



RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO VIA TÉCNICA DE DECOMPOSIÇÃO

Saulo Custodio de Aquino Ferreira

Universidade Federal de Juiz de Fora
Rua José Lourenço Kelmer, s/n - Martelos, Juiz de Fora - MG, 36036-330
saulo.custodio@engenharia.ufjf.br

Leonardo Willer de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora
leonardo.willer@ufjf.edu.br

Taís Lacerda Oliveira Araujo

Universidade Federal de Juiz de Fora
tais.lacerda2011@engenharia.ufjf.br

Jerson dos Santos Carvalho

Universidade Federal de Juiz de Fora
jerson.carvalho@engenharia.ufjf.br

Edimar José de Oliveira

Universidade Federal de Juiz de Fora
edimar.oliveira@ufjf.edu.br

RESUMO

O presente artigo apresenta um método alternativo para a reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia (SDE) através de um método de decomposição matemática de dois estágios. O objetivo é a determinação da melhor configuração de chaves que minimiza as perdas técnicas da rede de distribuição, observando-se restrições importantes para a sua operação, como conectividade e radialidade. A redução de perdas implica em melhores níveis de tensão e, portanto, em maior qualidade de energia aos consumidores. Um modelo de programação matemática inteira mista é utilizado juntamente com a técnica de decomposição aplicada. Um sistema conhecido na literatura especializada é usado para testar o método proposto.

PALAVRAS CHAVE. Reconfiguração de sistemas de distribuição, Decomposição matemática, Otimização de sistemas de potência.

Tópico: EN – PO na Área de Energia

ABSTRACT

The document presents an alternative method for the reconfiguration of Energy Distribution Systems (SDE) through a two-stage mathematical decomposition method. The objective is to determine the best configuration of keys that minimizes the technical losses of the distribution network, observing important restrictions for its operation, such as connectivity and radiality. The reduction of losses implies in better levels of tension and, therefore, in higher quality of energy to the consumers. A mixed integer mathematical programming model is used in conjunction with the applied decomposition technique. A system known in the specialized literature is used to test the proposed method.

KEYWORDS. Reconfiguration of distribution systems. Mathematical decomposition. Optimization of power systems.

Paper topic: EN – OR in the Area of Energy



1. Introdução

A reconfiguração de sistemas de distribuição consiste em determinar a topologia da rede que otimiza um índice de desempenho, através da operação de chaves manobráveis. O objetivo é melhorar alguns parâmetros importantes como, por exemplo: minimizar perdas técnicas, melhorar desbalanceamento de cargas, minimizar tempos de restabelecimento da rede de distribuição e aumentar a sua confiabilidade [Jose e Kowli 2016], [Khorhid-Ghazani et al. 2016]. Além disso, a topologia encontrada também deve manter a radialidade da rede, visto que o sistema de distribuição é estruturalmente malhado, mas opera de forma radial [Batista et al. 2016], [Khord et al.2009]. O sistema malhado dificulta o planejamento e a operação do sistema [Davoudi et al. 2016], ao passo que a operação radial facilita a coordenação da proteção [Lee et al. 2015], porém com menor confiabilidade. Para melhoria deste requisito, chaves manobráveis são alocadas na rede elétrica.

Geralmente, o objetivo primordial da reconfiguração é minimizar as perdas técnicas nos alimentadores de distribuição devido ao efeito Joule [Das e Patra 2016]. Esse objetivo favorece o aumento de receita da distribuidora devido ao fato de que acarreta em maior eficiência operacional [Jose e Kowli 2016] e melhoria na qualidade de energia, uma vez que acarreta melhores níveis de tensão ao consumidor. Também, a diminuição das perdas técnicas está diretamente ligada ao aumento da vida útil dos equipamentos e à redução do custo do transporte da energia.

Observa-se que as perdas por efeito Joule são proporcionais ao quadrado das correntes nas linhas ou das tensões nas barras. Dessa forma, observa-se que o problema da reconfiguração de redes de distribuição, nesse caso, é não linear. Além disso, nota-se que se trata de um problema de programação inteira mista devido à característica discreta das escolhas dos estados das chaves manobráveis e contínua advinda das variáveis como as tensões nas barras [Jose e Kowli 2016]. Em [Khorhid-Ghazani et al. 2016], é mostrado que os métodos para resolver esse problema se dividem em três classes: métodos matemáticos exatos, heurísticos e meta-heurísticas. Esses dois últimos são métodos aproximados, ou seja, não se pode garantir que a solução encontrada seja a solução global para o problema de reconfiguração [Jose e Kowli 2016], porém, permitem encontrar soluções com tempos viáveis para os requisitos dos sistemas gerenciadores de energia.

Corroborando a aplicação dos métodos anteriormente citados, técnicas heurísticas têm sido utilizadas para a resolução do problema de reconfiguração de SDE [de Oliveira et al. 2010]. Ainda, meta-heurísticas têm sido investigadas devido à sua aplicabilidade a problemas de natureza inteira mista, tais como sistemas imunológicos artificiais [de Oliveira et al. 2014] e o método conhecido como big-bang big-crunch [Araújo et al. 2016].

Como dito em [Hosseinzadeh et al. 2009], [Jose e Kowli 2016], problemas com as características semelhantes ao que é tratado nesse artigo são complexos e de difícil solução. Além disso, conforme o tamanho do sistema de distribuição estudado aumenta, o número de chaves manobráveis e, conseqüentemente, as possíveis combinações aumentam, levando a uma dificuldade ainda maior de se encontrar uma boa solução [Batista et al. 2016].

Diante do problema descrito anteriormente, o presente artigo propõe um método alternativo para a resolução do problema de reconfiguração de SDE visando perdas técnicas mínimas, através da técnica de decomposição matemática de Benders. O objetivo é a obtenção de um ponto operativo associado a maior eficiência e qualidade de energia aos consumidores. De acordo com esta técnica, o problema principal é dividido em dois subproblemas, um associado à característica inteira da reconfiguração e o outro que trata das não linearidades inerentes. O propósito de aplicação da técnica de decomposição é obter uma resolução com eficiência computacional [Khord et al.2009]. Para validar a metodologia alternativa proposta, um sistema amplamente conhecido na literatura, de 16 barras, é utilizado.



2. Formulação do Problema

A formulação do problema de reconfiguração de SDE requer o tratamento das não-linearidades decorrentes da presença de variáveis inteiras associadas às decisões de manobra e a garantia da conectividade e radialidade da rede elétrica. O objetivo é a minimização das perdas técnicas da rede, conforme função objetivo do problema formulado a seguir:

$$\text{Min } P_{perdas} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$P_{g_k} - \sum_{km \in Nt} P_{km} \cdot ch_{km} - P_{L_k} = 0 \quad (2)$$

$$Q_{g_k} - \sum_{km \in Nt} Q_{km} \cdot ch_{km} - Q_{L_k} = 0 \quad (3)$$

$$P_{perdas} = ch_{km} \cdot G_{km_i} \cdot V_{k_i}^2 + ch_{m_i} \cdot V_{m_i}^2 - 2 \cdot ch_{km} \cdot V_{k_i} \cdot V_{m_i} \cdot \cos(\theta_{km_i}) \quad (4)$$

$$P_{km} = V_k^2 \cdot G_{km} - V_k \cdot V_m \cdot G_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) - V_k \cdot V_m \cdot B_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) \quad (5)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 \cdot B_{km} + V_k \cdot V_m \cdot B_{km} \cdot \cos(\theta_{km}) + V_k \cdot V_m \cdot G_{km} \cdot \sin(\theta_{km}) \quad (6)$$

$$V_k \geq V^{\min} \quad (7)$$

$$ch_{km} = 0 \text{ ou } 1 \quad (8)$$

$$\text{Conectividade e Radialidade} \quad (9)$$

Em que:

P_{perdas}	Perdas técnicas na rede de distribuição;
P_{g_k}	Potência ativa gerada na barra k ;
Q_{g_k}	Potência reativa gerada na barra k ;
Nt	Número de trechos de distribuição;
P_{km}	Fluxo de potência ativa no ramo $k-m$;
Q_{km}	Fluxo de potência reativa no ramo $k-m$;
ch_{km}	Valor de posição da chave manobrável acoplada ao trecho $k-m$ (0: aberta; 1: fechada);
P_{L_k}	Potência ativa demandada na barra k ;
Q_{L_k}	Potência reativa demandada na barra k ;
V_k	Módulo de tensão da barra k ;
θ_{km}	Defasagem angular entre as barras terminais do trecho $k-m$;
G_{km}	Condutância do trecho $k-m$;
B_{km}	Susceptância do trecho $k-m$;
V^{\min}	Limite inferior de tensão do sistema.



As restrições (2) e (3) representam os balanços de potência ativa e reativa, respectivamente, em cada barra da rede elétrica, que envolvem os fluxos de potência nos trechos de distribuição formulados em (5) e (6). A perda técnica é formulada em (4). O limite inferior de tensão do sistema é representado pela restrição (7). A restrição (8), por sua vez, define a natureza discreta das variáveis de chaveamento ch_{km} . Por fim, as restrições de conectividade e radialidade são consideradas de acordo com (9). O atendimento a estas restrições será descrito com maiores detalhes adiante.

2.1 Técnica de Decomposição Matemática

Devido à existência de variáveis binárias e contínuas no problema de reconfiguração de SDE, a estratégia alternativa proposta no presente artigo consiste em decompor o problema em dois estágios, de forma a resolver a parte inteira separadamente da contínua. Para tanto, propõe-se a técnica de decomposição de Benders [Benders 1962], [Costa 2005].

O primeiro estágio refere-se à parte inteira e tem como objetivo determinar uma configuração radial e conexa, sem observar restrições de rede. Este estágio é modelado como:

$$\text{Min } \alpha \quad (10)$$

Sujeito a:

$$ch_{km} = 0 \text{ ou } 1 \quad (11)$$

$$\text{Conectividade e Radialidade} \quad (12)$$

Em que:

α Custo do segundo estágio.

No segundo estágio do método proposto, as restrições de rede são incluídas para a topologia determinada no primeiro estágio, visando avaliar se a solução determinada no primeiro é eletricamente viável. Este estágio é formulado como:

$$\text{Min } P_{perdas} \quad (13)$$

Sujeito a:

$$P_{g_k} - \sum_{km \in Nt} P_{km} \cdot ch_{km}^* - P_{L_k} = 0 \quad (14)$$

$$Q_{g_k} - \sum_{km \in Nt} Q_{km} \cdot ch_{km}^* - Q_{L_k} = 0 \quad (15)$$

$$P_{perdas} = ch_{km}^* \cdot G_{km_i} \cdot V_{k_i}^2 + ch_{km}^* \cdot V_{m_i}^2 - 2 \cdot ch_{km}^* \cdot V_{k_i} \cdot V_{m_i} \cdot \cos(\theta_{km_i}) \quad (16)$$

$$V_k \geq V^{\min} \quad (17)$$

Em que:

ch_{km}^* Valor ótimo de ch_{km} obtido no primeiro estágio.



2.2 Tratamento da Conectividade e da Radialidade

Conforme descrito anteriormente, os SDE são, em sua maioria, configurados em estruturas malhadas e operam radialmente, a fim de se obter baixas correntes de curto-circuitos, resultando em um baixo custo de equipamentos de controle e proteção [Lee et al. 2015], [Jabr et al. 2012]. Em grande parte, os SDE apresentam possibilidades de modificar sua topologia, através da alteração de suas chaves seccionadoras (normalmente abertas ou fechadas). Ao alterar a topologia, mantendo-se a radialidade, reduz-se as perdas técnicas no sistema. No entanto, a manutenção da radialidade é complexa, uma vez que a rede elétrica consiste em um grafo. Ao mesmo tempo, a conectividade é fundamental para assegurar a energização de todos os pontos de carga do sistema.

Portanto, estas restrições são extremamente importantes na modelagem do problema de reconfiguração de redes aéreas de distribuição, e também requisitos severos do problema [Di et al. 2012].

No presente trabalho, a conectividade e a radialidade foram representadas através de restrições via inequações para cada possível malha da estrutura da rede [Di et al. 2012]. Estas restrições são em função das variáveis binárias ch_{km} . Estas restrições são i) máximo de um trecho aberto por malha; ii) nenhuma barra desenergizada; iii) trechos que saem da subestação fechados. Estas restrições são baseadas em teoria de grafos [Ahuja et al. 1993], [Bazarra et al. 1990]. Para exemplificar, considera-se o sistema de 16 barras [Civanlar et al. 1988], cuja topologia inicial é representada na Figura 1.

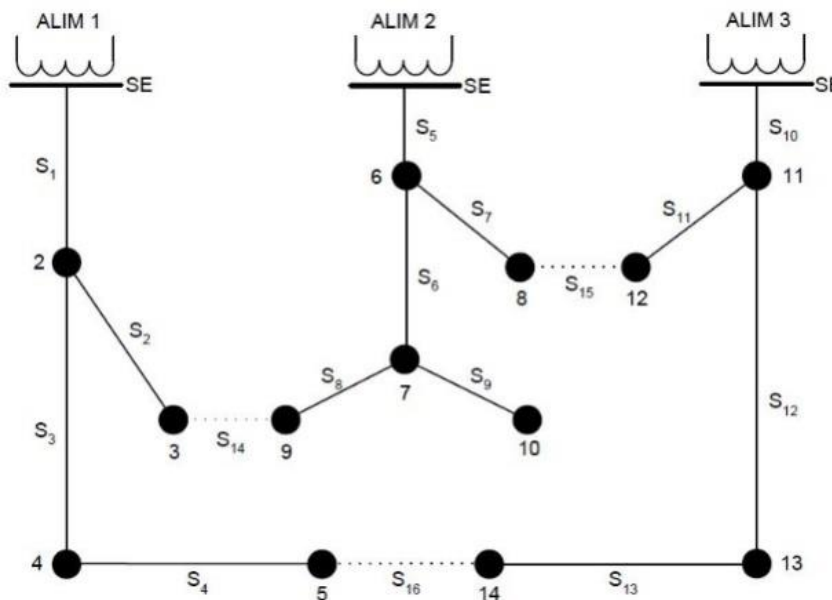


Figura 1. Topologia Inicial do Sistema 16 Barras [de Oliveira et al. 2010].

De acordo com a topologia anterior, pode-se perceber que no sistema estudado, existe a possibilidade de formação de três malhas, que são representadas pelos conjuntos de chaves a seguir:

Malha 1: S1, S2, S5, S6, S8 e S14;

Malha 2: S5, S7, S10, S11 e S15;

Malha 3: S1, S3, S4, S10, S12, S13 e S16.

Observa-se que em cada uma das malhas descritas, existe uma chave que se encontra aberta (linha pontilhada), a fim de manter o sistema radial.



2.3 Técnica de Decomposição

A dificuldade de se encontrar uma solução para problemas de otimização não lineares com variáveis binárias motivou para a aplicação da técnica de decomposição de Benders. A abordagem de Benders baseia-se na partição do problema original em dois problemas mais simples, denominados de subproblema mestre e subproblema escravo [[Benders 1962]. O subproblema mestre, formulado em (10) - (12) consiste em uma relaxação do problema original, no sentido em que apresenta apenas um subconjunto das variáveis, objetivos e restrições originais. O subproblema escravo, por sua vez, é uma ramificação do problema original, em que as variáveis de decisão do subproblema mestre são fixadas conforme sua resolução. No método proposto, as variáveis de decisão são as posições das chaves manobráveis ch_{km} .

O algoritmo resolve cada um dos dois subproblemas iterativamente, da seguinte maneira: resolve-se o subproblema mestre obtendo-se uma solução candidata para as posições das chaves manobráveis, seguido da resolução do subproblema escravo, onde a viabilidade elétrica da rede é avaliada mediante a decisão tomada no primeiro subproblema. Portanto, os valores de ch_{km} obtidos no subproblema mestre são fixados no subproblema escravo (ch_{km}^*) [Costa 2005]. O fluxograma da metodologia proposta é apresentado na Figura 2.

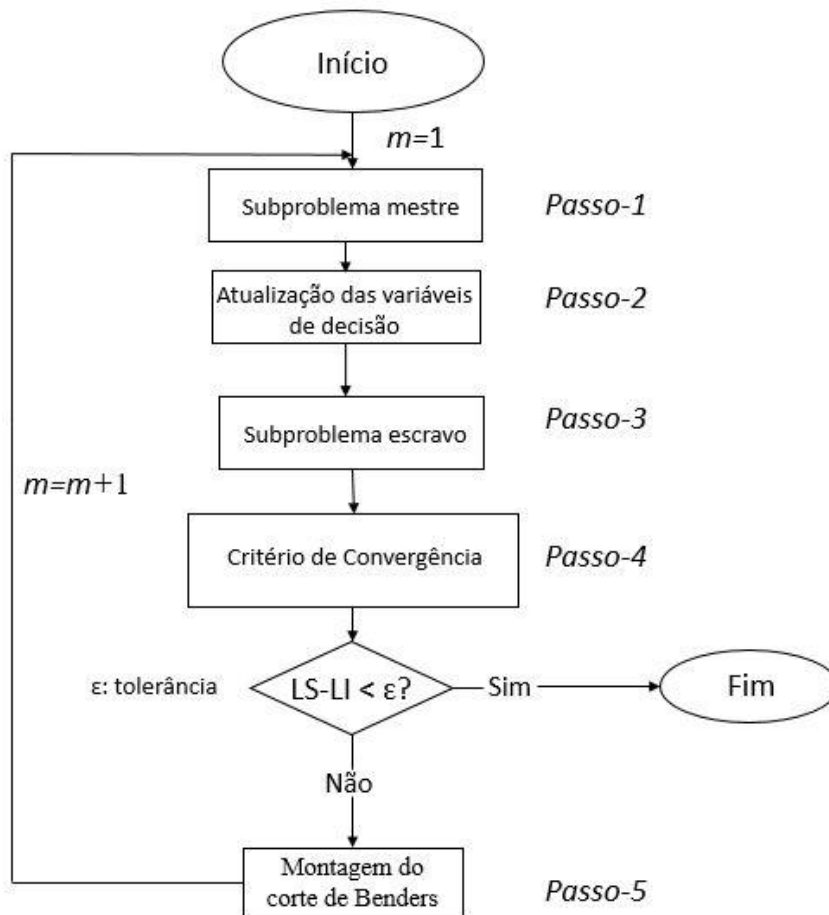


Figura 2. Fluxograma do Método Proposto

Os passos do fluxograma descrito são:



Passo - 1: Subproblema Mestre

Nesta etapa, escolhe-se uma configuração radial e conexa da rede, com a informação da perda através da função α , que contém esta informação através do corte de Benders. Destaca-se que na primeira execução, $m = 1$, não há informação da perda neste subproblema e, portanto, o mesmo determina apenas uma topologia que atende às restrições de conectividade.

Passo - 2: Atualização das Variáveis de Decisão

Neste passo, as variáveis a serem fixadas no subproblema escravo - ch_{km}^* são atualizadas de acordo com a solução obtida no subproblema mestre.

Passo - 3: Subproblema Escravo

Neste passo, faz-se a verificação da viabilidade da solução encontrada no Passo-1, ou seja, da topologia conexa e radial determinada, através da resolução do fluxo de potência não linear via método de Newton Raphson [Monticelli 1983] para as decisões de chaveamento ch_{km}^* . Para tanto, o modelo formulado em (13) - (17) é executado visando-se redução de perdas técnicas.

Passo - 4: Critério de Convergência

Neste passo, verifica-se o critério de convergência do problema iterativo envolvendo os subproblemas mestre e escravo. Este critério é dado pela diferença entre os limites inferior (LI) e superior (LS) da função objetivo global do problema, formulados como:

$$LI = \alpha \quad (18)$$

$$LS = \text{Min } P_{perdas} \quad (19)$$

De acordo com os limites definidos em (18) e (19), o problema alcança a convergência quando o valor previsto para as perdas no primeiro subproblema mestre (α) é suficientemente próximo do valor real das perdas apurado no subproblema escravo. Esta proximidade é dada por uma tolerância ϵ .

Passo - 5: Montagem do Corte de Benders

Neste passo, monta-se o corte de Benders, que consiste em uma restrição aplicada às variáveis de decisão ch_{km} , a fim de incorporar a informação das perdas no subproblema mestre. A cada iteração do problema global envolvendo os dois subproblemas da decomposição, uma nova restrição é adicionada ao subproblema mestre. Essa nova restrição é gerada a partir da resolução do subproblema escravo. Este processo é repetido até que o critério de convergência do passo anterior seja atendido. O corte de Benders é formulado como:

$$\alpha + \lambda_{km} \cdot E_{km} \cdot ch_{km} \geq w_2 + \lambda_{km} \cdot E_{km} \cdot ch_{km}^* \quad (20)$$

Em que:

λ_{km} Multiplicador de Lagrange associado à restrição que contém a variável de decisão;

E_{km} Derivada da restrição que contém a variável de decisão em relação à mesma;

w_2 Valor da função objetivo do subproblema escravo.



3. Resultados e Discussões

Com base no modelo apresentado nas seções anteriores, foram realizados testes utilizando o software Matlab versão 2016 a fim de testar a metodologia proposta neste artigo. Para tanto, o sistema de 16 barras de [Civalar et al. 1988] e ilustrado na Figura 1 foi utilizado.

Para a resolução do subproblema mestre proposto neste artigo, utiliza-se a toolbox do Matlab denominada intlinprog, apropriada para problemas de programação linear e inteira. O subproblema escravo, por sua vez, é resolvido utilizando-se a toolbox denominada fmincon, desenvolvida para problemas de programação contínua não linear.

Na aplicação do método ao sistema em estudo, o processo iterativo envolvendo os dois subproblemas requisitou um total de 27 iterações. Como a primeira iteração consiste no subproblema mestre sem restrições de Benders, um total de 26 cortes foi gerado a fim de se alcançar a solução ótima neste caso.

A Figura 3 apresenta a evolução dos limites inferior e superior, LI e LS respectivamente, durante todo o processo iterativo. A Tabela 1 apresenta as topologias encontradas durante este processo, juntamente com os respectivos valores de perdas.

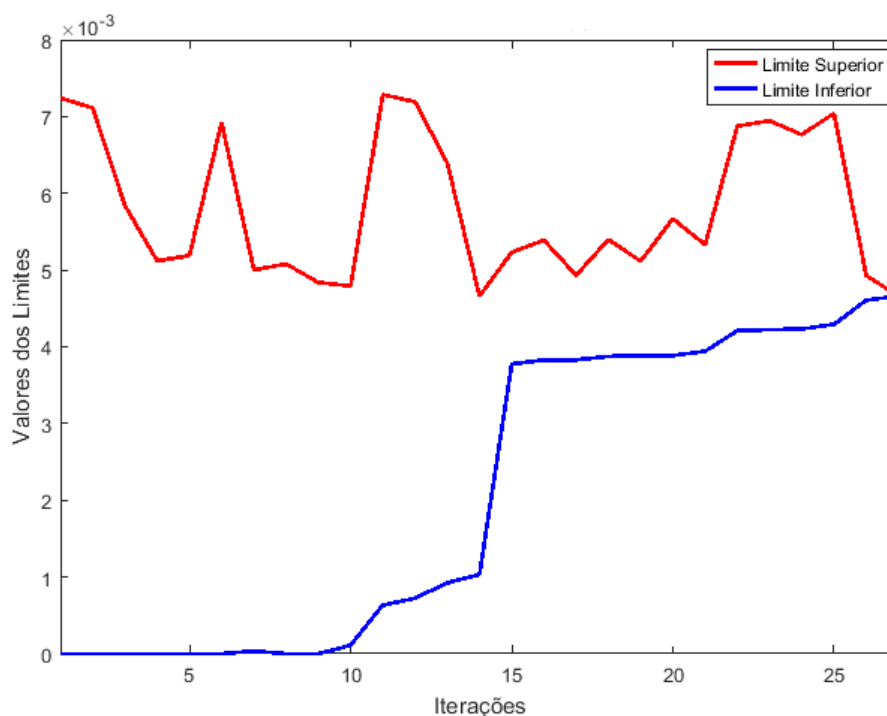


Figura 3. Evolução dos Limites de Convergência do Método Proposto

Tabela 1. Evolução da Solução do Problema.

Iteração	Chaves Abertas	Valor da Perda (kW)
1	2, 3 e 7	724,25
2	3, 6 e 7	711,21
3	3, 11 e 14	584,09
4	8, 11 e 16	511,94
5	4, 14 e 15	518,93
...
25	2, 11 e 16	704,19
26	7, 8 e 13	492,83
27	7, 8 e 16	466,13



Observando o gráfico apresentado na Fig. 3, percebe-se uma oscilação nos valores do limite superior que se deve à característica do problema, não linear inteiro misto. Este comportamento evidencia que o problema apresenta pontos de mínimo local. Entretanto, a técnica de decomposição de Benders consegue evitar estes pontos na convergência, encontrando o mínimo global para este sistema.

Conforme Tabela 1, a solução ótima, alcançada na 27^o iteração, apresenta as chaves 7, 8 e 16 abertas, com uma perda mínima de 466,13 kW, conforme referências [de Oliveira 2010] e [Araújo et al. 2016], o que permite avaliar a aplicabilidade do método proposto. Na Figura 4, está represando o sistema de 16 barras com a configuração ótima de chaves encontrada.

A Tabela II apresenta a tensão mínima e os fluxos de potência que saem da subestação para os alimentadores de distribuição, onde se pode notar que, na configuração ótima, tem-se uma rede de distribuição com nível de tensão adequada e relativamente balanceada.

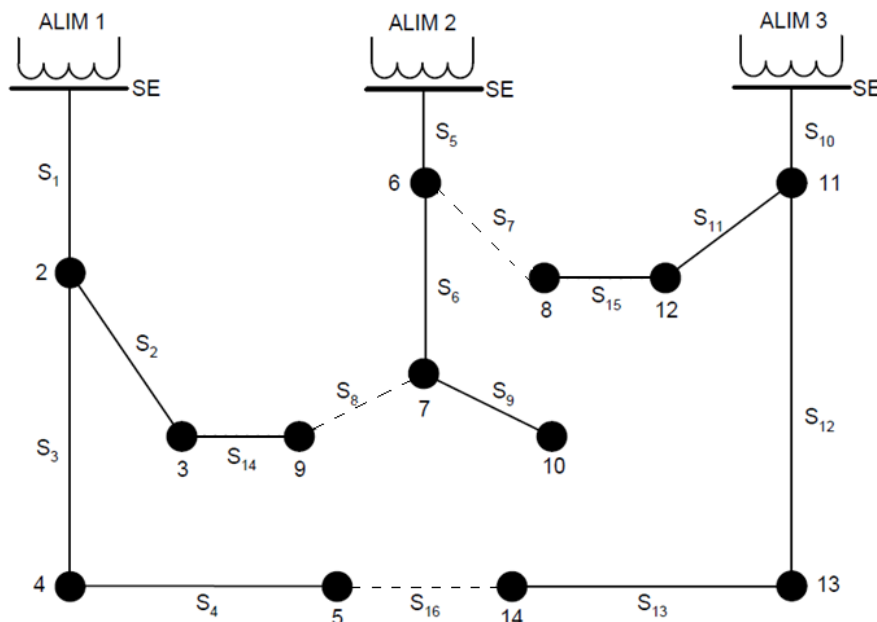


Figura 4. Configuração Final do Sistema de 16 Barras

Tabela 2. Parâmetros do Sistema Para a Solução Ótima.

Chaves Abertas	Tensão Mínima (pu)	Fluxos da Subestação (kW)
7, 8 e 16	0,97	9192 (1-2) 13817 (1-6) 6156 (1-11)

Destaca-se que apesar do número de iterações de Benders ser relativamente elevado, a obtenção da solução ótima global pelo método proposto sinaliza para a viabilidade de aplicação deste tipo de decomposição ao problema de reconfiguração, conforme expectativa inicial motivadora do presente trabalho

4. Considerações Finais

Com base nesse estudo, pôde-se demonstrar a aplicabilidade do método de decomposição matemática para a resolução de problemas não lineares inteiros mistos, neste caso, mais especificamente para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição. A expectativa inicial da aplicabilidade pretendida foi atendida, uma vez que a metodologia conseguiu determinar o ponto global de mínima perda para o sistema teste estudado. Portanto, a proposta de um método alternativo para a reconfiguração mostrou-se viável e promissora, ainda



que na continuidade da pesquisa, estudos serão conduzidos na tentativa de aumentar a eficiência computacional através da redução do número de iterações do algoritmo de decomposição. Além disto, sistemas de maior porte serão testados a fim de avaliar a aplicabilidade da técnica para os mesmos.

Referências

Ahuja R.K., Magnati T.L., Orlin J.B. (1993) Network flows: theory, algorithms and applications. Prentice-Hall.

Araújo, T. L. O., Oliveira L. W., Ferreira E. L. e Ferreira S. C. A. (2016). Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Através da Técnica Big Bang-Big Crunch. In *Anais do XLVIII SBPO*, p. 3322 – 3322, Vitória, SOBRAPO.

Batista, S., Canizes, B., Oliveira, A., Nogueira, T. e Vale, Z. (2016). Optimal location of normally open switches in order to minimize power losses in distribution networks, Power and Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE, p. 1-5.

Bazaraa M., Jarvis J. e Sherali H.F. (1990). Linear programming and network flows. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons.

Benders, J. (1962) Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerisch Mathematik*, Vol. 4, p. 238-252.

Civanlar S., Grainger J.J., Yin H. e Lee S.S.H. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Trans Power Deliver* 1988;3(3). p. 1227–3.

Costa, A.M. (2005). A survey on benders decomposition applied to fixed-charge network design problems. *Computers & Operations Research*, Vol. 32, p.1429-1450.

Das, S. e Patra, A. (2016). Distribution network reconfiguration using distributed generation unit considering variations of load, *Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, IEEE International Conference on Power Systems, Vol. 27, No 2.

Davoudi, M., Cecchi, V. e Agüero, J. R. (2016). Network reconfiguration with relaxed radiality constraint for increased hosting capacity of distribution systems, *Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2016, IEEE, p. 1–5.

Di, B., Li, L. e Hui, Y. (2012). Distribution Reconstruction Based on Bender's Decomposition Including Distributed Generation, *China International Conference on Electricity Distribution*, p. 5 – 6.

Hosseinzadeh, F., Alinejad, B. e Pakfa, K. (2009). A new technique in distribution network reconfiguration for loss reduction and optimum operation, *Electricity Distribution-Part 1, CIRED. 20th International Conference and Exhibition, IET*, p. 1–3.

Jabr, R. A., Singh, R. e Pal, B. C. (2012). Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 2.

Jose, J. e Kowli, A. (2016). Reliability constrained distribution feeder reconfiguration for power loss minimization, *Power Systems Conference (NPSC)*, 2016 National, IEEE, p. 1–6.



Khodr, H., Martinez-Crespo, J., Matos, M. e Pereira, J. (2009). Distribution systems reconfiguration based on opf using benders decomposition, IEEE Transactions on Power Delivery 24(4), p. 2166–2176.

Khorshid-Ghazani, B., Seyedi, H., Mohammadiivatloo, B., Zare, K. e Shargh, S. (2016). Reconfiguration of distribution networks considering coordination of the protective devices, IET Generation, Transmission & Distribution.

Lee, C., Liu, C., Mehrotra, S. e Bie, Z. (2015). Robust distribution network reconfiguration, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2, p. 836–842.

Monticelli, A. J. (1983). Fluxo de carga em redes de energia elétrica. Edgard Blucher, São Paulo.

de Oliveira, L. W., Carneiro, S., de Oliveira, E. J., Pereira, J. L. R., Silva, I. C., e Costa, J. S. (2010). Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy losses minimization. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 32, No. 8, p. 840-848.

de Oliveira L. W. Oliveira, E.J., Gomes, F. V, Silva Jr, I. C., Marcato, A. L. M. e Pereira, P. V. C. (2014). Artificial immune systems applied to the reconfiguration of electrical power distribution networks for energy loss minimization, International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 56.