apresentaram redução à medida que o CDC evoluiu, conforme Figura 3. Este comportamento se deve ao fato de que as manobras indicadas pelo índice  $ID_{CH}$  sempre conduzem o sistema a uma nova topologia radial com perdas inferiores à topologia anterior e melhores níveis de tensão.

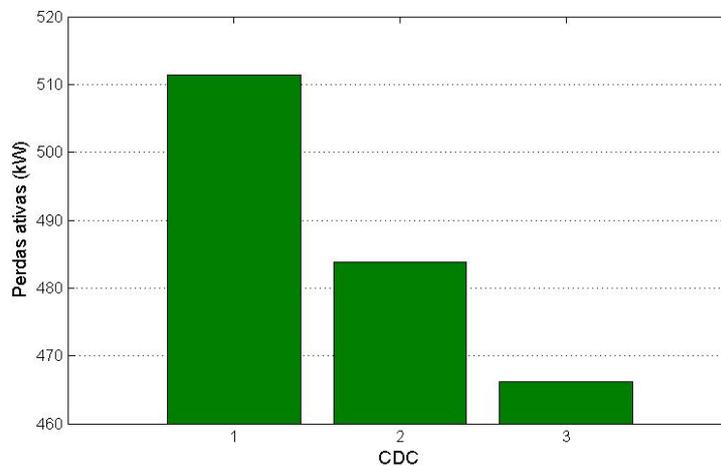


Figura 3. Perdas para cada CDC obtido, sistema 14 barras.

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 $S_8$

## 2) Sistema 33 Barras

Este sistema de 33 barras [18] é composto por 37 linhas, carga total de 3.715,0 kW e 2.300,0 kVAr. Neste caso, o CDC inicial é formado por 5 chaves de interconexão ( $S_{33}, S_{34}, S_{35}, S_{36}, S_{37}$ ), cujas perdas são de 202,68 kW.

Após vinte fluxos de potência do AHCDC, sendo dez no Passo-4 e dez no Passo-9, obtém-se a nova configuração da rede. O número de execuções de fluxo de carga em cada passo, neste caso, pode ser determinado de forma análoga à descrita para o sistema de 14 barras.

A configuração ótima para o sistema de 33 barras corresponde ao seguinte conjunto de chaves abertas: CDC = {S<sub>14</sub>, S<sub>7</sub>, S<sub>9</sub>, S<sub>37</sub>, S<sub>32</sub>}. Como resultado, as perdas são reduzidas para 139,55 kW, em conformidade com a solução de [18]. Destaca-se que a execução do Passo-9, referente a troca de ligações, não alterou a solução encontrada nos passos anteriores. A Tabela 7 apresenta os conjuntos dinâmicos de chaves obtidos durante a reconfiguração do sistema de 33 barras. As Figuras 4 e 5 apresentam as tensões mínimas e as perdas para cada CDC da Tabela 7.

Tabela 7. CDCs para o sistema de 33 barras.

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

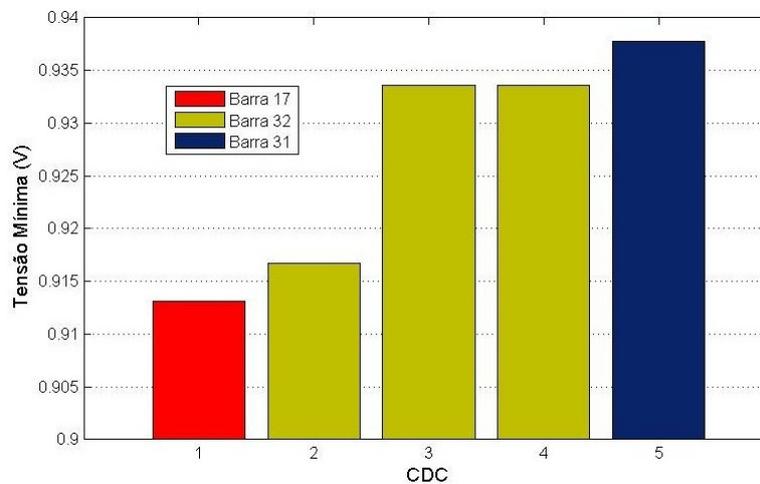


Figura 4. Tensões mínimas para cada CDC obtido, sistema 33 barras.

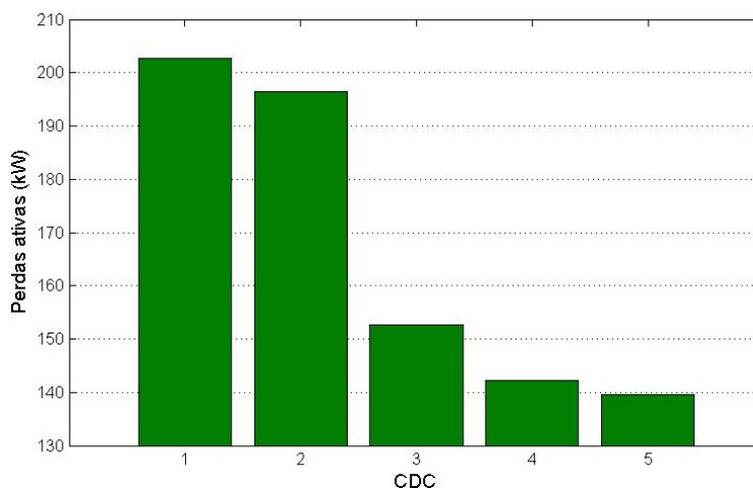


Figura 5. Perdas para cada CDC obtido, sistema 33 barras.

A Figura 4 mostra que a tensão mínima está acima do limite de 0,9 pu 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 5. Estes resultados confirmam o potencial de utilização da sequência de manobras obtida pelo AHCDC para definição dos procedimentos de reconfiguração, conforme Tabela 8.

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

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

### 3) Sistema de Distribuição de 94 Barras

Este sistema [17] é composto de 11 alimentadores de 11,4 kW, 2 subestações e 96 circuitos que incluem 13 chaves de interconexão (S<sub>84</sub> – S<sub>96</sub>), carga total de 28.350,0 kW e 20.700,0 kVAr. Para esta configuração inicial, as perdas são de 531,99 kW.

Após trinta e nove fluxos de potência do AHCDC, sendo vinte e seis no Passo-4 e treze no Passo-9, obtém-se a nova configuração da rede. Como resultado, as perdas são reduzidas para 469,88 kW, em conformidade com a solução de [16]-[17]. A Tabela 9 apresenta os resultados antes e após a execução do Passo-9, referente a troca de ligações:

Tabela 9. Resultados do AHCDC, sistema 94 barras.

AHCDC	Chaves Abertas	Perdas (kW)
Sem troca de Ligações	S <sub>7</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>63</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>82</sub> , S <sub>86</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>92</sub>	470,89
Com troca de Ligações	S <sub>7</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>62</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>83</sub> , S <sub>86</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>92</sub>	469,88

Verifica-se que as trocas de ligações efetivadas substituem as chaves S<sub>63</sub>, S<sub>82</sub>, e S<sub>88</sub> pelas chaves S<sub>62</sub>, S<sub>83</sub> e S<sub>13</sub> respectivamente. Estas trocas reduziram em apenas 1,02 kW (0,22%) as perdas de potência, reforçando a eficácia do índice proposto para reconfiguração no AHCDC. A Tabela 10 apresenta as perdas e a tensão mínima para cada CDC obtido durante o processo de reconfiguração via AHCDC.

Tabela 10. Perdas ativas e tensão mínima para cada CDC

CDC	Perdas (kW)	Tensão Mínima (V)
S <sub>86</sub> , S <sub>95</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>85</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>96</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>84</sub> , S <sub>87</sub> , S <sub>94</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>93</sub> , S <sub>91</sub>	531,99	0,9285 (9)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>85</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>96</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>84</sub> , S <sub>87</sub> , S <sub>94</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>93</sub> , S <sub>91</sub>	531,95	0,9285 (9)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>96</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>84</sub> , S <sub>87</sub> , S <sub>94</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>93</sub> , S <sub>91</sub>	512,35	0,9384 (64)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>63</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>84</sub> , S <sub>87</sub> , S <sub>94</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>93</sub> , S <sub>91</sub>	499,45	0,9479 (83)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>63</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>87</sub> , S <sub>94</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>93</sub> , S <sub>91</sub>	499,42	0,9479 (83)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>63</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>94</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>93</sub> , S <sub>91</sub>	495,46	0,9479 (83)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>63</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>93</sub> , S <sub>91</sub>	473,04	0,9479 (83)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>63</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>91</sub>	472,81	0,9479 (83)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>63</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>82</sub>	470,89	0,9517 (9)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>62</sub> , S <sub>88</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>82</sub>	470,72	0,9532 (71)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>62</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>82</sub>	470,41	0,9532 (71)
S <sub>86</sub> , S <sub>42</sub> , S <sub>90</sub> , S <sub>7</sub> , S <sub>89</sub> , S <sub>62</sub> , S <sub>13</sub> , S <sub>55</sub> , S <sub>72</sub> , S <sub>34</sub> , S <sub>92</sub> , S <sub>39</sub> , S <sub>83</sub>	469,88	0,9532 (71)

Da Tabela 10, observa-se que a tensão mínima encontra-se acima do limite de 0,9 pu estabelecido, em todas as configurações radiais obtidas. Tal como observado nos sistemas anteriores, o valor mínimo de tensão aumenta e as perdas se reduzem à medida que o CDC evolui. A Tabela 11 apresenta os procedimentos de reconfiguração para o sistema de 94 barras.

Tabela 11. Procedimentos de reconfiguração, sistema de 94 barras.

1	Fechar chave S <sub>95</sub> e abrir chave S <sub>42</sub>
2	Fechar chave S <sub>85</sub> e abrir chave S <sub>7</sub>
3	Fechar chave S <sub>96</sub> e abrir chave S <sub>63</sub>
4	Fechar chave S <sub>84</sub> e abrir chave S <sub>55</sub>
5	Fechar chave S <sub>87</sub> e abrir chave S <sub>72</sub>
6	Fechar chave S <sub>94</sub> e abrir chave S <sub>34</sub>
7	Fechar chave S <sub>93</sub> e abrir chave S <sub>39</sub>
8	Fechar chave S <sub>91</sub> e abrir chave S <sub>82</sub>
9	Fechar chave S <sub>63</sub> e abrir chave S <sub>62</sub>
10	Fechar chave S <sub>88</sub> e abrir chave S <sub>13</sub>
11	Fechar chave S <sub>82</sub> e abrir chave S <sub>83</sub>

### 3. Conclusões

Este trabalho apresentou um algoritmo heurístico para reconfiguração ótima de sistemas de distribuição, baseado em um conjunto dinâmico de chaves. A dinâmica proposta para este conjunto visa evitar que o processo de otimização termine de forma prematura em uma solução sub-ótima. A boa qualidade das soluções obtidas foi verificada através de estudos comparativos com outros métodos da literatura. Como contribuição adicional, o método proposto permite determinar a sequência de manobras de chaves para a alteração topológica do sistema. Esta sequência melhora o desempenho do sistema a cada passo, através do aumento dos níveis de tensão e da redução das perdas, observando as demais restrições operativas. Pode, então, ser utilizada para definição dos procedimentos de reconfiguração. Trata-se, portanto, de uma metodologia de otimização dinâmica que determina, além da solução ótima, o processo para a obtenção desta solução, sendo de grande utilidade para os operadores dos sistemas.

Os autores gostariam de agradecer ao apoio da CAPES, CNPq, FAPEMIG e ao INERGE pelo amparo à realização da pesquisa.

### 4. Referências bibliográficas

- [1] Mantovani, J. R. S.; Casari, F. and Romero, R. A. (2000). Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *SBA Controle e Automação*, Vol. XI, No. 3, pp. 150-159.
- [2] Kalantar, M.; Dashti, R. and 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, Vol. I, pp. 308–312.
- [3] Sarfi, R. J.; Salama, M. M. A. and Chikhani, A. Y. (1994). A survey of the state of the art in distribution system reconfiguration for system loss reduction. *Electric Power Systems Res.*, Vol. XXXI, No. 1, pp. 61–70.
- [4] Merlin, A. and 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.
- [5] Hossinzadeh, F.; Alinejad, B.; Pakfa, K. A new technique in distribution network reconfiguration for loss reduction and optimum operation. *20th International Conference on Electricity Distribution, CIRED*, jun 2009.
- [6] Gomes, F. V.; Carneiro, S.; Pereira, J. L. R.; Vinagre, M. P. and Garcia, P. A. N. (2005a). A new heuristic reconfiguration algorithm for large distribution systems. *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. XX,

- [7] Gomes, F. V.; Carneiro, S.; Pereira, J. L. R.; Vinagre, M. P.; Garcia, P. A. N.; Oliveira, E. J. and Araújo, L. R. (2005b). A new distribution system reconfiguration approach using optimal power flow technique and sensitivity analysis for loss reduction, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. I, No. 1, pp. 1-5.
- [8] Oliveira, L. W.; Oliveira, E. J.; Carneiro Jr., S.; Pereira, J. L. R.; Costa, J. S. and Silva Jr., I. C. (2009), Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição para minimização de perdas de energia. Sociedade Brasileira de Automática (SBA).
- [9] Oliveira, L. W.; Oliveira, E. J.; Carneiro Jr., S.; Pereira, J. L. R.; Costa, J. S. and Silva Jr., I. C., Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for Energy Losses minimization, to be published in International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2010.
- [10] Civanlar, S.; Grainger, J. J.; Yin, H. and Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. III, No. 3, pp. 1217-1223.
- [11] Babu, P. R.; Vanamali, M. P. R.; Kumar, M. P. V. V. R.; Hemachandra, V. S. Network reconfiguration. in distribution systems using L-E method. 2010 Annual IEEE India Conference (INDICON), dez 2010.
- [12] YOUNG-JAE JEON; JAE-CHUL KIM; JIN-O KIM; JOONG-RIN SHIN; LEE, K. Y. An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 17, n. 4, p. 1070- 1078, out 2002.
- [13] Zhang, D.; Fu, Z.; Zhang, L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems. Electric Power Systems Research, v. 77, n. 5-6, p. 685–694, 2007.
- [14] Abdelaziz, A. Y. Mohaned, F. M. Mekhamer, S. F.; Badr, M. A. L. Distribution system reconfiguration using a modified Tabu Search algorithm. Electric Power Systems Research, v. 80, n. 8, p. 943–953, ago 2010.
- [15] Monticelli, A. (1983). Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica. Edgar Blucher, Rio de Janeiro - RJ.
- [16] Raju, G. K. V. and Bijwe, P. R. (2008). An efficient algorithm for loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics. IEEE Trans. Power Systems, Vol. XXIII, No. 3, pp. 1280-1287.
- [17] Chiou, J. P.; Chung, C. F. and Su, C. T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. IEEE Trans. Power Systems, Vol. XX, No. 2, pp. 668-674.
- [18] Baran, M. E. and Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. IEEE Trans. Power Delivery, Vol. IV, No. 2, pp. 1401-1407.
-