

Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Usando o Algoritmo Modificado de Merlin-Back

Amanda Bortoloci * Leonardo H. Macedo ** Rubén Romero ***

* Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP (e-mail: amanda.ishikawa@unesp.br).

** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP (e-mail: leohfmp@ieee.org)

*** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP (e-mail: ruben.romero@unesp.br)

Abstract: This work presents a modified version of the Merlin-Back constructive heuristic algorithm applied to the distribution system reconfiguration problem. The Merlin-Back algorithm is well known for its simplicity in understanding and computational implementation. This algorithm finds good-quality solutions in very short computational times. However, as the complexity of the reconfiguration problem increases, the Merlin-Back algorithm does not find the optimal solutions. In this work, the Merlin-Back heuristic is analyzed in detail, identifying its quality and defects. In this way, it was possible to introduce a modification in this heuristic to increase the potential to find excellent quality solutions. The tests show that the modified algorithm finds the optimal solutions of three electrical systems widely used in the literature for distribution system reconfiguration.

Resumo: Neste trabalho é apresentada uma versão modificada do algoritmo heurístico construtivo de Merlin-Back aplicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. O algoritmo de Merlin-Back é muito conhecido pela simplicidade na compreensão e na implementação computacional. Esse algoritmo encontra soluções de boa qualidade em tempos computacionais muito pequenos. Entretanto, a medida que aumenta a complexidade do problema de reconfiguração, o algoritmo de Merlin-Back não encontra as soluções ótimas. Neste trabalho é analisada de forma detalhada a heurística de Merlin-Back, identificando suas qualidades e defeitos. Dessa forma, foi possível introduzir uma modificação nessa heurística para aumentar o potencial de encontrar soluções de excelente qualidade. Os testes mostram que o algoritmo modificado encontra as soluções ótimas de três sistemas elétricos muito usados na literatura de reconfiguração de sistemas de distribuição.

Keywords: Merlin-Back heuristic; optimization of electrical energy distribution systems; power flow for radial systems; power flow for weakly meshed systems; reconfiguration of distribution systems.

Palavras-chaves: Fluxo de potência para sistemas fracamente malhados; fluxo de potência para sistemas radiais; heurística de Merlin-Back; otimização de sistemas de distribuição de energia elétrica; reconfiguração de sistemas de distribuição.

1. INTRODUÇÃO

O problema da reconfiguração ótima de sistemas de distribuição (RSD) consiste em encontrar uma topologia radial do sistema, com alguns ramos operando e outros fora de operação, de forma que seja otimizado um objetivo, tipicamente a redução das perdas do sistema para um dado perfil de carga. O estado normal de operação de um sistema de distribuição é em configuração radial. Assim, em uma

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), proc. 305852/2017-5, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), proc. 2015/21972-6, 2018/20355-1 e 2020/13949-2.

determinada configuração, o sistema tem um conjunto de circuitos que estão energizados e estes circuitos formam a configuração radial, chamada de árvore do ponto de vista da teoria de grafos. Por outro lado, os circuitos que não estão energizados são chamados de ramos de ligação. Uma troca adequada de um ramo de ligação com um ramo da árvore leva a outra configuração radial. Portanto, o problema de reconfiguração ótima de um sistema de distribuição consiste em encontrar aquela configuração radial, do espaço de configurações radiais possíveis, que produz as perdas mínimas de potência ativa no sistema de distribuição. Este processo de busca ótima implica analisar, implícita ou explicitamente, todas as configurações radiais possíveis. Outra forma equivalente de formular o problema de reconfiguração de redes de distribuição é a seguinte: dado

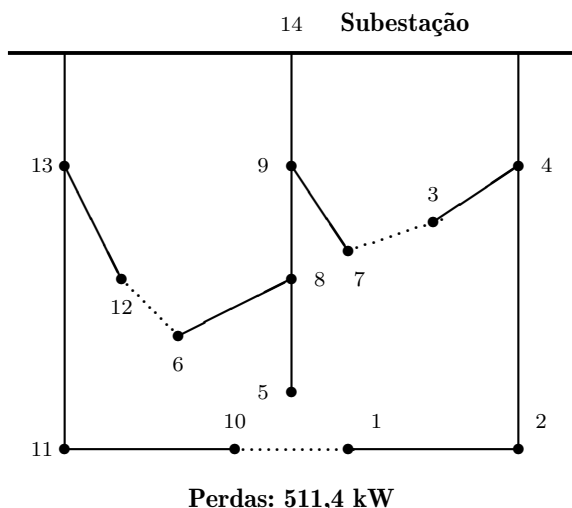


Figura 1. Sistema inicial de distribuição.

um grafo, encontrar uma árvore geradora que minimize as perdas satisfazendo as seguintes restrições: (1) os limites de tensão nas barras do sistema devem ser respeitados, (2) a capacidade de corrente nos alimentadores deve ser respeitada, (3) as duas leis de Kirchhoff representadas pelo problema de fluxo de potência devem ser cumpridas e (4) a configuração deve ser radial.

A restrição de rede radial tornou difícil por muito tempo a elaboração de uma modelagem matemática adequada para o problema RSD através de relações algébricas relativamente simples. Esse problema foi resolvido em Lavorato et al. (2012). Adicionalmente, a natureza combinatória tornou este problema difícil de resolver. Por esse motivo a RSD é um dos problemas mais pesquisados entre os problemas de otimização da operação de sistemas elétricos de potência. Na Fig. 1, é apresentada a configuração inicial de um sistema de distribuição muito usado na literatura especializada. Atualmente, pode-se provar que esse sistema, de tamanho reduzido, tem 190 topologias radiais. Esse tipo de análise é recente na literatura especializada (Macedo et al., 2018). Em um sistema real, aparece a explosão combinatória do número de candidatos à topologia radial e, portanto, à medida que o tamanho do sistema cresce, é mais difícil resolver o problema da reconfiguração.

A maior dificuldade que existe ao se resolver o problema de RSD é o caráter combinatório do problema, isto é, o número de topologias radiais existentes cresce de forma explosiva, principalmente com o aumento dos ramos de ligação. O sistema de distribuição tem topologia malhada, mas deve operar em topologia radial. Supor que um sistema de distribuição tem n_b barras e n_r ramos. O número de ramos de ligação (ramos abertos em uma topologia radial) é igual a $n_{lig} = n_r - n_b + 1$. Dessa forma, a complexidade do problema aumenta com o aumento de n_{lig} . Para resolver o problema de RSD foram usados praticamente todos os métodos de otimização conhecidos. Esses métodos podem ser classificados como técnicas clássicas de otimização, heurísticas e meta-heurísticas.

As heurísticas são técnicas de otimização muito simples que geralmente encontram soluções de boa qualidade de

problemas complexos. Essas técnicas são simples de entender e de implementar, apresentam tempos de processamento muito pequenos, mesmo para sistema de grande porte e de complexidade elevada. Entretanto, a medida que aumenta a complexidade do problema, a qualidade da solução encontrada se afasta de forma significativa em relação às soluções ótimas e quase ótimas. A literatura especializada do problema de RSD apresenta muitas heurísticas. Entre as mais conhecidas podem ser citadas as propostas apresentadas em Lavorato et al. (2012); Macedo et al. (2018); Merlin and Back (1975); Civanlar et al. (1988); Baran and Wu (1989); Schmidt et al. (2005); Gomes et al. (2006); Peng et al. (2015). Assim, a heurística de Merlin-Back (HMB) é uma das mais populares na literatura de RSD. As meta-heurísticas também foram muito usadas para resolver o problema da reconfiguração. Elas geralmente encontram soluções de excelente qualidade com tempos de processamento maiores que as heurísticas. Meta-heurísticas de excelente desempenho para o problema da reconfiguração podem ser encontradas em Mendoza et al. (2006); Carreno et al. (2008); Possagnolo (2015); Delbem et al. (2005); Chiou et al. (2005); Samman et al. (2020). Nos últimos anos apareceram propostas de otimização usando técnicas clássicas de otimização, isto é, monta-se um modelo matemático completo e se resolve o modelo usando *solvers* comerciais. As principais propostas dessa forma de otimização podem ser encontradas em Lavorato et al. (2012); Jabr et al. (2012); Ahmadi and Martí (2015). Uma proposta, chamada de força bruta, também pode identificar as topologias radiais de um sistema de distribuição, como a proposta por Morton and Mareels (2000).

Neste trabalho é proposta uma versão modificada da heurística de Merlin-Back para o problema de reconfiguração, com o objetivo de melhorar a qualidade das soluções obtidas. A proposta é testada em três sistemas amplamente estudados na literatura.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta o problema de reconfiguração e a heurística de Merlin-Back; a Seção 3 apresenta as modificações propostas na heurística de Merlin-Back; a Seção 4 apresenta os testes e os resultados obtidos para os sistemas de 14, 33 e 84 barras; a Seção 5 apresenta uma análise crítica dos resultados; e, por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões do trabalho.

2. A RECONFIGURAÇÃO E A HEURÍSTICA DE MERLIN-BACK

Deve-se observar que por décadas não existia um modelo matemático completo para o problema da reconfiguração. A dificuldade era a forma de representar a restrição de que toda topologia factível e, portanto, a ótima deve ser radial. Particularmente, a ideia fundamental era de representar a restrição de topologia radial através de restrições algébricas simples. Esse problema foi contornado a partir de 2012 e atualmente existem várias formas de contornar esse problema (Lavorato et al., 2012; Jabr et al., 2012; Ahmadi and Martí, 2015). Entretanto, neste trabalho analisa-se uma heurística e, portanto, não é necessário um modelo matemático. Dessa forma, propositalmente, apresenta-se o

problema da reconfiguração de forma genérica na seguinte forma:

Minimizar as perdas

Sujeito a:

As duas leis de Kirchhoff

Os limites de tensão nas barras

Os limites das correntes nos ramos

A topologia deve ser radial

Um algoritmo heurístico construtivo (AHC) representa a forma mais simples de se resolver um problema de otimização. Assim, é gerada uma solução, geralmente de boa qualidade, em um processo passo-a-passo. Em cada passo é incorporada (ou retirada) uma componente da proposta de solução em construção. O processo termina quando um critério de parada for satisfeito (geralmente quando se encontra uma solução factível e/ou de boa qualidade). O componente que é incorporado em cada passo na solução em construção é determinado pelo indicador de sensibilidade do AHC.

No problema de RSD, um dos AHCs mais conhecidos, pela simplicidade e o desempenho razoável, é o AHC de Merlin and Back (1975). Nesse AHC, em cada passo se resolve um problema de fluxo de potência do sistema iniciando o processo de otimização com todos os ramos fechados. O indicador de sensibilidade especifica que em cada passo deve ser retirado o ramo com o menor valor de fluxo de potência desde que a retirada desse ramo preserve o sistema restante conexo. Assim, em n_{lig} passos é encontrada uma topologia radial (geralmente de boa qualidade). O argumento para retirar o ramo menos carregado em cada passo é justificado pelo fato de que essa decisão produz a menor mudança de distribuição de fluxos de potência em relação à topologia com todos os ramos fechados. O argumento de que a topologia com todos os ramos fechados é aquela que apresenta menores valores de perdas é aceitável do ponto de vista prático (quase sempre acontece esse tipo de comportamento), mas é uma afirmação teoricamente errada. Merlin-Back prova a validade dessa premissa usando um modelo simplificado de rede, mas essa premissa não é teoricamente verdadeira quando é usado o modelo AC da rede de distribuição.

O AHC de Merlin-Back assume a seguinte forma:

Inicialização: A topologia corrente inicial é formada com todas as chaves do sistema de distribuição fechadas, isto é, com a topologia malhada. Essa topologia passa a ser a topologia corrente.

Repetir os passos (1) a (4) até que uma topologia radial seja obtida:

- (1) Para a topologia corrente, identificar cada ramo que pode ser aberto mantendo a topologia restante da rede conexa. Esses ramos formam a lista L .
- (2) Resolver um problema de fluxo de potência para a topologia corrente e calcular o fluxo de potência aparente em cada ramo da lista L da topologia corrente;
- (3) Para os ramos na lista L , encontrar aquele com o menor valor de fluxo de potência aparente;

- (4) Abrir a chave do ramo identificado no passo anterior e atualizar a topologia corrente retirando o ramo aberto.

Terminar: Calcular a função objetivo da solução resolvendo um problema de fluxo de potência radial para a topologia radial encontrada.

Deve-se resolver um problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados em cada passo da heurística de Merlin-Back e um problema de fluxo de potência para redes radiais para calcular as perdas da topologia radial encontrada. Dessa forma, a HMB resolve n_{lig} problemas de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados e um problema de fluxo de potência para redes radiais. Neste trabalho, foi implementado o algoritmo de fluxo de potência especializado para sistemas radiais e fracamente malhados apresentado em Shirmohammadi et al. (1988). Esse algoritmo é muito rápido e robusto para resolver sistemas existentes na literatura especializada relacionados com o problema de RSD.

Os argumentos usados por Merlin-Back para justificar o desempenho do AHC são os seguintes:

- A melhor topologia de operação de um sistema de distribuição visando a minimização das perdas é a topologia com todos os ramos fechados. Essa conclusão é decorrente de uma análise aproximada da operação de um sistema de distribuição. Testes experimentais mostram que essa afirmação é frequentemente verdadeira, mas existem casos em que essa hipótese não é verdadeira.
- Se for aceita a hipótese de que a rede com todos os ramos ligados opera com os menores valores de perdas, então a distribuição dos fluxos de potência através desses ramos corresponde às perdas mínimas. Portanto, a melhor topologia radial visando redução das perdas deve ser aquela que produz uma distribuição de fluxos o mais perto possível da distribuição de fluxos da topologia com todos os ramos fechados.
- Aceitando a conclusão anterior, então a estratégia fundamental consiste em encontrar uma topologia radial em que os fluxos nos ramos se desviem o mínimo possível em relação aos fluxos nos ramos correspondentes à topologia com todos os ramos fechados.
- A estratégia encontrada por Merlin-Back para implementar a hipótese anterior consiste em usar um AHC onde, em cada passo, é desligado um ramo. O ramo que deve ser desligado é aquele que preserva a nova topologia conexa e leva o menor valor de fluxo de potência aparente.

A estratégia de Merlin-Back incorpora várias aproximações e, portanto, as topologias radiais encontradas geralmente não são ótimas para sistemas de distribuição de tamanho razoável.

3. HEURÍSTICA DE MERLIN-BACK MODIFICADA

Para melhorar o desempenho da heurística de Merlin-back foi incorporado um passo adicional, chamado de melhoria local. Deve-se observar que muitas heurísticas e meta-heurísticas incorporam um passo adicional no final do processo. Esse tipo de estratégia é tipicamente uma estratégia rápida que tenta encontrar uma solução de melhor

qualidade na vizinhança da solução final identificada pela heurística ou meta-heurística. Essa fase de melhoria local deve ser computacionalmente rápida.

A heurística modificada consiste apenas na adição de uma etapa na heurística de Merlin-Back. Essa etapa, implementada após o passo (4) da HMB assume a seguinte forma:

Fase de melhoria local:

- (5) Para cada ramo desligado na solução encontrada pela heurística de Merlin-Back, identificar o laço gerado ao fechar o ramo desligado. Assim, pode-se identificar os dois ramos vizinhos do ramo desligado, um ramo para cada lado. Quando se abre um ramo vizinho e se fecha o ramo desligado, gera-se uma topologia radial vizinha. Resolver um problema de fluxo de potência radial para cada topologia radial desse tipo. Caso uma topologia vizinha for de melhor qualidade, então realizar a transição, fechando o ramo de ligação e abrindo o ramo vizinho que identifica a melhor topologia radial vizinha, encontrando uma nova topologia corrente.
- (6) Repetir o passo anterior para cada ramo desligado na topologia encontrada pela heurística de Merlin-Back a partir da nova topologia corrente.

A sequência em que os ramos desligados são analisados é a mesma sequência em que esses ramos foram desligados pela HMB (ver Tabela 1 e Tabela 2).

A fase de melhoria local é mostrada usando a topologia radial encontrada pela HMB mostrada na Fig. 2 para o sistema de 33 barras. Assim, supor que o processo de melhoria local é iniciado analisando os ramos abertos na seguinte sequência: 10-11, 14-15, 32-33, 7-8 e 25-29. Fechando-se o ramo 10-11 podem ser geradas 2 topologias radiais vizinhas. Podem ser abertos, em cada passo, os ramos 9-10 e 11-12. Dessa forma, resolve-se 2 problemas de fluxo de potência radial para calcular as perdas de cada topologia radial vizinha. Supor que a topologia radial encontrada abrindo-se o ramo 9-10 produz menores perdas. Se essas perdas são menores quando comparadas com as perdas da topologia radial com o ramo 10-11 aberto, então deve ser realizada a transição fechando-se o ramo 10-11 e abrindo-se o ramo 9-10 para encontrar a nova topologia corrente. Em caso contrário, a topologia corrente não muda. O processo deve continuar até avaliar todos os ramos abertos na topologia encontrada pela heurística de Merlin-Back.

4. TESTES E RESULTADOS

A heurística de Merlin-Back foi implementada computacionalmente no ambiente MATLAB. Os problemas de fluxo de potência (radial e fracamente malhado) foram resolvidos usando o método de varredura proposto em Shirmohammadi et al. (1988). Foram escolhidos três sistemas muito conhecidos na literatura especializada para a realização de testes. Esses sistemas são conhecidos como sistemas de 14, 33 e 84 barras.

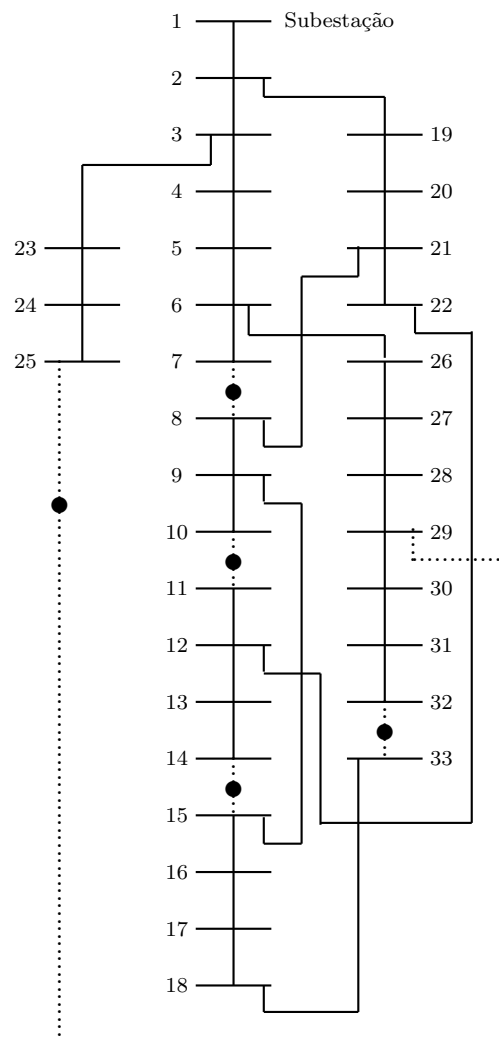


Figura 2. Sistema de 33 barras.

4.1 Sistema de 14 barras

Os dados desse sistema estão disponíveis em Civanlar et al. (1988) e a topologia é mostrada na Fig. 1. O sistema tem 14 barras, 16 ramos e a subestação é a barra 14. A tensão nominal é de 23 kV, existe uma demanda ativa de 28.700 kW, demanda reativa de 10.400 kVAr e potência reativa capacitiva instalada de 4.500 kVAr. Existem 190 topologias radiais nesse sistema de distribuição (Macedo et al., 2018).

Neste caso a HMB e a versão modificada, apresentada neste trabalho, encontram a mesma solução. A literatura especializada reconhece essa solução ótima com perdas de 466,13 kW. Pode-se verificar a otimalidade desta solução testando todas as 190 topologias radiais possíveis. Os ramos abertos, em sequência, são os seguintes: 7(9-7), 16 (10-1) e 8 (8-6). Nessa notação, o primeiro valor significa que foi aberto o ramo 7 que se encontra ligado com as barras 9 e 7. A HMB resolve 3 problemas de fluxo de potência malhados (FPMs) e um problema de fluxo de potência radial (FPR). O HMB modificado resolve 3 FPMs

Tabela 1. Comparação de Propostas de Solução do Sistema de 33 Barras

Merlin-Back		Solução ótima	
Ramo	Barras	Ramo	Barras
10	10-11	9	9-10
14	14-15	14	14-15
32	32-33	32	32-33
7	7-8	7	7-8
37	25-29	37	25-29

e 7 FPRs. Deve-se observar que a topologia malhada apresenta 426,26 kW de perdas.

4.2 Sistema de 33 barras

Os dados desse sistema estão disponíveis em Baran and Wu (1989). O sistema tem 33 barras, 37 ramos e a subestação é a barra 1. A tensão nominal é de 12,66 kV, existe uma demanda ativa de 3.715 kW e demanda reativa de 2.300 kVAR. Existem 50751 topologias radiais nesse sistema de distribuição (Macedo et al., 2018) e a topologia do sistema é mostrada na Fig. 2.

Neste caso a HMB e a versão modificada, apresentada neste trabalho, não encontram a mesma solução. A HMB encontra uma topologia radial com perdas de 140,28 kW. Por outro lado, a HMB modificada encontra a solução ótima desse sistema, reconhecida pela literatura especializada, com perdas de 139,55 kW. Pode-se verificar a otimalidade desta solução testando todas as 50751 topologias radiais possíveis. A Tabela 1 mostra a sequência de desligamento dos ramos realizada pela HMB e na mesma tabela é mostrada a solução ótima.

Da Tabela 1, pode-se observar que a HMB erra ao desligar o ramo 10 na primeira iteração e os outros ramos desligados fazem parte da topologia ótima. Assim, a única diferença entre a HMB e a topologia ótima, acontece quando a HMB desliga o ramo 10 e na topologia ótima é desligado o ramo 9. Adicionalmente esses ramos são vizinhos.

A HMB resolve 5 problemas de FPMs e um problema de FPR. O HMB modificado resolve 5 FPMs e 11 FPRs. Deve-se observar que a topologia malhada apresenta 123,29 kW de perdas. Também é importante observar que as seis topologias identificadas em sequência pela HMB apresentam os seguintes valores de perdas: 123,29 kW; 123,26 kW; 123,85 kW; 124,24 kW; 125,28 kW e 140,28 kW. Nessa sequência, 123,29 kW é corresponde às perdas da topologia inicial malhada e 140,28 kW da topologia radial. Dessa forma a topologia malhada apresenta maiores valores de perdas que a topologia com o ramo 10 desligado, contradizendo a hipótese de Merlin-Back. Também, as perdas das primeiras três topologias são muito próximas e apenas a topologia radial apresenta um aumento significativo das perdas. Nesse contexto, a topologia com o ramo 37 fechado apresenta perdas de 125,28 kW (uma excelente topologia com apenas um laço).

4.3 Sistema de 84 barras

Os dados desse sistema se encontram em Chiou et al. (2005) e a topologia de operação é mostrada na Fig. 3. O sistema tem 84 barras, 96 ramos e a subestação é a barra 84. A tensão nominal é de 11,4 kV, existe uma demanda

Tabela 2. Comparação de Propostas de Solução do Sistema de 84 Barras

Merlin-Back		Solução ótima	
Ramo	Barras	Ramo	Barras
33	32-33	34	33-34
42	41-42	42	41-42
89	14-18	89	14-18
84	5-55	55	54-55
39	38-39	39	38-39
63	62-63	62	61-62
7	6-7	7	6-7
82	81-82	83	82-83
86	11-43	86	11-43
88	13-76	13	12-13
92	28-32	92	28-32
72	71-72	72	71-72
90	16-26	90	16-26

ativa de 28.351 kW e demanda reativa de 20.700 kVAR. Existem $3,5196 \times 10^{11}$ topologias radiais nesse sistema de distribuição (Macedo et al., 2018).

Neste caso a HMB e a versão modificada, apresentada neste trabalho, não encontram a mesma solução. A HMB encontra uma topologia radial com perdas de 471,73 kW. Por outro lado, a HMB modificada encontra a solução ótima desse sistema, reconhecida pela literatura especializada, com perdas de 469,88 kW. Pode-se verificar a otimalidade desta solução utilizando-se um modelo de otimização matemática relaxado de programação cônica de segunda ordem inteira-mista, como discutido em Jabr et al. (2012). A Tabela 2 mostra a sequência de desligamento dos ramos realizada pela HMB e na mesma tabela é mostrada a solução ótima.

Da Tabela 2, pode-se observar que a HMB erra ao desligar o ramo 33 na primeira iteração. Comparando com a solução ótima, existem 5 ramos que não correspondem à solução ótima na solução encontrada pelo HMB (os ramos 33, 84, 63, 82 e 88).

A HMB resolve 13 problemas de FPMs e um problema de FPR. O HMB modificado resolve 13 FPMs e 27 FPRs. Deve-se observar que a topologia malhada apresenta 462,68 kW de perdas. Também é importante observar que as 9 primeiras topologias identificadas em sequência pela HMB apresentam valores de perdas muito parecidos. Particularmente, após desligar os nove primeiros ramos (os ramos 33, 42, 89, 84, 39, 63, 7, 82 e 86) a topologia resultante apresenta perdas de 462,04 kW (valor menor que para a topologia malhada com todos os ramos ligados). Dessa forma, esse teste experimental prova que o desligamento de alguns ramos pode diminuir as perdas, contrariando o argumento de Merlin-Back. Nesse contexto, a topologia com 9 ramos desligados e perdas de 462,04 kW é uma excelente proposta de solução em termos de operação e representa uma topologia próxima da topologia radial (uma excelente topologia com apenas quatro laços independentes).

5. ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Uma análise detalhada da heurística de Merlin-Back mostrou as qualidades e as fraquezas dessa heurística. Pode-se verificar que para sistemas de tamanho razoável, a HMB

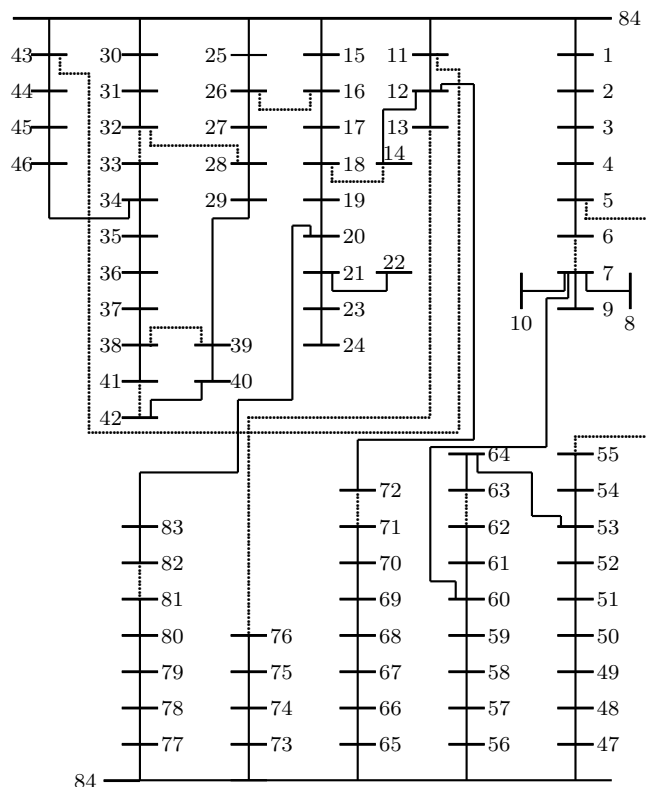


Figura 3. Sistema de 84 barras.

encontra apenas soluções de boa qualidade. A vantagem da HMB é que ela precisa de tempos de processamento muito pequenos, isto é, menos de um segundo para os sistemas avaliados. Dessa forma, pode ser usada em aplicações onde o tempo de processamento é crítico.

Outro aspecto observado nos testes é que para cada ramo aberto, nas fases iniciais do processo, as perdas aumentam pouco. Apenas nas iterações finais (muito próximas da topologia radial) as perdas aumentam de forma significativa. Também, no caso de redes de tamanho razoável, a rede malhada, com todos os ramos ligados, nem sempre é a topologia com menores valores de perdas, contrariando a hipótese de Merlin-Back. Essas particularidades já foram observadas em Ritter et al. (2015). Dessa forma, redes não necessariamente radiais, mas próximas das radiais podem representar a melhor estratégia de operação nas redes de distribuição do futuro. A heurística modificada de Merlin-back apresentada neste trabalho encontrou as topologias ótimas dos sistemas usados em testes. Obviamente, para redes de distribuição de maior complexidade, a proposta apresentada não deve encontrar as topologias ótimas como acontece com as técnicas heurísticas de otimização. Dessa forma, deve-se idealizar novas estratégias mais eficientes sem incrementar, de forma significativa, o tempo de processamento.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisada de forma crítica a heurística de Merlin-Back, uma das heurísticas mais conhecidas para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição

radiais. Após verificar que essa heurística não encontra as soluções ótimas de problemas de complexidade razoável, foi introduzida uma modificação, i.e., uma etapa adicional, no algoritmo. Essa estratégia modificada foi capaz de encontrar as topologias ótimas dos três sistemas usados nos testes. Também, foi realizada uma análise crítica das qualidades e das limitações da heurística de Merlin-Back. Em trabalhos futuros, pretende-se desenvolver estratégias heurísticas mais sofisticadas a partir da proposta de Merlin-Back com capacidade de encontrar soluções de excelente qualidade de sistemas de complexidade elevada sem incrementar de forma significativa o tempo de processamento.

REFERÊNCIAS

- Ahmadi, H. and Martí, J.R. (2015). Mathematical representation of radiality constraint in distribution system reconfiguration problem. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, 293–299. doi: 10.1016/j.ijepes.2014.06.076.
- Baran, M. and Wu, F. (1989). Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2), 1401–1407. doi:10.1109/61.25627.
- Carreno, E., Romero, R., and Padilha-Feltrin, A. (2008). An efficient codification to solve distribution network reconfiguration for loss reduction problem. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(4), 1542–1551. doi:10.1109/tpwrs.2008.2002178.
- Chiou, J.P., Chang, C.F., and Su, C.T. (2005). Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 668–674. doi:10.1109/tpwrs.2005.846096.
- Civanlar, S., Grainger, J., Yin, H., and Lee, S. (1988). Distribution feeder reconfiguration for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(3), 1217–1223. doi:10.1109/61.193906.
- Delbem, A., deCarvalho, A., and Bretas, N. (2005). Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution system reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(1), 425–436. doi:10.1109/tpwrs.2004.840442.
- Gomes, F., Carneiro, S., Pereira, J., Vinagre, M., Garcia, P., and Araujo, L.D. (2006). A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4), 1616–1623. doi: 10.1109/tpwrs.2006.879290.
- Jabr, R.A., Singh, R., and Pal, B.C. (2012). Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(2), 1106–1115. doi:10.1109/tpwrs.2011.2180406.
- Lavorato, M., Franco, J.F., Rider, M.J., and Romero, R. (2012). Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1), 172–180. doi:10.1109/tpwrs.2011.2161349.
- Macedo, L.H., Franco, J.F., Mahdavi, M., and Romero, R. (2018). A contribution to the optimization of the reconfiguration problem in radial distribution systems. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 29(6), 756–768. doi:10.1007/s40313-018-0415-6.

- Mendoza, J., Lopez, R., Morales, D., Lopez, E., Dessante, P., and Moraga, R. (2006). Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: Real application. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(2), 948–954. doi:10.1109/tpwrs.2006.873124.
- Merlin, A. and Back, H. (1975). Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In *Fifth Power Systems Computation Conference*, 1–18.
- Morton, A. and Mareels, I. (2000). An efficient brute-force solution to the network reconfiguration problem. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 15(3), 996–1000. doi:10.1109/61.871365.
- Peng, Q., Tang, Y., and Low, S.H. (2015). Feeder reconfiguration in distribution networks based on convex relaxation of OPF. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 1793–1804. doi:10.1109/tpwrs.2014.2356513.
- Possagnolo, L.H.F.M. (2015). *Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável*. Master’s thesis, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. URL <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/126489>.
- Ritter, D., Franco, J.F., and Romero, R. (2015). Analysis of the radial operation of distribution systems considering operation with minimal losses. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67, 453–461. doi:10.1016/j.ijepes.2014.12.018.
- Samman, M.A., Mokhlis, H., Mansor, N.N., Mohamad, H., Suyono, H., and Sapari, N.M. (2020). Fast optimal network reconfiguration with guided initialization based on a simplified network approach. *IEEE Access*, 8, 11948–11963. doi:10.1109/ACCESS.2020.2964848.
- Schmidt, H., Ida, N., Kagan, N., and Guaraldo, J. (2005). Fast reconfiguration of distribution systems considering loss minimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(3), 1311–1319. doi:10.1109/tpwrs.2005.846180.
- Shirmohammadi, D., Hong, H., Semlyen, A., and Luo, G. (1988). A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2), 753–762. doi:10.1109/59.192932.