

Configurações Ótimas de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Gerações Distribuídas de Valores Aleatórios

Ellen Marianne Bernal Cavalheiro, André Henrique Benetton Vergílio, Christiano Lyra Filho

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UNICAMP
Cidade Universitária Zeferino Vaz. Av. Albert Einstein, 400. CEP: 13083-852, Campinas - SP
chrlyra@densis.fee.unicamp.br

RESUMO

O trabalho estuda o problema de encontrar configurações ótimas para redes radiais de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos de injeções aleatórias, cenário para onde convergem as redes de distribuição com a introdução das inovações em gerações e controles sintetizadas na expressão *Smart Grids*. Uma revisão bibliográfica discute a evolução da caracterização do problema e métodos adotados para encontrar soluções, desde o trabalho seminal de Merlin e Back na década de 70 até os artigos recentes que começam a considerar a existência de gerações distribuídas com valores de injeções controláveis. Em seguida, o artigo propõe uma formulação matemática para o novo cenário de encontrar configurações ótimas em redes onde existem fontes distribuídas com valores aleatórios de injeções de energia. As características do problema são exploradas em uma rede maquete de pequeno porte, projetada para realçar as consequências da presença de gerações aleatórias nas redes.

PALAVRAS CHAVE. Reconfigurações de redes de distribuição de energia elétrica. Configurações radiais ótimas. Gerações distribuídas com injeções aleatórias.

Tópicos: EN - PO na Área de Energia, OC - Otimização Combinatória.

ABSTRACT

This work studies the problem of finding optimal radial network configurations for electric power distribution systems with random energy injections, a scenario to which moves distribution networks with the introduction of innovations in generations and controls synthesized in the expression *Smart Grids*. An overview of the bibliography discuss the evolution of the problem characterization and methods adopted to find solutions, starting with the seminal paper from Merlin and Back in the seventies and going on to the recent articles that starts to consider distributed generations with controllable outputs. Following, the paper proposes a mathematical formulation for the scenario of finding optimal network configurations for networks with random energy sources. The main features of the problem are explored in a small maquette network, designed to unveil the main consequences of having random energy inputs in the network.

KEYWORDS. Reconfiguration of electric power distribution networks. Optimal radial network configurations. Distributed power sources with random output.

Paper topics: EN - OR in Energy, CO - Combinatorial Optimization.

Introdução

A energia elétrica é transportada das fontes até os pontos de consumo através de linhas e equipamentos que possuem resistências elétricas. Essas resistências causam perdas por efeito joule, denominadas perdas técnicas. As perdas técnicas são mais expressivas nos sistemas de distribuição. Alternativas para reduzi-las incluem a procura das melhores configurações de redes, gestão dos fluxos de energia reativa, melhorias físicas por substituição de cabos e equipamentos, otimização do planejamento das redes, adoção de fontes de gerações distribuídas e a modernização das alternativas de controle e comunicação, inovações que vêm sendo caracterizadas pela expressão *Smart Grids*.

Este trabalho estuda o problema de encontrar configurações ótimas para redes radiais de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos com injeções aleatórias, cenário para onde convergem as redes de distribuição com as inovações associadas ao conceito de *Smart Grids*.

Como as redes de distribuição operam com configurações radiais, o problema de encontrar a configuração ótima para uma rede ao longo de determinado período corresponde a encontrar a árvore geradora da rede que permita atender as demandas ao longo do período em estudo com as menores perdas possíveis. As variáveis de decisão que definem as árvores geradoras são os estados das chaves existentes na rede (abertas ou fechadas), como ilustra a Figura 3.

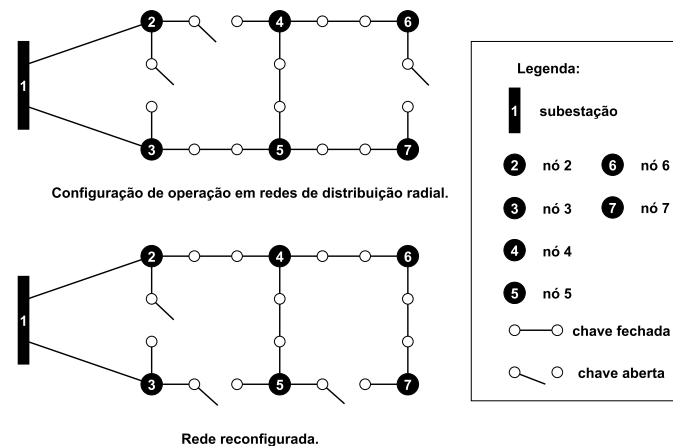


Figura 1: Exemplo de configuração de operação e de reconfiguração por chaveamentos em uma rede de distribuição.

O número de configurações possíveis cresce fatorialmente com a dimensão da rede, caracterizando um problema difícil de otimização combinatória [Bueno, 2000]. Por isso, abordagens alternativas para a solução o problema de encontrar configurações ótimas em redes de distribuição vêm sendo pesquisadas há mais de 40 anos, desde que foi apresentado o trabalho seminal da área pelos engenheiros franceses Merlin e Back [1975], que incluiu a primeira formulação e duas alternativas de solução. A primeira alternativa, aplicável apenas em redes de pequeno porte, encontrava soluções ótimas globais através de algoritmo *branch-and-bound*. A segunda alternativa, aplicável a redes maiores, foi uma heurística com duas fases, denominada abertura sequencial de chaves. A primeira fase encontra a distribuição ótima de fluxos em uma rede com todas as chaves fechadas; a segunda fase consiste na abertura da chave com menor fluxo e factibilização da solução. As duas fases são executadas sucessivamente até a obtenção de uma solução radial.

Na década de 80, Civanlar et al. apresentam a heurística para reconfiguração de redes denominada “troca de ramos” (do inglês *branch-exchange*). Cada etapa da “troca de ramos” realiza uma permuta de estados entre pares de chaves, uma aberta e outra fechada, de forma a obter redução de perdas. Os autores observaram que maiores reduções de perdas ocorrem quando se realiza operações de troca de ramos com arcos que estejam do lado de menor tensão, entre as tensões

nos terminais de um arco aberto. Usando esta característica, o algoritmo realiza permuta de estados de chaves até o ponto em que não é mais possível reduzir perdas – ou seja, até a obtenção da melhor solução sub-ótima alcançável pelo algoritmo.

Entre os primeiros artigos na área destacam-se, ainda na década de 80, os artigos de Baran e Wu, Shirmohammadi e Hong, e Liu et al e Lee e Brooks [Baran e Wu, 1989; Shirmohammadi e Hong, 1989; Liu et al., 1989; Lee e Brooks, 1988]. Liu et al. propõem usar de otimização não-linear associada a heurísticas, mas utilizando ideias alternativas às exploradas por Merlin e Back – O procedimento heurístico é realizado para dois alimentadores de cada vez. Baran e Wu estenderam a metodologia de “troca de ramos” desenvolvida por Civanlar et al, considerando como objetivo da otimização a redução de perdas e o balanceamento de cargas entre alimentadores. Baran e Wu estudaram também métodos para o cálculo de fluxos de potências em redes de distribuição radiais, considerando potências ativas e reativas – um aspecto curioso, é que o artigo de Baran e Wu, embora denso e rico em informações para compreensão do problema de reconfiguração de redes, é citado principalmente como referência de informações sobre os atributos da rede de porte muito pequeno usada para exemplificar a aplicação das ideias discutidas no artigo. Shirmohammadi e Hong aperfeiçoaram a proposta de Merlin e Back, desenvolvendo um método heurístico que considera potências ativas e reativas, incluindo também a verificação de quedas de tensões no processo de abertura sequencial de chaves.

Todos os trabalhos mencionados consideravam o problema de reconfiguração com demandas conhecidas e com valores fixos. No entanto, já em 1988, Lee e Brooks [1988] abordaram o problema de reconfiguração ótima associado a alocação ótima de capacitores sob a hipótese de demandas variáveis ao longo do período estudado. Os estudos de casos mostraram que é possível obter maiores reduções de perdas quando as configurações são modificadas para melhor se adaptarem às variações nos valores das cargas.

Na década de 90 muitos novos trabalhos abordaram o problema de reconfiguração de redes, explorando novas heurísticas e ideias que começavam a ser exploradas em problemas de otimização, como conceitos desenvolvidos na área de inteligência artificial e metaheurísticas para abordagem de problemas de otimização combinatória.

Taylor e Lubkeman [1990] propuseram o uso de sistemas especialistas para otimizar as configurações de redes, procurando eliminar sobrecargas de transformadores e reduzir perdas. Nara et al. [1992] desenvolveram metodologia baseada em algoritmos genéticos para construir uma população de soluções com as melhores configurações de redes. Cavellucci e Lyra [1997] estenderam as ideias de Merlin e Back [1975] em um método de duas fases, baseado em gradiente reduzido para redes e buscas informadas, desenvolvidas com conceitos da área de inteligência artificial – a abertura de chaves é guiada pelas buscas informadas que utilizam informações de distribuições ótimas de fluxos obtidas pelo algoritmo gradiente reduzido para redes malhadas. McDermott et al. [1999] desenvolveram um método heurístico construtivo onde todas as chaves são inicialmente abertas e fechadas gradualmente até a obtenção de uma rede radial.

A literatura sobre reconfiguração otimizada de redes na primeira década dos anos 2000 procurou explorar as possibilidades de encontrar melhores soluções através de novas metaheurísticas, como, por exemplo, otimização por colônia de formigas, *GRASP* (acrônimo da expressão em inglês *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) e busca harmônica. Outros aspectos a destacar foi a proposta de modelos para abordar o problema de variações de demandas ao longo do período de estudo e a abordagem do problema de reconfiguração ótima em redes de porte real.

A abordagem do problema com variações de demandas foi retomada com os trabalhos de Vargas et al. [2003], Bueno et al. [2004] e Queiroz e Lyra [2009]. Vargas et al. [2003] exploraram o uso de sistemas classificadores para supervisionar redes em tempo real e realizar reconfigurações sempre que forem identificadas variações significativas de demandas. Bueno et al. [2004] propuseram uma nova formulação para o problema que considera explicitamente as variações de demandas, mas impede reconfigurações ao longo do período de estudo. Queiroz e Lyra [2009] desenvolveram

um algoritmo genético híbrido adaptativo para resolver o problema proposto por Bueno et al. [2004] em redes de porte real.

A partir dos anos 2000 começaram a ter registro os esforços de instituições de governo e acadêmicos para estabelecer o conjunto de tecnologias que permitiria implantar gerações distribuídas em larga escala nas redes de distribuição. O conjunto dessas tecnologias veio a tornar-se conhecido com a expressão aglutinadora *Smart Grid* – a evolução dos conceitos de *Smart Grid* até 2010 é bem historiada no artigo de Lightner e Widergren, publicado no primeiro número da revista *IEEE Transactions on Smart Grid* [Lightner e Widergren, 2010]. Recentemente, a literatura sobre o problema de reconfiguração de redes tem procurado considerar da existência de geração distribuída nas redes, mas restrita ao caso mais simples de gerações com injeções controláveis (usa-se com frequência o termo gerações despacháveis) – logo, com valores determinísticos conhecidos.

Wu et al. [2002] estudaram o problema de minimizar as perdas e melhorar o equilíbrio de cargas em redes com gerações distribuídas controláveis usando uma pequena rede de 33 nós como plataforma de experimentos; os resultados mostraram que a redução de perdas e o balanceamento de cargas foram mais expressivos quando a geração distribuída é usada para complementar os benefícios das reconfigurações. Franco et al. [2013] representaram o problema de reconfigurações com gerações distribuídas controláveis por um modelo linear com variáveis inteiras, o que permite realizar a otimização com códigos atuais para solução de problemas de programação linear mista; a abordagem foi avaliada em rede com 69 e 417 nós. Rao et al. [2013] utilizaram um algoritmo de busca harmônica para estudar o problema em redes com gerações distribuídas controláveis; estudos de casos demonstrativos utilizaram redes com 33 e 69 nós e compararam os resultados da busca harmônica com uma alternativa de solução por algoritmos genéticos [Nara et al., 1992; Zhu, 2002]. Rosseti et al. [2013] propuseram um algoritmo heurístico baseado em índices de sensibilidade para estudar o problema de reconfigurações com gerações controláveis; a metodologia foi avaliada em redes com 16, 33 e 94 nós. Um estudo na mesma linha foi realizado por Esmailian e Fadaeinedjad [2015], usando metaheurísticas híbridas para encontrar soluções em redes de 33 e 83 nós. Tahboub et al. [2015] representaram o problema por um modelo não-linear com variáveis inteiras e incluem na representação as variações de potência ativa e reativa; as soluções são obtidas por código de otimização não linear mista, em redes demonstrativas de 33 e 84 nós. Jagtap e Khatod [2016] estudaram a redução de perdas por reconfigurações com cenários alternativos para o uso de geração distribuída controlável; as soluções foram obtidas por método heurístico em redes com 9 e 33 nós.

Em síntese, a leitura dos trabalhos acima mencionados indica que o estudo do problema de encontrar configurações ótimas de redes radiais de distribuição com a presença de geração distribuída está ainda numa fase exploratória, restrita a cenários de gerações controláveis em redes muito pequenas – os estudos realizados por Franco et al. [2013] consideram uma rede com 417 nós, cerca de 5 vezes maior do que redes consideradas nos outros trabalhos, mas ainda assim distante de situações de porte real, com alguns milhares de nós.

Este trabalho propõe um passo adicional na discussão sobre o problema de reconfigurações de redes radiais de distribuição ao incluir a representação de aspectos aleatórios de gerações distribuídas, decorrentes da ascensão de fontes renováveis baseadas em energia solar e eólica. Essas fontes não são controláveis e suas disponibilidades de energia sofrem fortes variações ao longo de um dia, como ilustra a Figura 2.

A próxima seção propõe um modelo matemático para o problema de encontrar a configuração ótima de uma rede radial de distribuição em redes com fontes distribuídas aleatórias.

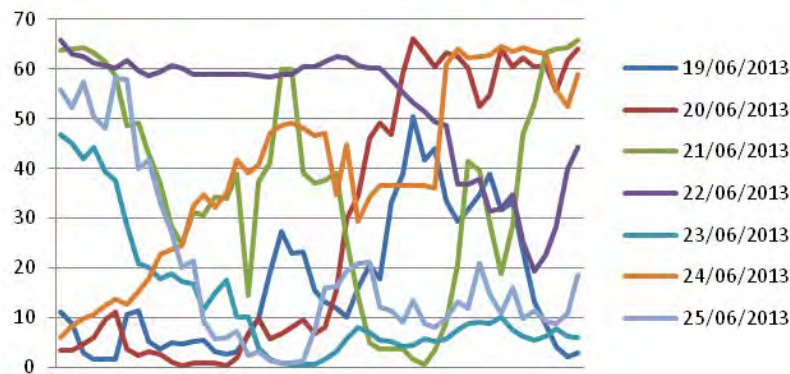


Figura 2: Gráfico característico de velocidade de ventos para geração eólica. Fonte: Oliveira [2014].

Caracterização do problema

O problema pode ser caracterizado como a procura de uma árvore geradora de custo mínimo para atender as demandas de energia nos nós de uma rede primária de distribuição de energia elétrica. Supõe-se que a subestação (raiz da árvore) é capaz de atender toda a demanda da rede, mas que existem também fontes de geração distribuída com injeções aleatórias que podem atender parte da demanda e devem ser prioritariamente utilizadas. Os principais aspectos deste problema podem ser representados pelo problema de otimização de fluxos com custos não lineares e perturbações aleatórias, caracterizado a seguir.

$$\min_c \mathcal{E}_g\{J(c, g)\} \quad (1)$$

$$J(c, g) = \sum_{k \in A} r_k x_k^2 \quad (2)$$

$$Ax = d - g \quad (3)$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x} \quad (4)$$

$$G(N, A') \text{ é uma árvore} \quad (5)$$

$$A' \text{ é o conjunto de arcos com fluxos } \neq \text{zero.} \quad (6)$$

Onde

$\mathcal{E}_g\{J(c, g)\}$ é a esperança matemática das perdas em relação as injeções aleatórias para o vetor de configuração de chaves $c = \{c_1, c_2, \dots, c_P\}$, em que $c_i = 0$ representa uma chave aberta e $c_i = 1$ representa uma chave fechada, $g = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$ é o conjunto de fontes de geração distribuída da rede onde g_i é a variável aleatória que representa a geração distribuída no nó i ,

A é a matriz de incidência nó-arco associado à rede,

x_k é o fluxo de corrente de energia no arco k ,

r_k é a resistência elétrica do arco k ,

\underline{x} e \bar{x} são os limitantes para os fluxos,

$d = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ é o vetor de demandas de energia onde d_i é a demanda no nó i .

Problema de Referência

As características do problema definido anteriormente serão estudados em um problema reduzido de referência, desenvolvido a partir do problema apresentado em [Bueno, 2005] com 7 nós (6 nós de carga e uma subestação “nó 1”) e 9 arcos. Supõe-se tensões nominais, resistências unitárias, demanda total de 24kW e apenas uma fonte de geração aleatória, localizada no nó 4 e com função de densidade de probabilidades discreta. A Figura 3 e a Tabela 1 apresentam, respectivamente, a rede de referência e as demandas em ampères (A) para cada nó da rede.

Demandas					
d2	d3	d4	d5	d6	d7
4	2,5	12	2	2	1,5

Tabela 1: Demandas da rede de referência.

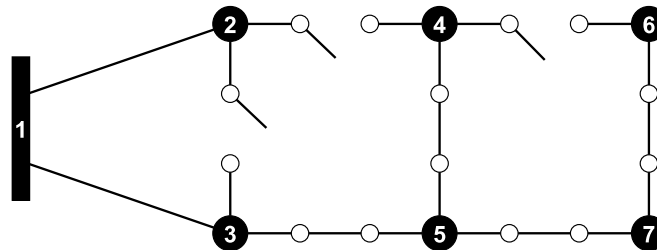


Figura 3: Rede de referência. Fonte: Queiroz 2005

Na Figura 4 é apresentado a solução ótima do caso base sem injeção no nó 4, o valor das perdas neste caso é de (510, 5 kW).

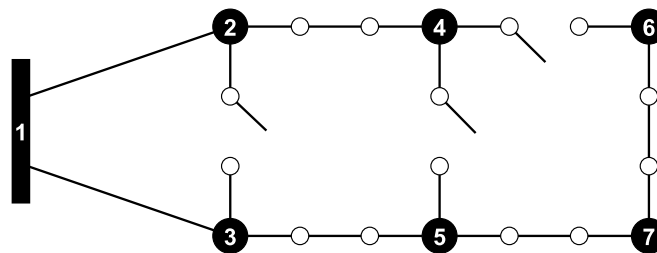


Figura 4: Configuração ótima da rede (caso base) sem injeção.

Inicialmente é avaliado a solução ótima para três valores de injeções, com valores determinísticos. Na Figura 4 são apresentados as soluções ótimas para os casos (A, B e C), com injeções 9, 15 e 18, respectivamente no nó 4, e na Tabela 2 são apresentados as probabilidades, injeções (em ampères) e as perdas ótimas (em kW) para cada caso estudado.

	Probabilidade	Injeção (A)	Perda (kW)
caso A	0,2	9	160,5
caso B	0,5	15	54,5
caso C	0,3	18	41

Tabela 2: Probabilidades, injeções (em ampères) e valores da perdas ótimas em (kW) para os casos (A, B e C)

Verifica-se que as configurações ótimas para os três casos são distintas e os valores de perdas são menores do que o caso sem injeção. Os valores de perdas reduzem na medida em que aumenta a geração. É apresentado um estudo com uma função de densidade de probabilidades discreta, onde as injeções possíveis são consideradas no caso anterior com as probabilidades descritas na Tabela 2. A Equação 7 apresenta a obtenção da função de densidade de probabilidades discreta (F_{dpd}), resultado da multiplicação das probabilidades (σ) com os valores de função de custo de

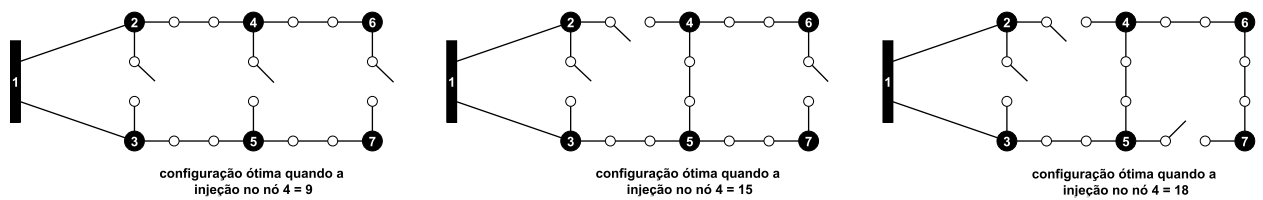


Figura 5: Configurações ótimas com injeção no nó 4 com os valores 9, 15 e 18 ampères, respectivamente.

cada uma das configurações e depois é somado os valores dos três casos possíveis para encontrar o menor valor de perda.

$$F_{dpd} = \sigma^A F_{dpd}^A + \sigma^B F_{dpd}^B + \sigma^C F_{dpd}^C \quad (7)$$

Na Figura 6 é apresentada a configuração ótima e a esperança dos valores de perdas é (82,5 kW). Esta configuração é caracterizada pela função objetivo representada na Equação (1). Observe que a esperança de valores de perdas está no intervalo caracterizado pelo maior e menor valor de perdas das situações determinísticas estudadas. Observa-se também que a configuração que minimiza a esperança matemática é distinta das configurações associadas aos casos A, B, C e ao caso base.

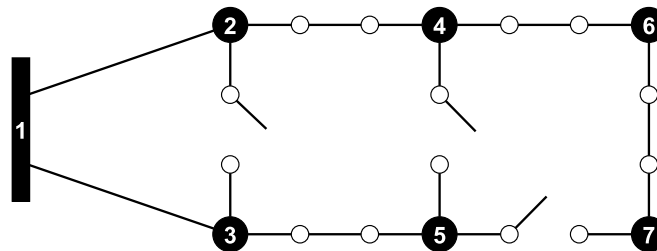


Figura 6: Configuração ótima com as injeções consideradas nos casos (A, B e C), com probabilidades.

Discussões Finais

O trabalho apresenta um estudo da evolução do problema de reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica e apresenta uma nova formulação para o problema, considerando a existência de geração distribuída com valores aleatórios.

A nova formulação é avaliada em um “problema maquete” de referência, que explora a influência dos aspectos aleatórios na definição de configurações ótimas.

Observa-se também que as aleatoriedades nas gerações podem levar a configurações ótimas distintas das melhores configurações para cada uma das possíveis realizações das aleatoriedades.

Em síntese o trabalho mostra que a existência de gerações distribuídas com valores aleatórios permite ampliar os benefícios de redução de perdas por reconfigurações das redes. Por outro lado, a obtenção desses benefícios requer a solução de problemas mais elaborados do que os que vinham sendo abordados na literatura. Consequentemente, metodologias mais elaboradas precisam ser desenvolvidas para a abordagem do problema de reconfiguração de redes radiais de distribuição de energia elétrica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES e do CNPq.

Referências

- Baran, M. E. e Wu, F. F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1401–1407.
- Bueno, E. A. (2000). Redução de perdas na distribuição de energia elétrica pelo método grasp. Mestrado, FEEC - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP - Brasil.
- Bueno, E. A. (2005). Redução de perdas técnicas através de reconfigurações de redes de distribuição de energia elétrica sob demandas variáveis. Doutorado, FEEC - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP - Brasil.
- Bueno, E. A., Lyra, C., e Cavellucci, C. (2004). Distribution network reconfiguration for loss reduction with variable demands. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2004 IEEE/PES*, p. 384–389.
- Cavellucci, C. e Lyra, C. (1997). Minimization of energy losses in electric power distribution systems by intelligent search strategies. *International Transactions in Operational Research*, 4(1):23–33.
- Civanlar, S., Grainger, J. J., Yin, H., e Lee, S. S. H. (1988). Distribution feeder for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):1217–1223.
- Esmailian, H. R. e Fadaeinedjad, R. (2015). Energy loss minimization in distribution systems utilizing an enhanced reconfiguration method integrating distributed generation. *IEEE Systems Journal*, 9(4):1430–1439.
- Franco, J. F., Rider, M. J., Lavorato, M., e Romero, R. (2013). A mixed-integer lp model for the reconfiguration of radial electric distribution systems considering distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 97:51–60.
- Jagtap, K. M. e Khatod, D. K. (2016). Loss allocation in radial distribution networks with various distributed generation and load models. *Electrical Power and Energy Systems*, 75:173–186.
- Lee, R. E. e Brooks, L. C. (1988). A method and its application to evaluate automated distribution control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3):1232–1240.
- Lightner, E. M. e Widergren, S. E. (2010). An orderly transition to a transformed electricity system. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1(1):3–10. ISSN 1949-3053.
- Liu, C. C., Lee, S. J., e Vu, K. (1989). Loss minimization of distribution feeders: Optimality and algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1281–1289.
- McDermott, T. E., Drezga, I., e Broadwater, R. P. (1999). A heuristic nonlinear constructive method for distribution system reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(2):478–483.
- Merlin, A. e Back, H. (1975). Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. *Proc. 5th Power System Computation Conf*, p. 1–18.
- Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M., e Ishihara, T. (1992). Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum re-configuration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 7(3): 1044–1051.
- Oliveira, F. J. A. d. (2014). Fontes alternativas de energia: Energia eólica e energia solar. In *Anais do Seminário Técnico Sobre Usinas Hidrelétricas Reversíveis*, Brasília. Eletrobrás.

- Queiroz, L. M. O. e Lyra, C. (2009). Adaptive hybrid genetic algorithm for technical loss reduction in distribution networks under variable demands. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(1): 445–453.
- Rao, R. S., Ravindra, K., Satish, K., e Narasimham, S. V. L. (2013). Power loss minimization in distribution system using network reconfiguration in the presence of distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(1):317–325.
- Rosseti, G. J. S., Oliveira, E. J. d., Oliveira, L. W. d., Silva Jr., I. C., e Peres, W. (2013). Optimal allocation of distributed generation with reconfiguration in electric distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 103:178–183.
- Shirmohammadi, D. e Hong, H. W. (1989). Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):1492–1498.
- Tahboub, A. M., Pandi, V. R., e Zeineldin, H. H. (2015). Distribution system reconfiguration for annual energy loss reduction considering variable distributed generation profiles. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(4):1677–1685.
- Taylor, T. e Lubkeman, D. (1990). Implementation of heuristic search strategies for distribution feeder reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(1):239–246.
- Vargas, P. A., Lyra, C., e Von Zuben, F. J. (2003). Redução de perdas em redes de distribuição de energia elétrica através de sistemas classificadores. *Sba Controle & Automação*, 14(3):298–308.
- Wu, Y. K., Lee, C. Y., Liu, L. C., e Tsai, S. H. (2002). Study of reconfiguration for the distribution system with distributed generators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(3):1678–1685.
- Zhu, J. Z. (2002). Optimal reconfiguration of electrical distribution network using the refined genetic algorithm. *Electric Power Systems Research*, 62(1):37–42.