

Capítulo 4

RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO – FORMULAÇÃO 3

4.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a Formulação 3 do problema de reconfiguração de redes de distribuição.

Um aspecto importante no contexto de qualidade do serviço consiste em que a solução do problema deve respeitar os limites das tensões. Com o objetivo de considerar este aspecto, nesta formulação é incorporada a restrição de máxima queda de tensão na função objetivo (restrição de tensão mínima em todas as barras de carga).

4.2 Cálculo da queda de tensão em redes primárias de Distribuição

Na figura 4.1 está representado um trecho de rede genérico jk . A corrente que circula pelo trecho está definida por suas componentes real (i_R) e imaginária (i_I).

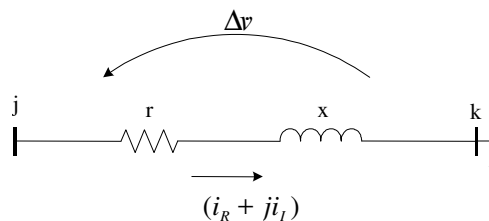


Figura 4.1 - Trecho de rede genérico jk

A Eq.(4.1) representa a queda de tensão através do trecho genérico jk :

$$\begin{aligned}
 \dot{v}_j - \dot{v}_k &= c_{jk} \cdot (i_{jk,R} + j i_{jk,I}) \cdot (r_{jk} + j x_{jk}) \\
 &= c_{jk} \cdot \left[(r_{jk} i_{jk,R} - x_{jk} i_{jk,I}) + j (r_{jk} i_{jk,I} + x_{jk} i_{jk,R}) \right] \\
 &\cong c_{jk} \cdot (r_{jk} i_{jk,R} - x_{jk} i_{jk,I})
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

A aproximação realizada no último passo na Eq.(4.1) é freqüente em sistemas de distribuição. Nessa equação foram desprezadas as rotações de fase dos ângulos das tensões de entrada e saída. Devido à característica indutiva das cargas e aos valores de resistência e reatância nos cabos usados em redes de distribuição típicas, a variação nos ângulos de fase das tensões é muito pequena.

A figura 4.2 representa esta aproximação, onde $(r i_R - x i_I)$ corresponde a ΔV_R , e $j(x i_R + r i_I)$ corresponde a ΔV_I . (Neste caso $i_I < 0$).

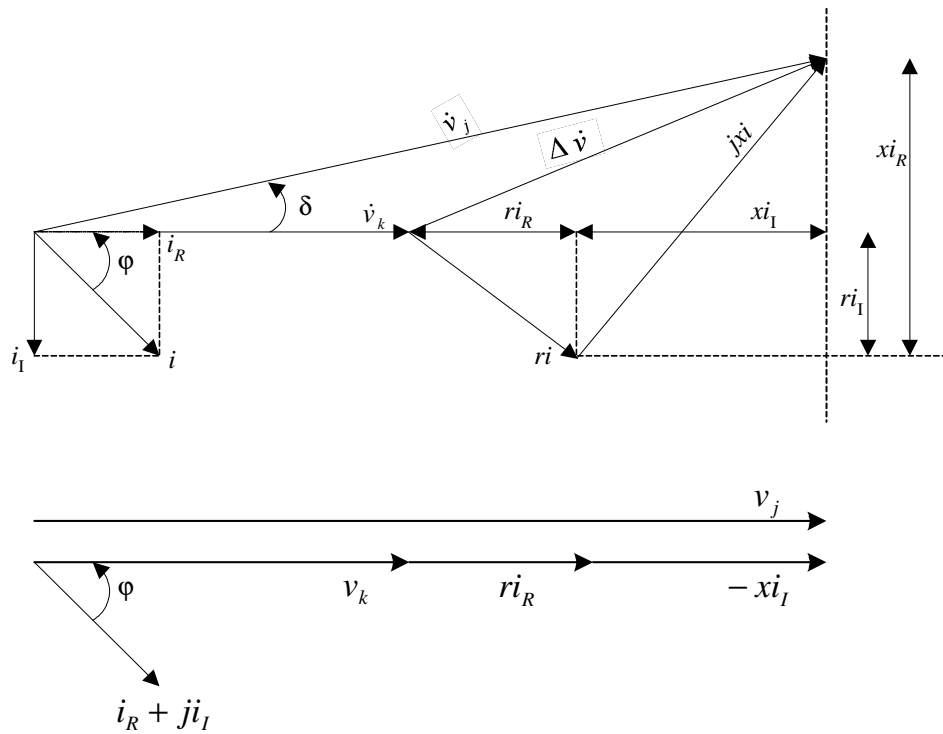


Figura 4.2 - Queda de tensão através de um trecho de rede

Nesta aproximação a parcela correspondente à parte imaginária da queda de tensão $(j(r_{jk} i_{jk,I} + x_{jk} i_{jk,R}))$ pode ser desprezada na maioria das situações, sem comprometer a precisão dos resultados. Por exemplo, em um alimentador trifásico de 1km, tensão de 13.8 kV, construído com condutores 336.4MCM e capacidade de corrente de 300A, com fator

de potência 0.9, a queda de tensão fase-neutro é aproximadamente $0.134\angle 37.6^\circ = (0.106 + j0.0818)$ kV. Se a tensão fase-neutro no extremo receptor do alimentador é $7.967\angle 0^\circ$ kV, então a tensão no extremo de envio é $8.074\angle 0.6^\circ$ kV.

Com esta simplificação obtém-se uma queda de tensão aproximada de 0.106 kV, que é um valor muito próximo da diferença entre as duas magnitudes de tensão: $(8.074 - 7.967)$ kV = 0.107 kV.

Assumindo que a queda de tensão através de qualquer ligação pode ser representada por um numero real puro (como se indicou na Eq.(4.1)), e que a tensão na extremidade receptora (barra k) tem ângulo zero, então a tensão na outra extremidade também possui ângulo zero (e assim, para todas as barras da rede). Portanto, a queda de tensão através de qualquer trecho pode-se representar por meio da Eq.(4.2):

$$v_j - v_k = c_{jk} \cdot (r_{jk} i_{jk,R} - x_{jk} i_{jk,I}) \quad (4.2)$$

4.3 Formulação 3: inclusão das tensões nas barras

A expressão mostrada anteriormente (Eq.(4.2)) fornece a restrição de queda de tensão. Ela é incorporada na função objetivo através de termos de penalização, da mesma forma que se procedeu com as restrições da PLK e de capacidade de condução de corrente, o que foi mostrado no Capítulo 2.

A seguinte expressão mostra a função objetivo para a Formulação 3:

$$\begin{aligned}
\min E(\tilde{i}_R, \tilde{i}_I, \tilde{v}) = & \sum_{jk \in \Omega_B} r_{jk} \cdot c_{jk}^2 \cdot (i_{jk,R}^2 + i_{jk,I}^2) \\
& + K_I \cdot \sum_p \left(\sum_{jk \in \Omega_{Bp}} c_{jk} \cdot i_{jk,R} + I_{p,R} \right)^2, \\
& + K_I \cdot \sum_p \left(\sum_{jk \in \Omega_{Bp}} c_{jk} \cdot i_{jk,I} + I_{p,I} \right)^2, \\
& + K_V \cdot \sum_{jk \in \Omega_B} (v_j - v_k - c_{jk} r_{jk} i_{jk,R} + c_{jk} x_{jk} i_{jk,I})^2
\end{aligned} \tag{4.3}$$

onde:

- K_I : parâmetro que permite ajustar o peso relativo da restrição da PLK;
- K_V : parâmetro que permite controlar o peso relativo dos termos de penalização da queda de tensão;
- v_j : tensão na barra j (pu);
- v_k : tensão na barra k (pu);
- r_{jk}, x_{jk} : resistência e reatância do trecho jk (pu);
- c_{jk} : coeficiente de capacidade do trecho jk (pu);
- i_R : parte real da corrente (pu);
- i_I : parte imaginária da corrente (pu).

Da mesma forma como se procedeu na formulação anterior (Formulação 2), a aplicação do Método de Newton à Formulação 3 fornece a seguinte regra de atualização:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_r^{(1)} \\ \tilde{i}_i^{(1)} \\ \tilde{v}_j^{(1)} \\ \tilde{v}_k^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_r^{(0)} \\ \tilde{i}_i^{(0)} \\ \tilde{v}_j^{(0)} \\ \tilde{v}_k^{(0)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} H_1 & 0 & H_{rj} & H_{rk} \\ 0 & H_1 & H_{ij} & H_{ik} \\ H_{jr} & H_{ji} & H_{jj} & H_{jk} \\ H_{kr} & H_{ki} & H_{kj} & H_{kk} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} G(\tilde{i}_r^{(0)}) \\ G(\tilde{i}_i^{(0)}) \\ G(\tilde{v}_j^{(0)}) \\ G(\tilde{v}_k^{(0)}) \end{bmatrix}, \tag{4.4}$$

onde:

$\tilde{i}_r^{(1)}$ e $i_i^{(1)}$ são vetores que contém a parte real e imaginária das correntes, respectivamente, na iteração 1;

$\tilde{i}_r^{(0)}$ e $i_i^{(0)}$ são vetores que contém a parte real e imaginária das correntes, respectivamente, na iteração 0;

$\tilde{v}_j^{(1)}$ e $\tilde{v}_k^{(1)}$ são os vetores correspondentes às tensões das barras de carga (j e k) na iteração 1;

$\tilde{v}_j^{(0)}$ e $\tilde{v}_k^{(0)}$ são os vetores correspondentes às tensões das barras de carga (j e k) na iteração 0;

H indica a matriz Hessiana, sendo seus elementos:

$$H_{rj} = H_{jr} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_r \partial v_j}$$

$$H_{rk} = H_{kr} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_r \partial v_k}$$

$$H_{ij} = H_{ji} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_i \partial v_j}$$

$$H_{ik} = H_{ki} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_i \partial v_k}$$

$$H_{jk} = H_{kj} = \frac{\partial^2 E}{\partial v_j \partial v_k}$$

$$H_{jj} = \frac{\partial^2 E}{\partial v_j^2}$$

$$H_{kk} = \frac{\partial^2 E}{\partial v_k^2} .$$

Da mesma forma a matriz G corresponde ao vetor coluna formado pelas derivadas parciais da função objetivo em relação às partes real e imaginária das correntes, e as tensões nas barras. Os elementos da matriz G são:

$$G(\tilde{i}_r^{(0)}) = \frac{\partial E}{\partial i_r}$$

$$G(\tilde{i}_i^{(0)}) = \frac{\partial E}{\partial i_i}$$

$$G(\tilde{v}_j^{(0)}) = \frac{\partial E}{\partial v_j}$$

$$G(\tilde{v}_k^{(0)}) = \frac{\partial E}{\partial v_k}$$

A seguir é apresentada a contribuição da Lei de Ohm no vetor gradiente e na matriz Hessiana.

Contribuições da Lei de Ohm no vetor gradiente

$$\frac{\partial E}{\partial v_j} = 2K_V \cdot (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_R + x_{jk} c_{jk} i_I) \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial E}{\partial v_k} = -2K_V \cdot (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_R + x_{jk} c_{jk} i_I) \quad (4.6)$$

Nas equações anteriores os termos v_j e v_k correspondem às barras de carga (as barras de geração possuem tensão constante).

$$\frac{\partial E}{\partial i_R} = -2K_V \cdot r_{jk} \cdot c_{jk} (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_R + x_{jk} c_{jk} i_I) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial E}{\partial i_I} = 2K_V \cdot x_{jk} \cdot c_{jk} (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_R + x_{jk} c_{jk} i_I) \quad (4.8)$$

Contribuições da lei de Ohm na matriz Hessiana

Contribuição da tensão na barra j :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j^2} = 2K_V \quad (4.9)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j \partial v_k} = \frac{\partial^2 E}{\partial v_k \partial v_j} = -2K_V \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j \partial i_R} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_R \partial v_j} = -2K_V \cdot r_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j \partial i_I} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_I \partial v_j} = 2K_V \cdot x_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.12)$$

Contribuição da tensão na barra k :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_k^2} = 2K_V \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_k \partial i_R} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_R \partial v_k} = 2K_V \cdot r_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_k \partial i_I} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_I \partial v_k} = -2K_V \cdot x_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.15)$$

Contribuição da componente real da corrente i :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_R^2} = 2K_V \cdot (r_{jk} \cdot c_{jk})^2 \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_R \partial i_I} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_I \partial i_R} = -2K_V \cdot r_{jk} \cdot x_{jk} \cdot c_{jk}^2 \quad (4.17)$$

Contribuição da componente imaginária da corrente i :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_I^2} = 2K_V \cdot (x_{jk} \cdot c_{jk})^2 \quad (4.18)$$

Na função objetivo mostrada através da Eq.(4.3) pode-se incluir um termo de penalização adicional cujo objetivo seria considerar a restrição de tensão mínima. Desta forma, inclui-se na função objetivo (Eq.(4.3)) o seguinte termo de penalização para cada barra com tensão menor que a mínima especificada V_{min} :

$$V_M \cdot g(v_j), \quad (4.19)$$

onde o parâmetro V_M permite controlar o peso relativo da restrição de tensão mínima. A função $g(\cdot)$ é dada por:

$$g(v_j) = \begin{cases} (v_j - V_{min})^2 & \text{se } v_j < V_{min} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}. \quad (4.20)$$

A formulação representada pela Eq.(4.21) a seguir incorpora a restrição de tensão mínima em todas as barras:

$$\begin{aligned} \min E(\tilde{i}_R, \tilde{i}_I, \tilde{v}) = & \sum_{jk \in \Omega_B} r_{jk} \cdot c_{jk}^2 \cdot (i_{jk,R}^2 + i_{jk,I}^2) \\ & + K_I \cdot \sum_p \left(\sum_{jk \in \Omega_{Bp}} c_{jk} \cdot i_{jk,R} + I_{p,R} \right)^2 \\ & + K_I \cdot \sum_p \left(\sum_{jk \in \Omega_{Bp}} c_{jk} \cdot i_{jk,I} + I_{p,I} \right)^2 \\ & + K_V \cdot \sum_{jk \in \Omega_B} (v_j - v_k - c_{jk} r_{jk} i_{jk,R} + c_{jk} x_{jk} i_{jk,I})^2 \\ & + V_M \cdot \sum_{j \in \Omega_N} g(v_j) \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.4 Conflito entre restrições

O Método das Penalidades Externas facilita a resolução do problema de otimização, mas tem a desvantagem de permitir conflitos potenciais entre as restrições. No caso da

formulação que se apresenta (Formulação 3), o problema acontece entre a restrição de tensão mínima e a restrição da PLK. Quando se verifica uma tensão menor que a tensão mínima V_{min} em um determinado nó, a restrição de tensão mínima (último termo de penalização na (Eq.(4.21))) deve aumentar a tensão nesse nó, de forma que a restrição não seja violada. Como consequência, as correntes nas ligações devem ser modificadas através da restrição de queda de tensão, para que a Lei de Ohm, que corresponde ao terceiro termo de penalização na Eq.(4.21), continue sendo satisfeita. Finalmente, a alteração das correntes terá impacto na Primeira Lei de Kirchhoff (primeiro e segundo termos de penalização na Eq.(4.21)), podendo surgir barras de carga onde o balanço da PLK não seja mais satisfeito devido ao conflito entre as restrições de tensão mínima, Lei de Ohm e PLK.

Com o objetivo de evitar conflitos entre restrições, neste trabalho a restrição de tensão mínima não foi incorporada nas iterações do método de Newton. Isto significa que no cálculo da matriz Hessiana e do vetor gradiente utiliza-se a formulação dada pela Eq.(4.3) e não a formulação dada pela Eq.(4.21), evitando assim um possível conflito entre restrições. Não obstante, os valores das penalidades associados com esta restrição são considerados durante todo o processo de busca inteira.

O último termo na Eq.(4.3) representa as penalidades associadas com a restrição de queda de tensão (Lei de Ohm). É importante ressaltar que a restrição da queda de tensão não ocasiona nenhum conflito com os valores resultantes dos outros termos de penalização; devido a que as tensões nos nós são variáveis “livres”, elas só aparecem na restrição de queda de tensão.

Deve-se observar que no Método B de Busca em profundidade e no Método *Branch-and-Bound*, a seleção de qual chave será aberta vai depender do aumento de perda total que sua abertura causará. Para determinar este valor é utilizada a função objetivo completa (Eq.(4.3)), a qual contém os termos da restrição de tensão mínima. Isto garante que a restrição de tensão mínima funcione corretamente.

Quando se utiliza o Método A de Busca em Profundidade, a restrição de tensão mínima não é considerada. Neste caso, a decisão de qual chave será aberta é tomada com base nos elementos da diagonal da matriz Hessiana, a qual não contém contribuições da restrição de tensão mínima.

4.5 Instalação de capacitores

No problema de distribuição radial podem ser instalados bancos de capacitores para compensar a potência reativa das cargas e reduzir a potência fornecida pelo sistema, reduzir as perdas de energia e melhorar o perfil de tensão das redes. Todos esses aspectos estão relacionados com a diminuição das perdas do sistema.

Neste item vai-se apresentar a inclusão do custo de capacitores na Formulação 3, em barras onde a restrição de tensão mínima resultou como não atuante.

Para este caso a função objetivo é:

$$\begin{aligned}
 \min E(\tilde{x}) = & C_p \cdot \sum_{jk \in \Omega_L} r_{jk} \cdot c_{jk}^2 \cdot (i_{jk,R}^2 + i_{jk,I}^2) \\
 & + C_c \cdot \sum_p i_{c,p}^2 \\
 & + K_I \cdot \sum_p \left(\sum_{jk \in \Omega_{Lp}} c_{jk} \cdot i_{jk,R} + I_{p,R} \right)^2 \\
 & + K_I \cdot \sum_p \left(\sum_{jk \in \Omega_{Lp}} c_{jk} \cdot i_{jk,I} + I_{p,I} - i_{c,p} \right)^2 \\
 & + K_c \cdot \sum_{jk \in \Omega_L} f(i_{r,jk}, i_{i,jk}) \\
 & + K_V \cdot \sum_{jk \in \Omega_B} (v_j - v_k - c_{jk} r_{jk} i_{jk,R} + c_{jk} x_{jk} i_{jk,I})^2
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

onde:

C_p : Custo das perdas em [R\$/pu da perda em demanda];

C_c : Custo do capacitor [R\$/pu da corrente fornecida pelo capacitor].

Sendo as variáveis independentes:

- $i_{jk,R}$: componente real da corrente de todas as ligações n_l ;
 $i_{jk,I}$: componente imaginária da corrente de todas as ligações n_l ;
 $i_{c,p}$: corrente fornecida pelo capacitor em pu;
 v_j : tensão na barra j , para todas as barras n_b

A seguir apresentam-se as contribuições dos termos de perdas, dos capacitores, da PLK, da restrição de capacidade e da Lei de Ohm, no vetor gradiente.

a) Contribuição dos termos de perdas no vetor gradiente:

- Parte real:

$$\frac{\partial E}{\partial i_{r,jk}} = 2C_p \cdot r_{jk} \cdot c_{jk}^2 \cdot i_{r,jk} \quad (4.23)$$

- Parte imaginária:

$$\frac{\partial E}{\partial i_{i,jk}} = 2C_p \cdot r_{jk} \cdot c_{jk}^2 \cdot i_{i,jk} \quad (4.24)$$

b) Contribuição dos capacitores no vetor gradiente.

- Para cada barra de carga:

$$\frac{\partial E}{\partial i_{c,p}} = 2C_c \cdot i_{c,p} \quad (4.25)$$

c) Contribuição da PLK no vetor gradiente:

- Parte real:

$$\frac{\partial E}{\partial i_{r,jk}} = 2K_l \cdot c_{jk} \cdot \left(\sum_{mn \in \Omega_p} c_{mn} \cdot i_{r,mn} + I_{p,r} \right) \quad (4.26)$$

- Parte imaginária:

$$\frac{\partial E}{\partial i_{i,jk}} = 2K_l \cdot c_{jk} \cdot \left(\sum_{mn \in \Omega_p} c_{mn} \cdot i_{i,mn} + I_{p,i} + i_{c,i} \right) \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial E}{\partial i_{c,p}} = 2K_I \cdot \left(\sum_{mn \in \Omega_p} c_{mn} \cdot i_{i,mn} + I_{p,i} + i_{c,p} \right) \quad (4.28)$$

Para a inclusão dos termos da PLK no vetor gradiente, é realizada uma varredura nos nós de carga (p). Em cada nó de carga a parcela entre parêntese é calculada apenas uma vez. A contribuição da PLK é calculada para cada ligação jk que tem o nó p como extremidade (o índice mn inclui o índice jk).

d) Contribuição da restrição de capacidade no vetor gradiente:

- Para cada ligação jk em sobrecarga calcula-se:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk}} = 2K_c \cdot (i_{R,jk} - L_R) \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{I,jk}} = 2K_c \cdot (i_{I,jk} - L_I) \quad (4.30)$$

$$\text{sendo } L_R = \frac{i_{R,jk}}{\sqrt{i_{R,jk}^2 + i_{I,jk}^2}} \quad \text{e} \quad L_I = \frac{i_{I,jk}}{\sqrt{i_{R,jk}^2 + i_{I,jk}^2}} \quad (4.31)$$

e) Contribuição da Lei de Ohm no vetor gradiente:

$$\frac{\partial E}{\partial v_j} = 2K_V \cdot (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_{R,jk} + x_{jk} c_{jk} i_{I,jk}) \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial E}{\partial v_k} = -2K_V \cdot (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_{R,jk} + x_{jk} c_{jk} i_{I,jk}) \quad (4.33)$$

Nas equações anteriores os sub-índices j e k correspondem às barras de carga (as barras de geração possuem tensão constante).

$$\frac{\partial E}{\partial i_{R,jk}} = -2K_V \cdot r_{jk} \cdot c_{jk} (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_{R,jk} + x_{jk} c_{jk} i_{I,jk}) \quad (4.34)$$

$$\frac{\partial E}{\partial i_{I,jk}} = 2K_V \cdot x_{jk} \cdot c_{jk} (v_j - v_k - r_{jk} c_{jk} i_{R,jk} + x_{jk} c_{jk} i_{I,jk}) \quad (4.35)$$

A seguir apresenta-se a contribuição dos termos de perdas, dos capacitores, da PLK, da restrição de capacidade e da Lei de Ohm, no cálculo da matriz Hessiana.

a) Contribuição dos termos de perdas na matriz Hessiana:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk}^2} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{I,jk}^2} = 2C_p \cdot r_{jk} \cdot c_{jk}^2 \quad (4.36)$$

b) Contribuição dos capacitores na matriz Hessiana:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{c,p}^2} = 2C_c \quad (4.37)$$

c) Contribuição dos termos da PLK na matriz Hessiana:

- Parte real:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk}^2} = 2K_I \cdot c_{jk}^2 \quad (\text{elementos da diagonal}) \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk} \partial i_{R,mm}} = 2K_I \cdot c_{jk} \cdot c_{mm} \quad (\text{elementos fora da diagonal}) \quad (4.39)$$

Para a inclusão da contribuição dos termos da PLK na matriz Hessiana realiza-se uma varredura nos nós de carga. Para cada nó de carga p :

- Efetua-se uma varredura nas ligações jk que têm o nó p como uma extremidade e incluem-se os elementos na diagonal jk .

- Efetua-se uma varredura nas ligações mn que têm o nó p como uma extremidade. Para cada ligação $mn \neq jk$ inclui-se a contribuição no elemento fora da diagonal.

- Parte imaginária:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{l,jk}^2} = 2 K_l \cdot c_{jk}^2 \quad (\text{elementos da diagonal}) \quad (4.40)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{l,jk} \partial i_{l,mn}} = 2 K_l \cdot c_{jk} \cdot c_{mn} \quad (\text{elementos fora da diagonal}) \quad (4.41)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{c,p}^2} = 2 K_l \quad (4.42)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{l,jk} \partial i_{c,p}} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{c,p} \partial i_{l,jk}} = 2 K_l \cdot c_{jk} \quad (4.43)$$

d) Contribuição dos termos da restrição de capacidade na matriz Hessiana:

- Para cada ligação jk em sobrecarga calcula-se:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk}^2} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{l,jk}^2} = 2 K_c \quad (4.44)$$

e) Contribuição da Lei de Ohm na matriz Hessiana:

- Contribuição da tensão na barra j :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j^2} = 2 K_v \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j \partial v_k} = \frac{\partial^2 E}{\partial v_k \partial v_j} = -2 K_v \quad (4.46)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j \partial i_{R,jk}} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk} \partial v_j} = -2K_V \cdot r_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.47)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_j \partial i_{I,jk}} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{I,jk} \partial v_j} = 2K_V \cdot x_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.48)$$

- Contribuição da tensão na barra k :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_k^2} = 2K_V \quad (4.49)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_k \partial i_{R,jk}} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk} \partial v_k} = 2K_V \cdot r_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.50)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial v_k \partial i_{I,jk}} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{I,jk} \partial v_k} = -2K_V \cdot x_{jk} \cdot c_{jk} \quad (4.51)$$

- Contribuição da componente real da corrente i :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk}^2} = 2K_V \cdot r_{jk}^2 \cdot c_{jk}^2 \quad (4.52)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{R,jk} \partial i_{I,jk}} = \frac{\partial^2 E}{\partial i_{I,jk} \partial i_{R,jk}} = -2K_V \cdot r_{jk} \cdot x_{jk} \cdot c_{jk}^2 \quad (4.53)$$

- Contribuição da componente imaginária da corrente i :

$$\frac{\partial^2 E}{\partial i_{I,jk}^2} = 2K_V \cdot x_{jk}^2 \cdot c_{jk}^2 \quad (4.54)$$

4.6 Resumo

Neste Capítulo foi apresentada a Formulação 3 do problema de reconfiguração de redes de distribuição, a qual incorpora a restrição de queda de tensão na função objetivo através de termos de penalização.

Foi tratado o problema do conflito entre restrições e sua resolução. Para evitar este problema, a restrição de tensão mínima não é considerada no cálculo de tensões e correntes nas iterações do Método de Newton, mas sim na busca inteira.

Para a adequação dos níveis de tensão da rede, foram instalados capacitores em barras onde não for cumprida a restrição de tensão mínima. O capacitor foi modelado como uma variável contínua, introduzida na Formulação 3.

O próximo Capítulo mostra a aplicação das formulações desenvolvidas nos Capítulos 3 e 4 através de dois casos de estudo.

Capítulo 5

APLICAÇÃO DAS METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS

5.1 Introdução

Neste Capítulo são apresentados os estudos realizados visando avaliar a metodologia desenvolvida para resolver o problema de reconfiguração de redes de distribuição. Os resultados obtidos também são mostrados e discutidos no presente Capítulo.

A metodologia descrita nos Capítulos 3 e Capítulo 4 foi implementada no sistema Otimiza¹ (Métodos de Otimização Aplicados a Estudos de Sistemas Elétricos de Potência [10]), programa computacional que permite combinar os dois métodos de busca inteira utilizados neste trabalho (Busca em Profundidade e *Branch and Bound*) com as formulações apresentadas nos Capítulos 3 e 4 (Formulações 2 e 3).

No Caso 1, foi utilizada uma rede elétrica estabelecida por Baran e Wu em 1989 [5]. Muitos pesquisadores utilizaram esta rede para validar seus trabalhos, tornando-a desta forma uma rede padrão para testes de algoritmos de reconfiguração em sistemas de distribuição. A rede utilizada no Caso 2 corresponde a um sistema real de distribuição de grande porte.

Serão desenvolvidos estudos comparativos entre as Formulações 1, 2 e 3 aplicadas às duas redes elétricas. A Formulação 2 constitui um modelo aprimorado da Formulação 1 (onde todas as cargas estão representadas por um único fator de potência [8]) na qual as cargas são representadas por fatores de potência individuais; e na Formulação 3 são incluídas as tensões no problema de otimização.

Os testes realizados visam mostrar o desempenho da metodologia e as técnicas de solução propostas em relação aos seguintes aspectos:

¹ Uma versão didática do sistema Otimiza está disponível em <http://www.pea.usp.br/enerq>, a través da opção “downloads”.

- a) Valor da perda total obtida
- b) Estado final das chaves
- c) Tempo de processamento
- d) Verificação da restrição de tensão mínima no caso da Formulação 3
- e) Precisão do modelo de fluxo de potência.

A estrutura dos estudos realizados é a seguinte:

Caso 1:

- Aplicação da Formulação 2:
 - utilizando o Método A de Busca em Profundidade.
 - utilizando o Método B de Busca em Profundidade.
 - utilizando o método *Branch and Bound*.
- Aplicação da Formulação 2 na rede elétrica com variação das cargas.
- Aplicação da Formulação 3:
 - utilizando o Método A de Busca em Profundidade.
 - utilizando o Método B de Busca em Profundidade.
 - utilizando o método *Branch and Bound*.
- Verificação da restrição de tensão mínima.

Caso 2:

- Aplicação da Formulação 2:
 - utilizando o Método A de Busca em Profundidade.
 - utilizando o Método B de Busca em Profundidade.
- Aplicação da Formulação 3:
 - utilizando o Método A de Busca em Profundidade.
 - utilizando o Método B de Busca em Profundidade.

5.2 Caso 1

A rede de Baran e Wu [5], apresentada na figura 5.1, representa um sistema de 12.66 KV, com 32 nós de carga e 37 ligações com chave (ver dados completos da rede no Apêndice A). No trabalho original utiliza-se a técnica de troca de ligações, de forma que uma chave

NA é fechada em troca da abertura de uma ligação qualquer, com chave NF ou sem chave. No presente trabalho somente são operadas chaves previamente definidas na rede; e com o objetivo de permitir uma comparação direta dos resultados aqui obtidos com os resultados do trabalho original, todas as ligações sem chave da rede original foram definidas como chaves NF (não foi definida nenhuma ligação sem chave).

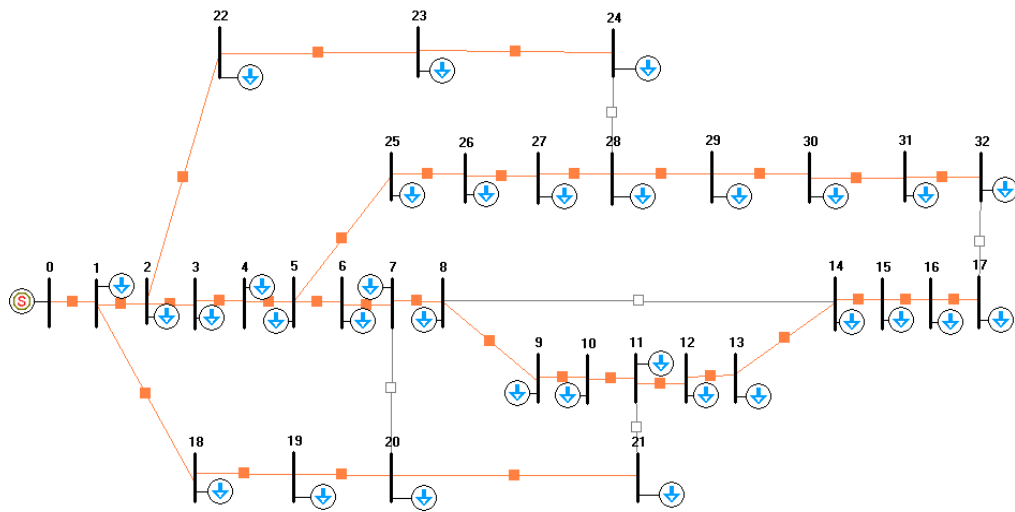


Figura 5.1 - Rede elétrica Caso 1

De acordo com a condição necessária para a radialidade especificada no Capítulo 3, nesta rede o número necessário de chaves fechadas (n_{CF}) deve ser

$$n_{CF} = n_C - n_{jk} = 32 - 0 = 32, \quad (5.1)$$

implicando, portanto, que o número necessário de chaves abertas seja $37 - 32 = 5$.

5.2.1 Aplicação da Formulação 2 à rede elétrica do Caso 1

A tabela 5.1 apresenta os principais dados do estudo realizado para a aplicação da Formulação 2 na rede elétrica do Caso 1.

Tabela 5.1 - Dados para a aplicação da Formulação 2 à rede elétrica do Caso 1

| Parâmetro | Valor |
|---|--------------|
| Tolerância em corrente para o método de Newton (pu) | 10^{-10} |
| Constante K | 10^6 |
| Perda total inicial (antes da otimização) (kW) | 113.3862 |

Os resultados obtidos utilizando os Métodos A e B de Busca em Profundidade foram idênticos. A tabela 5.2 apresenta estes resultados.

Tabela 5.2– Resultados obtidos para a Formulação 2 utilizando Busca em profundidade

| Parâmetros | Formulação 2 |
|------------------------------------|---------------------|
| Perda no estado inicial (kW) | 113.3862 |
| Chaves abertas | 6-7 |
| | 8-9 |
| | 13-14 |
| | 24-28 |
| | 31-32 |
| Perda total da solução obtida (kW) | 127.3557 |
| Tempo de processamento (s) | 0.0160 |

Em todos os estudos apresentados neste trabalho foi utilizada uma configuração de processamento Pentium 4 com velocidade de 1.8 GHz e 768 MB de memória RAM.

A Formulação 2 em conjunto com o método *Branch and Bound*, aplicados à rede especificada para o Caso 1, forneceu os resultados que são apresentados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos para a Formulação 2 no Caso 1 utilizando *Branch and Bound*

| Parâmetros | Formulação 2 |
|------------------------------------|--------------|
| Perda no estado inicial (kW) | 113.3862 |
| Chaves abertas | 6-7 |
| | 8-9 |
| | 13-14 |
| | 24-28 |
| Perda total da solução obtida (kW) | 127.3557 |
| Tempo de processamento (s) | 6.9220 |

A figura 5.2 mostra a rede resultante obtida através do programa Otimiza.

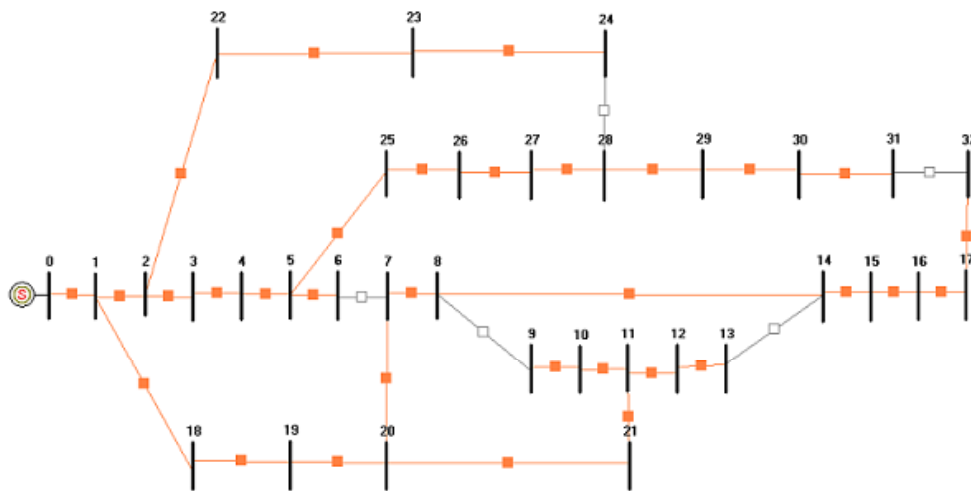


Figura 5.2 – Rede resultante da aplicação da Formulação 2 à rede elétrica do Caso 1

Visando obter configurações diferentes para validar a metodologia desenvolvida na Formulação 2, foram realizadas variações nas cargas mudando o fator de potência das mesmas. Os resultados obtidos para cada variante executada são mostrados na tabela 5.4; o método utilizado foi o *Branch and Bound*.

Tabela 5.4 – Resultados obtidos para distintas variações das cargas

| | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 | Variante 4 |
|---|------------|------------|------------|------------|
| Chaves abertas | 6-7 | 6-7 | 6-7 | 6-7 |
| | 8-9 | 8-9 | 8-9 | 8-9 |
| | 13-14 | 13-14 | 13-14 | 13-14 |
| | 27-28 | 27-28 | 24-28 | 24-28 |
| | 31-32 | 30-31 | 17-32 | 30-31 |
| Perda total da solução obtida (kW) | 120.0570 | 167.7413 | 111.6796 | 141.9878 |

5.2.2 Aplicação da Formulação 3 à rede elétrica do Caso 1

A tabela 5.5 mostra os principais dados do estudo realizado com a Formulação 3 na rede elétrica do Caso 1.

Tabela 5.5 - Dados da aplicação da Formulação 3

| Parâmetro | Valor |
|-------------------------------------|------------|
| Tolerância do método de Newton (pu) | 10^{-10} |
| Parâmetro K | 10^6 |
| Fator DV | $10e^{-3}$ |
| Fator V_M | 100 |
| Tensão mínima V_{min} (pu) | 0.90 |

A tabela 5.6 apresenta os resultados obtidos para a Formulação 3 utilizando o Método A de Busca em Profundidade. Da mesma forma que aconteceu na Formulação 2, os resultados obtidos com a utilização dos Métodos A e B de Busca em profundidade foram os mesmos.

A Tabela 5.7 apresenta os resultados obtidos para a Formulação 3 utilizando o método *Branch and Bound* na rede elétrica do Caso 1.

Tabela 5.6 - Resultados obtidos para a Formulação 3 utilizando Busca em profundidade

| Parâmetros | Formulação 3 |
|------------------------------------|---------------------|
| Perda no estado inicial (kW) | 113.3862 |
| Chaves abertas | 6-7 |
| | 8-9 |
| | 13-14 |
| | 24-28 |
| | 31-32 |
| Perda total da solução obtida (kW) | 127.3557 |
| Tempo de processamento (s) | 0.0630 |

Tabela 5.7 - Resultados obtidos para a Formulação 3 utilizando *Branch and Bound*

| Parâmetros | Formulação 3 |
|------------------------------------|---------------------|
| Perda no estado inicial (kW) | 133.0884 |
| Chaves abertas | 6-7 |
| | 8-9 |
| | 13-14 |
| | 24-28 |
| | 31-32 |
| Perda total da solução obtida (kW) | 127.3557 |
| Tempo de processamento (s) | 32.7030 |

5.2.3 Verificação da restrição de tensão mínima.

A tabela 5.8 mostra as soluções obtidas para diferentes valores de tensão mínima (V_{min}) utilizando o método *Branch and Bound*.

O fato de o termo de restrição de tensão mínima ser maior que zero significa que a restrição de tensão mínima não foi satisfeita para todas as barras. Esta situação surge do carregamento do sistema e pelo valor relativamente alto da tensão mínima (0.96 e 0.98 pu). Como existem 32 barras de carga no sistema, cada barra contribui no termo de penalidade de tensão mínima com o seguinte valor de tensão média (Por exemplo, para $V_{min} = 0.98$ pu):

$$0.98 - \sqrt{\frac{1.046342}{32.100}} = 0.9619 \text{ pu}$$

Tabela 5.8 – Restrição de tensão mínima

| <i>V</i>_{min} (pu) | Chaves abertas | Perdas (kW) | Termo de restrição tensão mínima (pu) | Valor da função objetivo (pu) |
|--|--|--------------------|--|--|
| 0.98 | 7-20 8-9 13-14 27-28 31-32 | 131.7623 | 1.046342 | 1.047659 |
| 0.96 | 6-7 8-9 13-14 27-28 31-32 | 127.8422 | 0.1079237 | 0.1092022 |
| 0.94 | 6-7 8-9 13-14 24-28 31-32 | 127.3557 | 0 | 0.001273585 |
| 0.92 | 6-7 8-9 13-14 24-28 31-32 | 127.3557 | 0 | 0.001273585 |

A tabela 5.9 mostra uma comparação entre a solução ótima obtida através da Formulação 3 sem a atuação da restrição de tensão mínima, e a solução correspondente com a atuação desta restrição.

Pode-se notar que forçar o valor de tensão mínima produz uma solução ótima diferente, na qual o valor da perda total aumenta de 127.3557 kW para 131.7623 kW. Antes do processo de reconfiguração existiam barras com tensão inferior ao limite mínimo permitido. Durante a reconfiguração, o algoritmo procura obter outras soluções que melhorem os níveis de tensão de forma tal que após a reconfiguração o sistema apresenta uma elevação do perfil de tensão em detrimento de uma menor redução de perdas. Na configuração obtida o valor do termo de restrição da tensão mínima maior que zero indica que ainda existem barras com tensão menor que a mínima permitida.

Tabela 5.9 – Impacto da restrição de tensão mínima

| | Restrição de tensão mínima | |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------|
| | Inativa | Ativa |
| Parâmetro V_M (4.5) | - | 100 |
| Parâmetro V_{min} (pu) (4.6) | - | 0.98 |
| Chaves abertas | 6-7 | 7-20 |
| | 8-9 | 8-9 |
| | 13-14 | 13-14 |
| | 24-28 | 27-28 |
| | 31-32 | 31-32 |
| Perdas (kW) | 127.3557 | 131.7623 |
| Termo de penalidade de tensão mínima | 0 | 1.046342 |
| Função objetivo (pu) | 0.001273585 | 1.047659 |

As tabelas 5.10 e 5.11 mostradas a seguir, apresentam uma comparação entre os resultados obtidos com as Formulações 1, 2 e 3, em relação a: *i*) estado final das chaves, *ii*) perda total da solução obtida e *iii*) tempo de processamento gasto no cálculo da solução ótima em cada formulação.

Tabela 5.10 – Resumo das Formulações 1,2 e 3 utilizando Busca em Profundidade

| Formulação | Busca em profundidade | | |
|------------------------------------|-----------------------|----------|----------|
| | F1 | F2 | F3 |
| Chaves abertas | 6-7 | 6-7 | 6-7 |
| | 8-9 | 8-9 | 8-9 |
| | 13-14 | 13-14 | 13-14 |
| | 24-28 | 24-28 | 24-28 |
| | 31-32 | 31-32 | 31-32 |
| Perda total da solução obtida (kW) | 139.6280 | 127.3557 | 127.3557 |
| Tempo de processamento (s) | <0.001 | 0.0160 | 0.0630 |

Tabela 5.11 - Resumo das Formulações 1,2 e 3 utilizando *Branch and Bound*

| Formulação | Branch and Bound | | |
|------------------------------------|------------------|----------|----------|
| | F1 | F2 | F3 |
| Chaves abertas | 6-7 | 6-7 | 6-7 |
| | 8-9 | 8-9 | 8-9 |
| | 13-14 | 13-14 | 13-14 |
| | 24-28 | 24-28 | 24-28 |
| | 30-31 | 31-32 | 31-32 |
| Perda total da solução obtida (kW) | 139.0922 | 127.3557 | 127.3557 |
| Tempo de processamento (s) | 5.7500 | 6.9220 | 32.7030 |

Nas tabelas anteriores (tabelas 5.10 e 5.11) pode-se observar que a solução ótima obtida através da Formulação 2 é diferente do resultado obtido para a Formulação 1. Sendo utilizada a mesma rede elétrica (rede de Baran e Wu) para testar ambas formulações, esta diferença se deve a que a Formulação 2 constitui um modelo mais aprimorado, e portanto, fornece uma solução diferente. No caso da Formulação 1 foi utilizado um valor de fator de potência igual a 0.85 para todas as cargas, enquanto nas formulações 2 e 3 foi considerado o fator de potência real da rede elétrica.

Em relação à Formulação 3, quando a restrição de tensão mínima não é imposta esta Formulação funciona da mesma maneira que a Formulação 2, portanto a solução obtida deve que ser igual em ambos casos.

Pode-se observar também que a solução ótima obtida através das Formulações 2 e 3 utilizando a Busca em Profundidade é a mesma solução que a obtida utilizando o método de *Branch and Bound*. A diferença está nos tempos de processamento, que no caso da Busca em Profundidade são desprezíveis.

5.3 Análise do parâmetro K .

Como foi mencionado no Capítulo 3, os valores práticos para o parâmetro K (peso dos termos de penalidade na PLK) podem ser obtidos através de experimentação. O critério para considerar um determinado valor de K como adequado está baseado na proporção

entre a restrição de PLK total (representado pelo segundo termo na Eq.(3.7)) e a perda total (o primeiro termo na Eq.(3.7)). A tabela 5.12 mostra este procedimento.

Tabela 5.12 - Análise do parâmetro K

| K | Perda total (pu) (A) | PLK total (pu) (B) | B/A |
|--------|-------------------------|-----------------------|---------|
| 10^4 | 1.390096e-3 | 3.119396e-6 | 2.24e-3 |
| 10^6 | 1.396280e-3 | 3.135703e-8 | 2.25e-5 |
| 10^8 | 1.396343e-3 | 3.135867e-10 | 2.25e-7 |

Tomemos, por exemplo, o resultado para $K=10^6$ (o valor utilizado em todos os casos deste trabalho). O valor de desvio da PLK total é justamente 0.0000225 vezes o valor da perda total, o que faz o desvio PLK perfeitamente insignificante (em outras palavras, a restrição da PLK foi forçada de forma apropriada).

Pode-se ver que o desvio da PLK total tende a zero como o parâmetro K tende a infinito. Na prática, os valores máximos para o parâmetro K surgem de limitações inerentes às máquinas de precisão finita (perda de precisão quando se adicionam termos com ordens de magnitude substancialmente diferentes). Desde um ponto de vista prático, valores entre 10^4 e 10^6 têm provado ser adequados para assegurar precisão suficiente em todos os casos. Esta conclusão normalmente não depende do problema como tal, devido ao uso de valores por unidade (pu) nas formulações, valores esses que são quase sempre da mesma ordem de magnitude, independentemente da rede elétrica considerada.

5.4 Precisão do modelo de fluxo de potência

A tecnologia de medição moderna tem reduzido rapidamente as incertezas associadas com os dados das cargas em sistemas de distribuição. Em sistemas de distribuição reais, os consumidores de baixa tensão são representados por curvas de carga típicas que se utilizam em conjunto com o valor de energia mensal fornecido pelo sistema de faturamento (que representa um parâmetro de entrada preciso). Os consumidores de média tensão possuem equipamentos que realizam a medição da potência ativa e reativa em função do tempo,

entre outros parâmetros. As subestações de distribuição conservam registros detalhados de todas as variáveis elétricas (tensão, corrente, potência) de cada alimentador primário. Todo este progresso permite o desenvolvimento de modelos de carga sofisticados que fornecem valores precisos de demanda diversificada em cada ponto de carga no sistema de distribuição, permitindo assim a utilização de modelos sofisticados para cálculo de fluxo de potência.

A tabela 5.13 mostra uma comparação entre tensões obtidas utilizando o modelo proposto e tensões calculadas através do modelo de Newton-Raphson. Nesta tabela estão incluídas somente as 5 barras com maiores diferenças de tensão.

Tabela 5.13- Precisão do modelo de fluxo de potência

| Barras | Tensão obtida p/ método Newton- Raphson (pu) (A) | Tensão obtida pelo modelo proposto (pu) (B) | Diferença relativa (%) [100*(B-A)/A] |
|---------------|---|--|---|
| 8 | 0.9609 | 0.9610 | 0.01 |
| 7 | 0.9641 | 0.9642 | 0.01 |
| 9 | 0.9641 | 0.9642 | 0.01 |
| 10 | 0.9642 | 0.9643 | 0.01 |
| 11 | 0.9645 | 0.9646 | 0.01 |

Um resultado similar foi obtido no caso das perdas, onde o valor calculado através do modelo de Newton-Raphson foi 127.484 kW, enquanto o valor calculado com o modelo proposto foi 127.3557 kW (ref. Tabela 5.11). Estas diferenças tão pequenas, em termos de tensão e perda total, mostram uma excelente concordância entre o modelo de fluxo de potência proposto e o modelo Newton-Raphson.

Finalmente, é importante mencionar que o maior ângulo de desvio foi observado na barra 32, com uma diferença de -0.98 graus com relação à barra de referência (gerador na barra 0). Isto valida a simplificação adotada no cálculo da queda de tensão, como foi explicado no item 4.2.

5.5 Caso 2

A figura 5.3 mostra a rede elétrica para o Caso 2. Trata-se de uma rede de Distribuição real, que possui 5 alimentadores primários com características urbanas e rurais misturadas, totalizando 1,107 barras de carga, 5 barras de geração, 999 ligações sem chave e 129 ligações com chave. A condição necessária de radialidade exige que a solução radial para este sistema tenha 108 chaves fechadas (=1,107-999) e, portanto, 21 chaves abertas (=129-108).

Os principais dados desta rede são mostrados na tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Principais dados da rede do Caso 2

| Parâmetro | Valor |
|--|--|
| Número de barras de carga | 1.107 |
| Número de barras de geração | 6 |
| Número de ligações sem chave | 999 |
| Número de ligações com chave | 129 |
| Número final de chaves NF | $1.107 - 999 = 108$ |
| Número final de chaves NA | $129 - 108 = 21$ |
| Número de soluções com 21 chaves abertas e 108 chaves fechadas | $C_{21}^{129} = C_{108}^{129} = \frac{129!}{21!108!} \cong 7,35 \cdot 10^{23}$ |
| Demanda máxima total (kW) | 20.228,787 |

O número de soluções possíveis para esta rede é 2^{129} ; sendo este valor superior a 10^{38} isto inviabiliza a determinação da solução ótima e das primeiras sub-ótimas através de busca exaustiva. Além disso, o número de soluções com 21 chaves abertas e 108 chaves fechadas ($7,35 \cdot 10^{23}$) também é grande demais do ponto de vista de cálculo computacional, o que não permitiu obter a solução ótima através do Método *Branch and Bound*.

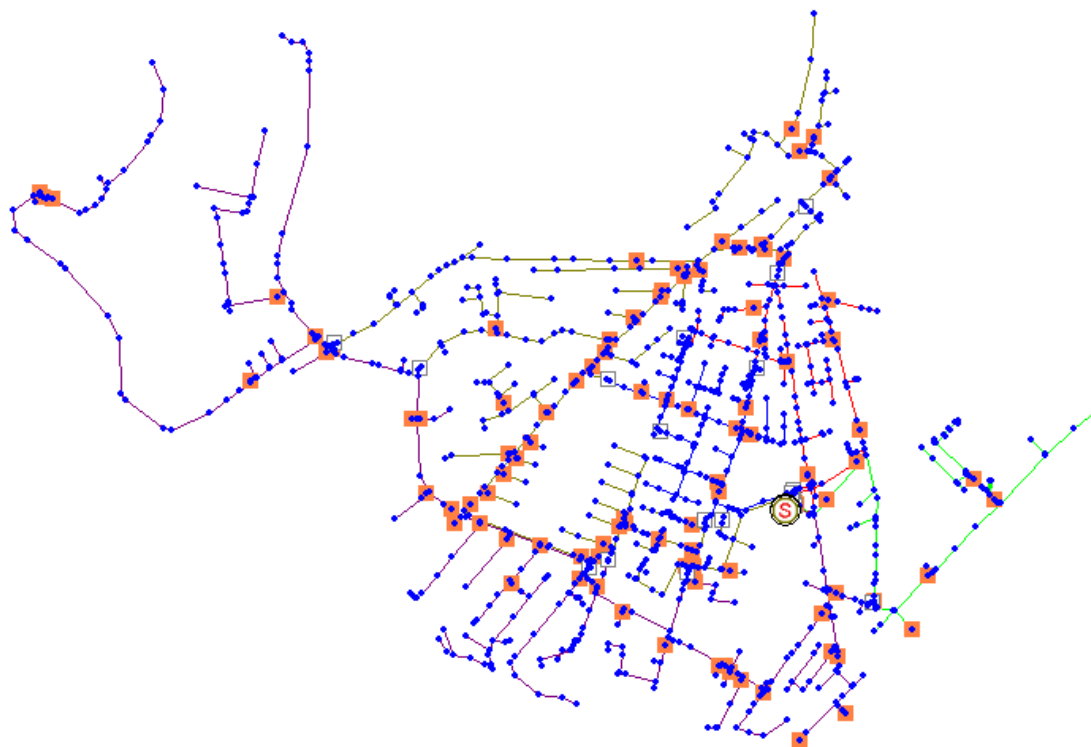


Figura 5.3 – Rede elétrica para o Caso 2

5.5.1 Aplicação da Formulação 2 e Formulação 3 à rede elétrica do Caso 2

Neste sistema todas as cargas possuem fator de potência igual a 1.0, o que traz como consequência que as Formulações 1 [8] e 2 obtenham a mesma solução com os dois métodos de Busca em Profundidade (Método A e Método B) utilizados.

A seguir, na tabela 5.15, mostram-se os dados de estudo para a aplicação da Formulação 2 e Formulação 3 na rede elétrica utilizada neste caso de estudo.

Tabela 5.15- Dados de estudo para a rede elétrica do Caso 2

| Parâmetro | Valor |
|--|------------|
| Tolerância em corrente - Método de Newton (pu) | 10^{-10} |
| Parâmetro K | 10^6 |
| Perda total na condição inicial (antes da otimização) (kW) | 183.8291 |

A tabela 5.16 apresenta os principais resultados obtidos utilizando os Métodos A e B de Busca em Profundidade nas Formulações 2 e 3.

Tabela 5.16 – Resultados da otimização para a rede do Caso 2

| Parâmetro | Método A | Método B |
|---|---|---|
| Perda total na condição inicial (kW) | 183.8291 | |
| Perda total da melhor solução (kW) | 144.9565 | 128.2839 |
| Redução de perda em relação à condição inicial (%) | 21.15 | 30.21 |
| Número de cálculos de fluxos de potência | 23 | 65 |
| Chaves abertas pela otimização (em relação à condição inicial) | 3625-3634 3736-3779 3750-3751 4275-4303 4320-4354 4394-4400 4457-4539 4677-4678 | 3625-3634 3736-3779 3750-3751 3988-4038 4320-4354 4394-4400 4457-4539 4677-4678 |
| Chaves fechadas pela otimização (em relação à condição inicial) | 3584-4690 3600-3781 3616-3791 3641-4399 3724-4631 3847-4387 4024-4363 4313-4348 | 3584-4690 3600-3781 3616-3791 3641-4399 3724-4631 3847-4387 3986-4332 4313-4348 |

A tabela 5.17 mostra os tempos de processamento obtidos com as Formulações 2 e 3 com cada método de busca (Método A e Método B); os tempos da Formulação 1 são mostrados para uma melhor comparação.

Tabela 5.17 – Tempos de processamento no Caso 2

| | Tempos de processamento (s) | | |
|-----------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|
| | Formulação 1 | Formulação 2 | Formulação 3 |
| Método A | 5.625 | 7.579 | 19.375 |
| Método B | 9.359 | 12.625 | 39.672 |

Na tabela 5.18 são apresentados os valores finais (mínimo, máximo, médio e desvio padrão) para as tensões nas barras de carga, obtidos após a reconfiguração utilizando os Métodos A e B de Busca em Profundidade com a Formulação 3.

Tabela 5.18 – Tensões resultantes nas barras de carga

| Formulação 3 | Método A | Método B |
|---------------------|-----------------|-----------------|
| Vmin (pu) | 0.9697 | 0.9715 |
| Vmax (pu) | 1.0000 | 1.0000 |
| Vmed (pu) | 0.9905 | 0.9921 |
| Desvio padrão | 0.0045 | 0.0045 |

5.6 Resumo e discussão

Neste capítulo foi apresentada a aplicação da metodologia desenvolvida através das Formulações 2 e 3, em conjunto com os métodos de busca inteira: Busca em Profundidade e *Branch and Bound*, em duas redes de distribuição de tamanhos diferentes, correspondentes ao Caso 1 e Caso 2.

No Caso 1 foi utilizada a rede elétrica proposta por Baran e Wu em [5], a qual tem-se tornado um padrão para testes de algoritmos de reconfiguração em sistemas de distribuição. Nesta rede a aplicação dos Métodos A (realizando um cálculo aproximado do incremento das perdas) e B (o incremento de perdas é estimado através de cálculo exato de fluxo de potência) de Busca em Profundidade forneceu os mesmos resultados. Com ambos os métodos foi obtida a solução ótima para as Formulações 2 e 3. Esta solução é diferente da solução ótima obtida pela aplicação da Formulação 1, devido a que as formulações desenvolvidas neste trabalho são modelos mais aprimorados, onde se consideram as cargas com seus próprios valores de fator de potência e se melhora o perfil de tensão da rede. Também foram modificados os fatores de potência das cargas e, através da Formulação 2, obtiveram-se outras configurações da rede.

Foi visto também que quando não se aplica a restrição de tensão mínima na Formulação 3, a solução obtida é igual à solução da Formulação 2. Quando a restrição de tensão mínima é aplicada, o programa de otimização procura satisfazer esta restrição para todas as barras, por este motivo são obtidos valores de perdas diferentes para distintos valores de V_{min} . Assim, nos cálculos em que esta restrição foi fixada em valores baixos ($V_{min} < 0.95$) a restrição de tensão mínima não resultou atuante devido a que as tensões nas barras já tinham valores maiores que a tensão mínima estabelecida. Para estes casos a perda total obtida foi igual à Formulação 2.

Quando se fixaram valores de tensão mínima V_{min} acima de 0.95, não foi possível satisfazer a restrição em todas as barras. Mesmo assim o algoritmo de otimização conseguiu satisfazer a restrição de tensão mínima em algumas barras, ocasionando um aumento da perda total.

No Caso 2 foi testada uma rede elétrica real, de tamanho muito maior que a de Baran e Wu utilizada no caso anterior. Através dos resultados obtidos foi constatada uma redução significativa na perda total através dos Métodos A e B (21,15% e 30,21% respectivamente). Com o Método B obtém-se uma solução melhor que com o Método A, com o detrimento de um tempo de processamento ligeiramente maior.

A análise do parâmetro K , que define o peso dos termos de penalidade na PLK, provou que o valor escolhido é adequado para assegurar que na solução final o desvio da PLK seja insignificante face à perda total.

Os valores de tensões e perdas, obtidas com a utilização do modelo de fluxo de potência utilizado neste trabalho, foram comparados a esses mesmos valores calculados através do modelo de Newton-Raphson; o estudo comparativo mostrou uma excelente concordância entre ambos os métodos.

Capítulo 6

CONCLUSÕES

6.1 Introdução

A finalidade deste trabalho consistiu em desenvolver, implementar e validar uma metodologia capaz de resolver o problema de redução da perda total por efeito Joule, através da reconfiguração de redes de Distribuição. Neste Capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho assim como suas principais contribuições.

6.2 Conclusões e contribuições

Neste trabalho foram apresentadas duas novas formulações convexas para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica, com o objetivo principal de obter perdas mínimas. Na parte contínua do problema foi utilizado o Método de Newton, especificamente para o cálculo das correntes nas ligações e das tensões nas barras. Em relação à parte inteira do problema, os métodos de Busca em Profundidade (Método A e Método B), e o *Branch and Bound* mostraram-se eficientes na seleção das chaves a serem abertas, de forma a minimizar a perda total por efeito Joule em sistemas de distribuição.

As principais contribuições deste trabalho foram:

- Desenvolvimento e implementação de duas novas formulações convexas (Formulação 2 e Formulação 3) para o problema de reconfiguração de redes de distribuição;
- Prova de convexidade da Formulação 1;
- Estudos de aplicação para validar as Formulações 1 e 2.

Através da Formulação 2 foi possível obter a solução ótima do problema em redes elétricas, cujas cargas foram representadas por seus próprios fatores de potência, diferentemente da Formulação 1 onde foi utilizado um único fator de potência para todas as cargas. Por outro lado, o custo computacional não foi afetado pela Formulação 2, devido a que a matriz Hessiana é fatorada apenas uma vez para resolver dois conjuntos de equações lineares independentes.

Na Formulação 3 foi implementado o cálculo de tensões nas barras de carga da rede elétrica. Para obter os valores de correntes nas ligações e tensões nas barras com o Método de Newton foi utilizada uma simplificação comum em sistemas de distribuição, na qual a variação nos ângulos de fase das tensões entre nós é muito pequena. Nesta formulação também foi incluída a restrição de tensão mínima, que para evitar conflito entre as restrições, não foi considerada nas iterações do Método de Newton, e sim na busca binária onde se determina o estado aberto ou fechado das chaves. Também, os resultados obtidos com esta formulação apresentaram uma excelente concordância com os resultados do modelo completo de Newton-Raphson, o que valida o modelo de fluxo de potência utilizado. Nesta formulação o custo computacional aumentou, e neste caso a matriz Hessiana é grande e não pode ser subdividida como na Formulação 2.

Um aspecto importante para as formulações é a convexidade da função objetivo, a qual foi provada de forma analítica. O fato da função ser convexa assegura que a função objetivo tem um ponto de mínimo e que este é único, ou seja, o mínimo sempre é global. Esta característica faz do Método de Newton o método de escolha por excelência para problemas quadráticos como o que se apresentou neste trabalho; isto se deve a que este método garante então a convergência para o ponto de mínimo em uma única iteração.

Os tempos de processamento obtidos no caso do estudo que utilizou a rede real de distribuição (Caso 2), se adaptam aos requerimentos dos sistemas de operação, permitindo que a metodologia desenvolvida neste trabalho possa ser utilizada em aplicações em tempo real.

O estudo de aplicação do Método de Newton em conjunto com o método *Branch and Bound* para a rede de distribuição real não foi apresentado neste trabalho; para este caso os tempos de processamento superam o que seria considerado aceitável. .

6.3 Tópicos para desenvolvimento posterior

A seguir sugerem-se alguns tópicos para desenvolvimentos futuros:

- Implementar e validar a formulação apresentada para inclusão de capacitores nas barras com tensão abaixo da mínima.
- Estudar a possibilidade de representar os capacitores através de variáveis discretas.
- Inclusão de taps de transformadores como variáveis independentes no problema, de forma a manter o perfil de tensão desejado nas barras.
- Realizar modificações na formulação do problema de reconfiguração que permitam a utilização de reguladores de tensão para corrigir os baixos níveis e obter, ao mesmo tempo, uma diminuição nas perdas totais do sistema.
- Aprimorar o método *Branch and Bound* com o objetivo de diminuir o tempo de processamento, e permitir utiliza-lo em redes de grande porte para aplicações em tempo real.
- Uma possível extensão do presente trabalho é o estudo de reconfiguração de redes buscando minimizar a energia perdida em um determinado período de tempo, por exemplo, um dia, ou uma semana ou ainda um mês. Este estudo implica estudar a rede e sua carga em diferentes condições de operação, o que naturalmente elevaria o custo computacional em relação à situação atual, na qual apenas um instante de carga é analisado (normalmente, o instante de demanda máxima).

Uma primeira abordagem simplificada para o estudo de reconfiguração baseado na energia perdida pode ser estabelecida quando a rede de distribuição possui cargas homogêneas (cargas que variam no tempo da mesma forma). Supondo que a perda total no instante de ponta seja p_t , e ainda que num instante diferente qualquer, todas as cargas resultem multiplicadas pelo fator $k < 1$ em relação ao valor de ponta, então a perda total no outro instante será $k^2 * p_t$, e a configuração de perda mínima do instante analisado será a idêntica à configuração de perda mínima no instante de ponta. Desta forma, é possível reduzir substancialmente o custo computacional em relação à situação onde todos os instantes de carga são analisados independentemente dos demais.

Deve-se destacar, entretanto, que esta particularidade somente é válida desde que as restrições de carregamento máximo e tensão mínima não sejam violadas em nenhum dos instantes, pois a ocorrência delas faz com que o algoritmo de busca inteira procure soluções diferentes em caso de violação das mesmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. DE; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. 328 p.
- [2] KAGAN, N. **Configuração de redes de distribuição através de algoritmos genéticos e tomada de decisão fuzzy**. 1999.167p. Tese (livre docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- [3] MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: 5th POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE - PSCC, Cambridge, UK, v. 1, p.1-18, 1975.
- [4] CIVANLAR, S.; GRAINGER, J. J.; YIN, H.; LEE, S. S. H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.3, Issue 3, p.1217-1223, July 1988.
- [5] BARAN, M.E.; WU, F.F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.4, n.2, p. 1401-1407, April. 1989.
- [6] GOSWAMI, S. K.; BASU, S. K. A new algorithm for the reconfiguration of distribution feeders for loss minimization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.7, Issue 3, p.1484-1491, July. 1992.
- [7] SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line loss reduction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, V. 4, Issue 2, p. 1492-1498, April. 1989.
- [8] SCHMIDT, H.P. **Reconfiguração de Redes de distribuição através de programação não-linear inteira mista**. 2005. 120p. Tese (livre docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2005.
- [9] SCHMIDT, H.P.; GARCÍA, A.M.; KAGAN, N.; GOUVÊA, M.R.; MARTIN, P.A. Reconfiguración de sistemas de distribución utilizando el Método de Newton en formulaciones convexas. Artigo aprovado pela **Revista IEEE América Latina**.

- [10] KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.C.B. DE; SCHMIDT, H.P.; KAGAN, H. **Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência**. São Paulo, 2005, 200p, ISBN 85-905144-1-2.
- [11] LIU, C. C.; LEE, S. J.; VU, K. Loss minimization of distribution feeders: optimality and algorithms. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.4, Issue 2, p.1281-1289, April 1989.
- [12] CHEN, S.; CHO, M.Y. Energy loss reduction by critical switches. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.8, Issue 3, p.1246-1253, July 1993.
- [13] HSU, Y.Y.; YI, J.H. Planning of distribution feeder reconfiguration with protective device coordination. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.8, Issue 3, p.1340-1347, July 1993.
- [14] CHERKAOUI, R.; BART, A.; GERMOND, A. J. Optimal configuration of electrical distribution networks using heuristic methods. In: 11th POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE - PSCC, Avignon, France, v.1, p.147-154, 1993.
- [15] TALESKI, R.; RAJICIC, D. Distribution network reconfiguration for energy loss reduction. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.12, Issue 1, p.398-406, February 1997.
- [16] KAGAN, N.; DE OLIVEIRA, C. C. B. Fuzzy decision model for the reconfiguration of distribution networks using genetic algorithms. In: 13TH POWER SYSTEMS COMPUTATION CONFERENCE - PSCC, Trondheim, Norway, 1999.
- [17] KASHEM, M. A.; GANAPATHY, V.; JASMON, G. B.; BUHARI, M. I. A novel method for loss minimization in distribution networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC UTILITY DEREGULATION AND RESTRUCTURING AND POWER TECHNOLOGIES 2000, City University, London, UK, 4-7 April 2000, p 251-256.
- [18] CHIN, H. C.; HUANG, K.Y. A simple distribution reconfiguration algorithm for loss minimization. **Proceedings of the IEEE Conference on Power System Technology (Power Con 2000)** v.2, 4-7 December 2000.
- [19] BROWN, R. E. Network reconfiguration for improving reliability in distribution systems. **2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting**, v.4, 13-17 July 2003.

- [20] NARA, K.; MISHIMA, Y.; SATOH, T. Network reconfiguration for loss minimization and load balancing. **2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting**, v.4, 13-17 July 2003.
- [21] AUGUGLIARO, A.; DUSONCHET, L.; IPPOLITO, M. G.; SANSEVERINO, E. R. Minimum losses reconfiguration of MV distribution networks through local control of tie-switches. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.18, Issue 3, p.762-771, July 2003.
- [22] SU, C.T.; LEE, C.S. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, Issue 3, p. 1022-1027, July 2003.
- [23] VENKATESH, B.; RANJAN, R.; GOOI, H.B. Optimal reconfiguration of radial distribution systems to maximize loadability. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, Issue 1, p. 260-266, February 2004.
- [24] LÓPEZ, E.; OPAZO, H.; GARCÍA, L.; BASTARD, P. Online reconfiguration considering variability demand: applications to real networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.19, Issue 1, p. 549-553, February 2004.
- [25] ROMERO, E.; GÓMEZ, A.; RIQUELME, J.; LLORENS, F. Path-Based distribution network modeling: Application to reconfiguration for Loss Reduction. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.20, n.2, May 2005.
- [26] GOMES, F.V.; CARNEIRO, S.JR.; PEREIRA, J.L.R.; VINAGRE, M.P.; GARCIA, P.A.N.; ARAUJO, L.R. A New Heuristic Reconfiguration Algorithm for Large Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.20, Issue 3, p.1373-1378, August 2005.
- [27] SALAZAR, H.; GALLEGO, R.; ROMERO, R. Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.21, Issue: 3, p.1735-1742, July 2006.
- [28] PEREIRA, F.S.; VITTORI, K.; DA COSTA, G.R.M. Distribution System Reconfiguration for Loss Reduction Based on Ant Colony Behavior. In: TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES, p.1-5, August. 2006.

- [29] CHOI, S.Y. Heuristic approach for loss reduction in distribution networks. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2006 IEEE, 18-22 June 2006.
- [30] ZHU, J.; XIONG, X.; HWANG, D.; SADIADPOUR, A. A Comprehensive Method for Reconfiguration of Electrical Distribution Network. In: POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2007. IEEE 24-28, p.1-7 June 2007.
- [31] OLIVEIRA, C.C.B. DE; SCHMIDT, H.P.; KAGAN, N.; ROBBA, E.J. **Introdução a sistemas elétricos de potência - componentes simétricas**. São Paulo: Edgard Blücher, 2^a edição, 2000.
- [32] CICHOCKI, A.; UNBEHAUEN, R. **Neural networks for optimization and signal processing**. John Wiley and Sons, 1993.
- [33] FLETCHER, R. **Practical methods of optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [34] FRIETZSCHE, H. **Programação Não Linear**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977
- [35] ABADIE, J. **Nonlinear programming**. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [36] HIMMELBLAU, D.M. **Applied Nonlinear Programming**. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [37] HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to operations research**. New York: McGraw-Hill, 1997.
- [38] NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and combinatorial optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

Apêndice A

DADOS DAS REDES ELÉTRICAS

Neste apêndice encontram-se os dados completos da rede utilizada como exemplo (rede exemplo) e o sistema utilizado no Caso 1.

A.1 Rede Exemplo

A figura A.1 apresenta o diagrama da Rede Exemplo. A tensão nominal desta rede é 13,8 kV. Os dados de nós, ligações e cabos são apresentados nas tabelas A.1.1, A.1.2 e A.1.3, respectivamente.

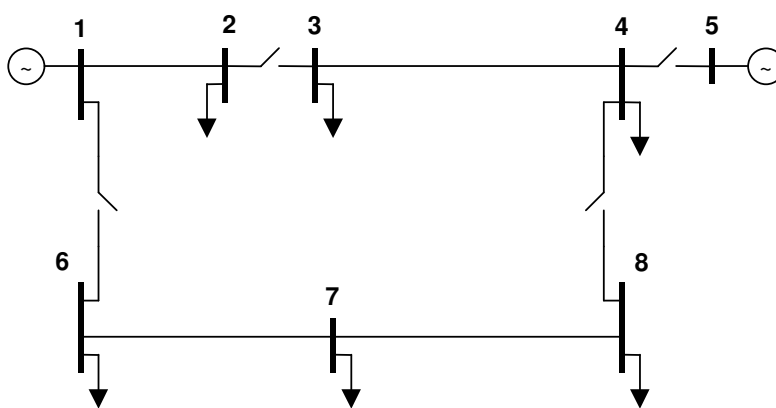


Figura A.1- Rede Exemplo

Tabela A.1.1 - Dados de nós da Rede Exemplo

| Nó | Tipo | Potência ativa de carga (kW) | Pot. reativa de carga (kVAr) |
|----|--------------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | Geração (SE) | - | - |
| 2 | Carga | 800 | 550 |
| 3 | Carga | 900 | 600 |
| 4 | Carga | 700 | 525 |
| 5 | Geração (SE) | - | - |
| 6 | Carga | 1500 | 1120 |
| 7 | Carga | 700 | 550 |
| 8 | Carga | 1200 | 900 |
| | Total | 5800 | 4245 |

Tabela A.1.2 - Dados de ligações da Rede Exemplo

| Nó inicial | Nó final | Chave? | Comprimento (km) | Cabo |
|------------|----------|--------|------------------|-----------|
| 1 | 2 | Não | 0,5 | 336.4 MCM |
| 1 | 6 | Sim | 0,7 | 336.4 MCM |
| 2 | 3 | Sim | 0,8 | 336.4 MCM |
| 3 | 4 | Não | 2,3 | 4/0 AWG |
| 4 | 5 | Sim | 0,4 | 336.4 MCM |
| 4 | 8 | Sim | 1,0 | 336.4 MCM |
| 6 | 7 | Não | 3,0 | 336.4 MCM |
| 7 | 8 | Não | 2,5 | 4/0 AWG |

Tabela A.1.3 - Dados de cabos da Rede Exemplo

| Código da bitola | Resistência (Ω/km) | Reatância (Ω/km) | Corrente admissível (A) |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 336.4 MCM | 0,2 | 0,4 | 400 |
| 4/0 AWG | 0,4 | 0,4 | 250 |
| 1/0 AWG | 1,0 | 0,4 | 125 |

A.2 Sistema de 33 barras (Baran e Wu)

A figura A.2 apresenta o sistema de 33 barras e tensão nominal de 12,66 kV proposto por Baran e Wu [5]. Os dados de nós, ligações e cabos são apresentados nas tabelas A.2.1, A.2.2 e A.2.3, respectivamente.

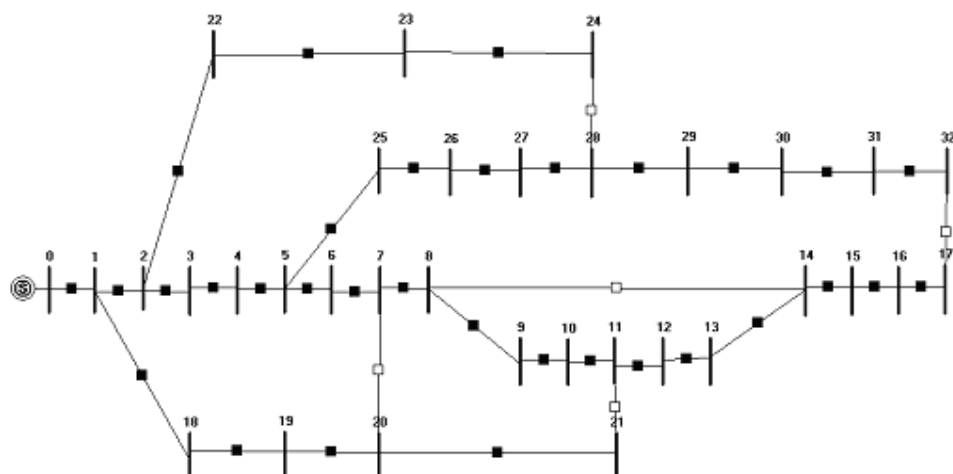


Figura A.2 – Sistema de 33 barras

Tabela A.2.1 - Dados de nós do sistema de 33 barras

| Nó | Tipo | Pot. ativa de carga (kW) | Nó | Tipo | Pot. ativa de carga (kW) | |
|----|-------|--------------------------|----|-------|--------------------------|---|
| 1 | Carga | 99,154 | 18 | Carga | 83,739 | |
| 2 | | 83,739 | 19 | | 83,739 | |
| 3 | | 122,623 | 20 | | 83,739 | |
| 4 | | 57,036 | 21 | | 83,739 | |
| 5 | | 53,774 | 22 | | 87,538 | |
| 6 | | 190,120 | 23 | | 395,522 | |
| 7 | | 190,120 | 24 | | 395,522 | |
| 8 | | 53,774 | 25 | | 55,266 | |
| 9 | | 53,774 | 26 | | 55,266 | |
| 10 | | 45,984 | 27 | | 53,774 | |
| 11 | | 59,060 | 28 | | 118,119 | |
| 12 | | 59,060 | 29 | | 537,739 | |
| 13 | | 122,623 | 30 | | 140,740 | |
| 14 | | 51,718 | 31 | | 197,761 | |
| 15 | | 53,774 | 32 | | 61,312 | |
| 16 | | 53,774 | 0 | | Geração (SE) | - |
| 17 | | 83,739 | | | | |

Tabela A.2.2 - Dados de ligações do sistema de 33 barras

| Nó inicial | Nó final | Tipo | Compr. (km) | Cabo |
|------------|----------|-----------|-------------|-------|
| 0 | 1 | Com chave | 1,0 | 00-01 |
| 1 | 2 | | | 01-02 |
| 1 | 18 | | | 01-18 |
| 2 | 3 | | | 02-03 |
| 2 | 22 | | | 02-22 |
| 3 | 4 | | | 03-04 |
| 4 | 5 | | | 04-05 |
| 5 | 6 | | | 05-06 |
| 5 | 25 | | | 05-25 |
| 6 | 7 | | | 06-07 |
| 7 | 8 | | | 07-08 |
| 7 | 20 | | | 07-20 |
| 8 | 9 | | | 08-09 |
| 8 | 14 | | | 08-14 |
| 9 | 10 | | | 09-10 |
| 10 | 11 | | | 10-11 |
| 11 | 12 | | | 11-12 |
| 11 | 21 | | | 11-21 |
| 12 | 13 | | | 12-13 |
| 13 | 14 | | | 13-14 |
| 14 | 15 | | | 14-15 |
| 15 | 16 | | | 15-16 |
| 16 | 17 | | | 16-17 |
| 17 | 32 | | | 17-32 |
| 18 | 19 | | | 18-19 |
| 19 | 20 | | | 19-20 |
| 20 | 21 | | | 20-21 |
| 22 | 23 | | | 22-23 |
| 23 | 24 | | | 23-24 |
| 24 | 28 | | | 24-28 |
| 25 | 26 | | | 25-26 |
| 26 | 27 | | | 26-27 |
| 27 | 28 | | | 27-28 |
| 28 | 29 | 28-29 | | |
| 29 | 30 | 29-30 | | |
| 30 | 31 | 30-31 | | |
| 31 | 32 | 31-32 | | |

Tabela A.2.3 - Dados de cabos do sistema de 33 barras

| Código da bitola | Resistência (Ω/km) | Reatância (Ω/km) | Corrente admissível (A) |
|------------------|------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 00-01 | 0,0922 | 0,0470 | 500 |
| 01-02 | 0,4930 | 0,2511 | 500 |
| 02-03 | 0,3660 | 0,1864 | 500 |
| 03-04 | 0,3811 | 0,1941 | 500 |
| 04-05 | 0,8190 | 0,7070 | 500 |
| 05-06 | 0,1872 | 0,6108 | 500 |
| 06-07 | 0,7114 | 0,2351 | 500 |
| 07-08 | 1,0300 | 0,7400 | 500 |
| 08-09 | 1,0440 | 0,7400 | 500 |
| 09-10 | 0,1966 | 0,0650 | 500 |
| 10-11 | 0,3744 | 0,1238 | 500 |
| 11-12 | 1,4680 | 1,1550 | 500 |
| 12-13 | 0,5416 | 0,7129 | 500 |
| 13-14 | 0,5910 | 0,5260 | 500 |
| 14-15 | 0,7463 | 0,5450 | 500 |
| 15-16 | 1,2890 | 1,7210 | 500 |
| 16-17 | 0,7320 | 0,5740 | 500 |
| 01-18 | 0,1640 | 0,1565 | 500 |
| 18-19 | 1,5042 | 1,3554 | 500 |
| 19-20 | 0,4095 | 0,4784 | 500 |
| 20-21 | 0,7089 | 0,9373 | 500 |
| 02-22 | 0,4512 | 0,3083 | 500 |
| 22-23 | 0,8980 | 0,7091 | 500 |
| 23-24 | 0,8960 | 0,7011 | 500 |
| 05-25 | 0,2030 | 0,1034 | 500 |
| 25-26 | 0,2842 | 0,1447 | 500 |
| 26-27 | 1,0590 | 0,9337 | 500 |
| 27-28 | 0,8042 | 0,7006 | 500 |
| 28-29 | 0,5075 | 0,2585 | 500 |
| 29-30 | 0,9744 | 0,9630 | 500 |
| 30-31 | 0,3105 | 0,3619 | 500 |
| 31-32 | 0,3410 | 0,5302 | 500 |
| 07-20 | 2,0000 | 2,0000 | 500 |
| 08-14 | 2,0000 | 2,0000 | 500 |
| 11-21 | 2,0000 | 2,0000 | 500 |
| 17-32 | 0,5000 | 0,5000 | 500 |
| 24-28 | 0,5000 | 0,5000 | 500 |

Apêndice B

RELATÓRIOS DE SAÍDA DO PROGRAMA OTIMIZA

B.1 Relatório de saída do programa Otimiza no Caso 1 - Formulação 2 utilizando o método *Branch and Bound*.

| | |
|---|-----------------|
| Programa: | BB4_PQ |
| Arquivo original: | Baran_Wu_PQ.txt |
| Numero máximo de iterações (Newton): | 20 |
| Tolerância em corrente (pu): | 1e-10 |
| Flag para calculo dos autovalores: | 0 |
| Flag para gerador de números aleatórios: | 0 |
| Fator L: | 1.00e+00 |
| Fator K: | 1.00e+06 |
| Expoente K: | 2 |
| Fator C: | 0.00e+00 |
| Tolerância para descarte de alternativas (%): | 0.000 |
| Numero de barras de carga: | 32 |
| Numero de barras de geração: | 1 |
| Numero total de barras: | 33 |
| Numero de ligações sem chave: | 0 |
| Numero de ligações com chave: | 37 |
| Numero total de ligações: | 37 |
| Numero final de chaves NF: | 32 |
| Numero final de chaves NA: | 5 |
| Estado inicial das chaves | |
| Numero de chaves fechadas: | 37 |
| Numero de chaves abertas: | 0 |
| Numero de iterações (Newton): | 2 |
| Menor autovalor: | |
| Perda total (pu): | 1.133862e-03 |
| PLK total (pu): | 2.181102e-08 |
| Capacidade (pu): | 0.000000e+00 |
| Objetivo (pu): | 1.133883e-03 |
| Numero de ligações em sobrecarga (*): | 0 |

*** Branch & Bound - Andamento da pesquisa ***

| Num. de soluções geradas | ----- Melhor solução ----- | | |
|--------------------------|----------------------------|----|-----------------|
| | Nível | ID | Valor da função |
| 16 | 5 | 5 | 1.273585e-03 |
| 5000 10000 15000 20000 | | | |

Versão da implementação: BB4
 Numero de soluções geradas: 20566
 Numero de soluções validas: 13657
 Numero de soluções invalidas: 6909
 Numero de soluções radiais: 3269
 Numero de soluções descartadas (T1 direto): 12704
 Numero de atualizações da solução ótima (T3): 1
 Numero de soluções radiais armazenadas: 100
 Numero total de chaves: 37

| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 - 1 | 1 - 2 | 1 - 18 | 2 - 3 | 2 - 22 |
| 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 5 - 25 | 6 - 7 |
| 7 - 8 | 7 - 20 | 8 - 9 | 8 - 14 | 9 - 10 |
| 10 - 11 | 11 - 12 | 11 - 21 | 12 - 13 | 13 - 14 |
| 14 - 15 | 15 - 16 | 16 - 17 | 17 - 32 | 18 - 19 |
| 19 - 20 | 20 - 21 | 22 - 23 | 23 - 24 | 24 - 28 |
| 25 - 26 | 26 - 27 | 27 - 28 | 28 - 29 | 29 - 30 |
| 30 - 31 | 31 - 32 | | | |

*** Solução radial 1 ***

ID: 5
 Nivel: 5
 ID do pai: 4
 num_chaves_abertas: 5
 num_chaves_fechadas: 32
 num_total_chaves: 37
 flag_convergência: true
 num_iteracoes: 1
 fatoração_H: 0
 perda_total: 1.273557e-03
 desvio_plk: 2.871304e-08
 desvio_capacidade: 0.000000e+00
 função_objetivo: 1.273585e-03
 menor_autovalor: 0.000000e+00
 Estado das chaves: 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0
 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0

Resumo do processamento

| Função | Cham. | Tempo total proc.(s) | Tempo médio proc.(s) |
|---------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Assemble_Gradient | 54632 | 0.3000 | 0.0000 |
| Assemble_H | 27315 | 1.4120 | 0.0001 |
| Back | 54632 | 0.1510 | 0.0000 |
| Check_Disconnected_Busses | 20567 | 0.2010 | 0.0000 |
| Compute_Power_Flow | 13658 | 3.0350 | 0.0002 |
| Eigen_Symm_Sparse_GSL | 0 | 0.0000 | 0.0000 |
| Solve | 1 | 5.0770 | 5.0770 |
| Triang | 13658 | 0.5410 | 0.0000 |

B.2 Relatório de saída do programa Otimiza no Caso 1 - Formulação 2 utilizando o método Busca em Profundidade.

| | |
|--|-----------------|
| Programa: | BP_PQ |
| Arquivo original: | Baran_Wu_PQ.txt |
| Numero máximo de iterações (Newton): | 20 |
| Tolerância em corrente (pu): | 1e-10 |
| Num. de fluxos de potencia (abertura de chaves): | 0 |
| Flag para calculo dos autovalores: | 0 |
| Flag para gerador de números aleatórios: | 0 |
| Fator L: | 1.00e+00 |
| Fator K: | 1.00e+06 |
| Expoente K: | 2 |
| Fator C: | 0.00e+00 |
| | |
| Numero de barras de carga: | 32 |
| Numero de barras de geração: | 1 |
| Numero total de barras: | 33 |
| | |
| Numero de ligações sem chave: | 0 |
| Numero de ligações com chave: | 37 |
| Numero total de ligações: | 37 |
| Numero final de chaves NF: | 32 |
| Numero final de chaves NA: | 5 |
| | |
| Estado inicial das chaves | |
| Numero de chaves fechadas: | 32 |
| Numero de chaves abertas: | 5 |
| Numero de iterações (Newton): | 1 |
| Menor autovalor: | |
| Perda total (pu): | 1.330884e-03 |
| PLK total (pu): | 3.256963e-08 |
| Capacidade (pu): | 0.000000e+00 |
| Objetivo (pu): | 1.330916e-03 |
| Numero de ligações em sobrecarga (*): | 0 |

Estado inicial das chaves

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1

Estado final das chaves

1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0

Chaves alteradas de FECHADA para ABERTA

6- 7 8- 9 13 - 4 24 - 28 31 - 32

Chaves alteradas de ABERTA para FECHADA

7 - 20 8 - 14 10 - 11 27 - 28 30 - 31

Trajétória da solução

| Pass | N.it | H | Ch.aberta | D | R | Perda total (pu) | PLK total (pu) | Objetivo (pu) |
|------|------|---|-----------|---|---|---------------------|-------------------|------------------|
| 1 | 1 | 0 | | | | 1.133862e-03 | 2.181102e-08 | 1.133883e-03 |
| 2 | 1 | 0 | 31 - 32 | 0 | 1 | 1.139631e-03 | 2.144712e-08 | 1.139653e-03 |
| 3 | 1 | 0 | 8 - 9 | 0 | 1 | 1.139812e-03 | 2.148901e-08 | 1.139834e-03 |
| 4 | 1 | 0 | 13 - 14 | 0 | 1 | 1.142148e-03 | 2.166878e-08 | 1.142170e-03 |
| 5 | 1 | 0 | 6 - 7 | 0 | 6 | 1.153885e-03 | 2.330838e-08 | 1.153909e-03 |
| 6 | 1 | 0 | 24 - 28 | 0 | 6 | 1.273557e-03 | 2.871304e-08 | 1.273585e-03 |

Corrente nas ligações (A / °)

Passo 6 (último) - Número de ligações em sobrecarga (*): 0

| | | |
|---------|---------|--------|
| 0 - 1 | 199.257 | -31.76 |
| 1 - 2 | 129.303 | -35.09 |
| 1 - 18 | 65.279 | -25.22 |
| 2 - 3 | 78.850 | -41.25 |
| 2 - 22 | 47.116 | -25.82 |
| 3 - 4 | 72.335 | -41.93 |
| 4 - 5 | 69.390 | -42.60 |
| 5 - 6 | 10.197 | -26.56 |
| 5 - 25 | 57.099 | -46.62 |
| 6 - 7 | ----- | |
| 7 - 8 | 19.055 | -21.04 |
| 7 - 20 | 29.221 | 157.04 |
| 8 - 9 | ----- | |
| 8 - 14 | 16.174 | -21.50 |
| 9 - 10 | 2.884 | 161.57 |
| 10 - 11 | 5.303 | 154.54 |
| 11 - 12 | 9.741 | -32.57 |
| 11 - 21 | 18.185 | 149.90 |
| 12 - 13 | 6.577 | -33.69 |
| 13 - 14 | ----- | |
| 14 - 15 | 13.474 | -23.96 |
| 15 - 16 | 10.607 | -25.46 |
| 16 - 17 | 7.752 | -28.07 |
| 17 - 32 | 3.288 | -33.69 |

| | | |
|---------|--------|--------|
| 18 - 19 | 60.789 | -25.32 |
| 19 - 20 | 56.299 | -25.42 |
| 20 - 21 | 22.656 | -28.89 |
| 22 - 23 | 42.429 | -25.46 |
| 23 - 24 | 21.214 | -25.46 |
| 24 - 28 | ----- | |
| 25 - 26 | 54.404 | -47.89 |
| 26 - 27 | 51.739 | -49.29 |
| 27 - 28 | 49.286 | -51.01 |
| 28 - 29 | 43.419 | -53.97 |
| 29 - 30 | 18.156 | -25.28 |
| 30 - 31 | 10.607 | -25.46 |
| 31 - 32 | ----- | |

Resumo do processamento

| Função | Cham. | Tempo total proc.(s) | Tempo médio proc.(s) |
|---------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Assemble_Gradient | 28 | 0.0000 | 0.0000 |
| Assemble_H | 12 | 0.0100 | 0.0008 |
| Back | 28 | 0.0000 | 0.0000 |
| Check_Disconnected_Busses | 16 | 0.0000 | 0.0000 |
| Compute_Power_Flow | 7 | 0.0000 | 0.0000 |
| Eigen_Symm_Sparse_GSL | 0 | 0.0000 | 0.0000 |
| Open_Next_Switch_1 | 5 | 0.0000 | 0.0000 |
| Open_Next_Switch_2 | 0 | 0.0000 | 0.0000 |
| Solve | 1 | 0.0100 | 0.0100 |
| Triang | 7 | 0.0000 | 0.0000 |

B.3 Relatório de saída do programa Otimiza no Caso 1 - Formulação 3 utilizando o método *Branch and Bound*

| | |
|---|-----------------|
| Programa: | BB4_PQV |
| Arquivo original: | Baran_Wu_PQ.txt |
| Numero máximo de iterações (Newton): | 20 |
| Tolerância em corrente (pu): | 1e-10 |
| Flag para calculo dos autovalores: | 0 |
| Flag para gerador de números aleatórios: | 0 |
| Fator L: | 1.00e+00 |
| Fator K: | 1.00e+06 |
| Expoente K: | 2 |
| Fator C: | 0.00e+00 |
| Fator DV: | 1.00e-03 |
| Fator Vmin: | 1.00e+02 |
| Tensão mínima (pu): | 0.9000 |
| Tolerância para descarte de alternativas (%): | 0.000 |
| Numero de barras de carga: | 32 |
| Numero de barras de geração: | 1 |
| Numero total de barras: | 33 |
| Numero de ligações sem chave: | 0 |
| Numero de ligações com chave: | 37 |
| Numero total de ligações: | 37 |
| Numero final de chaves NF: | 32 |
| Numero final de chaves NA: | 5 |
| Numero máximo de variáveis: | 106 |
| Estado inicial das chaves | |
| Numero de chaves fechadas: | 32 |
| Numero de chaves abertas: | 5 |
| Numero de iterações (Newton): | 1 |
| Menor autovalor: | |
| Perda total (pu): | 1.330884e-03 |
| PLK total (pu): | 3.256963e-08 |
| Capacidade (pu): | 0.000000e+00 |
| Queda de tensão (pu): | 5.240968e-35 |
| Tensão mínima (pu): | 0.000000e+00 |
| Objetivo (pu): | 1.330916e-03 |
| Numero de ligações em sobrecarga (*): | 0 |

Corrente nas ligações (A / °):

| | | |
|---------|---------|--------|
| 0 - 1 | 199.257 | -31.76 |
| 1 - 2 | 136.930 | -34.48 |
| 1 - 18 | 57.524 | -25.35 |
| 2 - 3 | 49.771 | -25.51 |
| 2 - 22 | 83.793 | -40.36 |
| 3 - 4 | 43.271 | -24.27 |
| 4 - 5 | 40.214 | -24.09 |
| 5 - 6 | 28.557 | -25.54 |
| 5 - 25 | 8.807 | -21.25 |
| 6 - 7 | 18.362 | -24.97 |
| 7 - 8 | 8.174 | -22.99 |
| 7 - 20 | ----- | |
| 8 - 9 | 5.303 | -25.46 |
| 8 - 14 | ----- | |
| 9 - 10 | 2.466 | -33.69 |
| 10 - 11 | ----- | |
| 11 - 12 | 36.408 | -25.60 |
| 11 - 21 | 39.566 | 154.03 |
| 12 - 13 | 33.252 | -25.16 |
| 13 - 14 | 26.766 | -23.07 |
| 14 - 15 | 24.079 | -24.62 |
| 15 - 16 | 21.214 | -25.46 |
| 16 - 17 | 18.355 | -26.57 |
| 17 - 32 | 13.870 | -27.41 |
| 18 - 19 | 53.034 | -25.46 |
| 19 - 20 | 48.545 | -25.60 |
| 20 - 21 | 44.055 | -25.77 |
| 22 - 23 | 79.195 | -41.03 |
| 23 - 24 | 59.034 | -46.57 |
| 24 - 28 | 39.978 | -57.58 |
| 25 - 26 | 5.844 | -20.56 |
| 26 - 27 | 2.884 | -18.43 |
| 27 - 28 | ----- | |
| 28 - 29 | 34.472 | -62.42 |
| 29 - 30 | 7.549 | -25.02 |
| 30 - 31 | ----- | |
| 31 - 32 | 10.607 | 154.54 |

Tensão nas barras (pu):

| | | | | | | | |
|----|--------|----|--------|----|--------|----|--------|
| 1 | 0.9972 | 2 | 0.9869 | 3 | 0.9841 | 4 | 0.9816 |
| 5 | 0.9759 | 6 | 0.9742 | 7 | 0.9723 | 8 | 0.9709 |
| 9 | 0.9700 | 10 | 0.9699 | 11 | 0.9568 | 12 | 0.9477 |
| 13 | 0.9441 | 14 | 0.9414 | 15 | 0.9384 | 16 | 0.9329 |
| 17 | 0.9306 | 18 | 0.9955 | 19 | 0.9814 | 20 | 0.9776 |
| 21 | 0.9713 | 22 | 0.9807 | 23 | 0.9683 | 24 | 0.9592 |
| 25 | 0.9756 | 26 | 0.9754 | 27 | 0.9748 | 28 | 0.9554 |
| 29 | 0.9532 | 30 | 0.9519 | 31 | 0.9285 | 32 | 0.9293 |
| 0 | 1.0000 | | | | | | |

*** Branch & Bound - Andamento da pesquisa ***

| Num. de soluções geradas | ----- Melhor solução ----- | | |
|--------------------------|----------------------------|-------|-----------------|
| | Nível | ID | Valor da função |
| 16 | 5 | 5 | 1.273585e-03 |
| 5000 | 10000 | 15000 | 20000 |

| | |
|---|-------|
| Versão da implementação: | BB4 |
| Numero de soluções geradas: | 20566 |
| Numero de soluções validas: | 13657 |
| Numero de soluções invalidas: | 6909 |
| Numero de soluções radiais: | 3269 |
| Numero de soluções descartadas (T1 direto): | 12704 |
| Numero de atualizações da solução ótima (T3): | 1 |
| Numero de soluções radiais armazenadas: | 100 |
| Numero total de chaves: | 37 |

| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 - 1 | 1 - 2 | 1 - 18 | 2 - 3 | 2 - 22 |
| 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 5 - 25 | 6 - 7 |
| 7 - 8 | 7 - 20 | 8 - 9 | 8 - 14 | 9 - 10 |
| 10 - 11 | 11 - 12 | 11 - 21 | 12 - 13 | 13 - 14 |
| 14 - 15 | 15 - 16 | 16 - 17 | 17 - 32 | 18 - 19 |
| 19 - 20 | 20 - 21 | 22 - 23 | 23 - 24 | 24 - 28 |
| 25 - 26 | 26 - 27 | 27 - 28 | 28 - 29 | 29 - 30 |
| 30 - 31 | 31 - 32 | | | |

*** Solução radial 1 ***

```

ID: 5
Nível: 5
ID do pai: 4
num_chaves_abertas: 5
num_chaves_fechadas: 32
num_total_chaves: 37
flag_convergência: true
num_iterações: 1
fatoracao_H: 0
perda_total: 1.273557e-03
desvio_plk: 2.871304e-08
desvio_capacidade: 0.000000e+00
desvio_deltav: 6.932410e-35
desvio_vmin: 0.000000e+00
função_objetivo: 1.273585e-03
menor_autovalor: 0.000000e+00
Estado das chaves: 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0
                   1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0

```

Resumo do processamento

| Função | Cham. | Tempo total proc.(s) | Tempo médio proc.(s) |
|---------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Assemble_Gradient | 27329 | 0.4510 | 0.0000 |
| Assemble_H | 27315 | 8.4220 | 0.0003 |
| Back | 27329 | 0.3400 | 0.0000 |
| Check_Disconnected_Busses | 20567 | 0.2000 | 0.0000 |
| Compute_Power_Flow | 13658 | 16.6750 | 0.0012 |
| Eigen_Symm_Sparse_GSL | 0 | 0.0000 | 0.0000 |
| Solve | 1 | 24.1950 | 24.1950 |
| Triang | 13658 | 6.6600 | 0.0005 |

B.4 Relatório de saída do programa Otimiza no Caso 1 - Formulação 3 utilizando o método Busca em Profundidade.

| | |
|--|-----------------|
| Programa: | BP_PQV |
| Arquivo original: | Baran_Wu_PQ.txt |
| Numero máximo de iterações (Newton): | 20 |
| Tolerância em corrente (pu): | 1e-10 |
| Num. de fluxos de potencia (abertura de chaves): | 0 |
| Flag para calculo dos autovalores: | 0 |
| Flag para gerador de números aleatórios: | 0 |
| Fator L: | 1.00e+00 |
| Fator K: | 1.00e+06 |
| Expoente K: | 2 |
| Fator C: | 0.00e+00 |
| Fator DV: | 1.00e-06 |
| Fator Vmin: | 0.00e+00 |
| Tensão mínima (pu): | 0.9500 |
| Numero de barras de carga: | 32 |
| Numero de barras de geração: | 1 |
| Numero total de barras: | 33 |
| Numero de ligações sem chave: | 0 |
| Numero de ligações com chave: | 37 |
| Numero total de ligações: | 37 |
| Numero final de chaves NF: | 32 |
| Numero final de chaves NA: | 5 |
| Numero total de variáveis: | 106 |
| Estado inicial das chaves | |
| Numero de chaves fechadas: | 32 |
| Numero de chaves abertas: | 5 |
| Numero de iterações (Newton): | 1 |
| Menor autovalor: | |
| Perda total (pu): | 1.330884e-03 |
| PLK total (pu): | 3.256963e-08 |
| Capacidade (pu): | 0.000000e+00 |
| Queda de tensão (pu): | 5.228459e-38 |
| Tensão mínima (pu): | 0.000000e+00 |
| Objetivo (pu): | 1.330916e-03 |
| Numero de ligações em sobrecarga (*): | 0 |

Corrente nas ligações (A / °):

| | | |
|---------|---------|--------|
| 0 - 1 | 199.257 | -31.76 |
| 1 - 2 | 136.930 | -34.48 |
| 1 -18 | 57.524 | -25.35 |
| 2 - 3 | 49.771 | -25.51 |
| 2 - 22 | 83.793 | -40.36 |
| 3 - 4 | 43.271 | -24.27 |
| 4 - 5 | 40.214 | -24.09 |
| 5 - 6 | 28.557 | -25.54 |
| 5 - 25 | 8.807 | -21.25 |
| 6 - 7 | 18.362 | -24.97 |
| 7 - 8 | 8.174 | -22.99 |
| 7 - 20 | ----- | |
| 8 - 9 | 5.303 | -25.46 |
| 8 -14 | ----- | |
| 9 - 10 | 2.466 | -33.69 |
| 10 - 11 | ----- | |
| 11 - 12 | 36.408 | -25.60 |
| 11 - 21 | 39.566 | 154.03 |
| 12 - 13 | 33.252 | -25.16 |
| 13 - 14 | 26.766 | -23.07 |
| 14 - 15 | 24.079 | -24.62 |
| 15 - 16 | 21.214 | -25.46 |
| 16 - 17 | 18.355 | -26.57 |
| 17 - 32 | 13.870 | -27.41 |
| 18 - 19 | 53.034 | -25.46 |
| 19 - 20 | 48.545 | -25.60 |
| 20 - 21 | 44.055 | -25.77 |
| 22 - 23 | 79.195 | -41.03 |
| 23 - 24 | 59.034 | -46.57 |
| 24 - 28 | 39.978 | -57.58 |
| 25 - 26 | 5.844 | -20.56 |
| 26 - 27 | 2.884 | -18.43 |
| 27 - 28 | ----- | |
| 28 - 29 | 34.472 | -62.42 |
| 29 - 30 | 7.549 | -25.02 |
| 30 - 31 | ----- | |
| 31 - 32 | 10.607 | 154.54 |

Tensão nas barras (pu):

| | | | | | | | |
|----|---------|----|---------|----|---------|----|---------|
| 1 | 0.9972 | 2 | 0.9869 | 3 | 0.9841 | 4 | 0.9816 |
| 5 | 0.9759 | 6 | 0.9742 | 7 | 0.9723 | 8 | 0.9709 |
| 9 | 0.9700 | 10 | 0.9699 | 11 | 0.9568 | 12 | 0.9477* |
| 13 | 0.9441* | 14 | 0.9414* | 15 | 0.9384* | 16 | 0.9329* |
| 17 | 0.9306* | 18 | 0.9955 | 19 | 0.9814 | 20 | 0.9776 |
| 21 | 0.9713 | 22 | 0.9807 | 23 | 0.9683 | 24 | 0.9592 |
| 25 | 0.9756 | 26 | 0.9754 | 27 | 0.9748 | 28 | 0.9554 |

29 0.9532 30 0.9519 31 0.9285* 32 0.9293*
 0 1.0000

Estado inicial das chaves

1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 0 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1

Estado final das chaves

1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0

Chaves alteradas de FECHADA para ABERTA

6 - 7 8 - 9 13 - 14 24 - 28 31 - 32

Chaves alteradas de ABERTA para FECHADA

7 - 20 8 - 14 10 - 11 27 - 28 30 - 31

Trajectoria da solução

| Pass | N.it | H | Ch.ab. | D | R | Perda total (pu) | PLK total (pu) | Capac. (pu) | Delta V (pu) | Objetivo (pu) |
|------|------|---|--------|---|---|------------------|----------------|-------------|--------------|---------------|
| 1 | 2 | 0 | | | | 1.133862e-03 | 2.181102e-08 | 0 | 2.517817e-12 | 1.133883e-03 |
| 2 | 1 | 0 | 31-32 | 0 | 1 | 1.139631e-03 | 2.144712e-08 | 0 | 1.502519e-12 | 1.139653e-03 |
| 3 | 1 | 0 | 8-9 | 0 | 1 | 1.139812e-03 | 2.148901e-08 | 0 | 1.457900e-12 | 1.139834e-03 |
| 4 | 1 | 0 | 13-14 | 0 | 1 | 1.142148e-03 | 2.166878e-08 | 0 | 1.389041e-12 | 1.142170e-03 |
| 5 | 1 | 0 | 6-7 | 0 | 6 | 1.153885e-03 | 2.330838e-08 | 0 | 3.319406e-14 | 1.153909e-03 |
| 6 | 1 | 0 | 24-28 | 0 | 6 | 1.273557e-03 | 2.871304e-08 | 0 | 6.956317e-38 | 1.273585e-03 |

Corrente nas ligações (A / °)

Passo 6 (último) - Número de ligações em sobrecarga (*): 0

0 - 1 199.257 -31.76
 1 - 2 129.303 -35.09
 1 - 18 65.279 -25.22
 2 - 3 78.850 -41.25
 2 - 22 47.116 -25.82
 3 - 4 72.335 -41.93
 4 - 5 69.390 -42.60
 5 - 6 10.197 -26.56
 5 - 25 57.099 -46.62
 6 - 7 -----
 7 - 8 19.055 -21.04
 7 - 20 29.221 157.04
 8 - 9 -----

| | | |
|---------|--------|--------|
| 8 - 14 | 16.174 | -21.50 |
| 9 - 10 | 2.884 | 161.57 |
| 10 - 11 | 5.303 | 154.54 |
| 11 - 12 | 9.741 | -32.57 |
| 11 - 21 | 18.185 | 149.90 |
| 12 - 13 | 6.577 | -33.69 |
| 13 - 14 | ----- | |
| 14 - 15 | 13.474 | -23.96 |
| 15 - 16 | 10.607 | -25.46 |
| 16 - 17 | 7.752 | -28.07 |
| 17 - 32 | 3.288 | -33.69 |
| 18 - 19 | 60.789 | -25.32 |
| 19 - 20 | 56.299 | -25.42 |
| 20 - 21 | 22.656 | -28.89 |
| 22 - 23 | 42.429 | -25.46 |
| 23 - 24 | 21.214 | -25.46 |
| 24 - 28 | ----- | |
| 25 - 26 | 54.404 | -47.89 |
| 26 - 27 | 51.739 | -49.29 |
| 27 - 28 | 49.286 | -51.01 |
| 28 - 29 | 43.419 | -53.97 |
| 29 - 30 | 18.156 | -25.28 |
| 30 - 31 | 10.607 | -25.46 |
| 31 - 32 | ----- | |

Tensão nas barras (pu):

| | | | | | | | |
|----|---------|----|---------|----|---------|----|---------|
| 1 | 0.9972 | 2 | 0.9875 | 3 | 0.9832 | 4 | 0.9791 |
| 5 | 0.9688 | 6 | 0.9682 | 7 | 0.9642 | 8 | 0.9610 |
| 9 | 0.9642 | 10 | 0.9643 | 11 | 0.9646 | 12 | 0.9621 |
| 13 | 0.9613 | 14 | 0.9553 | 15 | 0.9536 | 16 | 0.9509 |
| 17 | 0.9499* | 18 | 0.9953 | 19 | 0.9791 | 20 | 0.9747 |
| 21 | 0.9714 | 22 | 0.9840 | 23 | 0.9775 | 24 | 0.9743 |
| 25 | 0.9672 | 26 | 0.9650 | 27 | 0.9551 | 28 | 0.9480* |
| 29 | 0.9450* | 30 | 0.9417* | 31 | 0.9411* | 32 | 0.9496* |
| 0 | 1.0000 | | | | | | |

Resumo do processamento

| Função | Cham. | Tempo total proc.(s) | Tempo médio proc.(s) |
|---------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Assemble_Gradient | 15 | 0.0000 | 0.0000 |
| Assemble_H | 12 | 0.0100 | 0.0008 |
| Back | 15 | 0.0000 | 0.0000 |
| Check_Disconnected_Busses | 16 | 0.0000 | 0.0000 |
| Compute_Power_Flow | 7 | 0.0000 | 0.0000 |
| Eigen_Symm_Sparse_GSL | 0 | 0.0000 | 0.0000 |

| | | | |
|--------------------|---|--------|--------|
| Open_Next_Switch_1 | 5 | 0.0000 | 0.0000 |
| Open_Next_Switch_2 | 0 | 0.0000 | 0.0000 |
| Solve | 1 | 0.0200 | 0.0200 |
| Triang | 7 | 0.0000 | 0.0000 |