

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

AMANDA MEIRA ISHICAVA BORTOLOCI

**ESTRATÉGIA HEURÍSTICA ESPECIALIZADA PARA A
RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
RADIAIS**

Ilha Solteira

2024

AMANDA MEIRA ISHICAVA BORTOLOCI

**ESTRATÉGIA HEURÍSTICA ESPECIALIZADA PARA A
RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO
RADIAIS**

Trabalho de Graduação apresentado à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Henrique
Faria Macedo Possagnolo

Ilha Solteira

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B739e Bortoloci, Amanda Meira Ishicava.
Estratégia heurística especializada para a reconfiguração de sistemas de distribuição radiais: NA / Amanda Meira Ishicava Bortoloci. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
64 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2024

Orientador: Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo

Inclui bibliografia

1. Algoritmo heurístico construtivo. 2. Fluxo de potência para redes radiais. 3. Heurísticas. 4. Otimização de sistemas elétricos. 5. Reconfiguração da distribuição.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte e quatro dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, a discente **Amanda Meira Ishicava Bortoloci**, matriculada sob o nº 182055469, tendo como banca examinadora o seu orientador, o Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo, o Doutorando César Augusto Romero Reynoso e o Dr. Lucas do Carmo Yamaguti, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Estratégia Heurística Especializada para a Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais**", obtendo a nota 10,0 (dez vírgula zero) e conceito aprovada.

Leonardo H. F. M. Possagnolo

Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo

Possagnolo

- Orientador -

Amanda M. Z. B.

Amanda Meira Ishicava Bortoloci

- Discente -

César Augusto R. Reynoso

Doutorando César Augusto Romero Reynoso

- Membro da Banca -

Lucas do Carmo Yamaguti

Dr. Lucas do Carmo Yamaguti

- Membro da Banca -

Agradecimentos

Aos meus pais Alessandra Meira e Fábio Ishicava Bortoloci por todo o esforço investido na minha educação.

Ao meu noivo João Victor da Cunha por todo o apoio durante esses anos de graduação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo Henrique Faria Macedo Possagnolo por ter aceitado me orientar nesse trabalho de graduação.

A todos os meus professores do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela excelência da qualidade técnica.

A todos os meus amigos do curso de graduação, em especial Sophie Carraro e Thiago Lombarde, que compartilharam dos inúmeros desafios que enfrentamos, sempre com o espírito colaborativo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de Iniciação Científica, processo nº 2020/13949-2.

Resumo

O presente trabalho propõe a idealização e implementação computacional de um algoritmo heurístico especializado aplicado ao problema da reconfiguração de alimentadores primários em sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. Assim, é apresentada uma versão modificada do algoritmo heurístico construtivo (AHC) de Merlin-Back, conhecida pela simplicidade na compreensão e na implementação computacional. Embora o AHC de Merlin-Back encontre soluções de boa qualidade em tempos computacionais pequenos, este não encontra a solução ótima para problemas de reconfiguração mais complexos. Neste trabalho foi implementado computacionalmente um algoritmo de fluxo de potência radial de tipo varredura que resolve problemas de fluxo de potência de sistemas radiais e levemente malhados, e foi realizada a interpretação teórica e implementação computacional do AHC de Merlin-Back, junto com a avaliação crítica do mesmo. Com base nisso, foi introduzida a reformulação do AHC de Merlin-Back que tem a capacidade de encontrar as soluções ótimas de três sistemas muito usados na literatura de reconfiguração de sistemas de distribuição.

Palavras-chave: Algoritmo heurístico construtivo, fluxo de potência para redes radiais, heurísticas, otimização de sistemas elétricos, reconfiguração da distribuição.

Abstract

The present work proposes the idealization and computational implementation of a specialized heuristic algorithm applied to the problem of reconfiguring primary feeders in radial electric power distribution systems. Thus, a modified version of Merlin-Back's constructive heuristic algorithm (CHA), known for its simplicity in understanding and computational implementation, is presented. Although Merlin-Back's CHA finds good-quality solutions in small computational times, it does not find the optimal solution for more complex reconfiguration problems. In this paper, a sweep-type radial power flow algorithm that solves power flow problems of radial and slightly meshed systems was computationally implemented. Moreover, a theoretical interpretation and computational implementation of Merlin-Back's CHA was also performed, along with critical evaluation of it. Based on this, the reformulation of Merlin-Back's CHA that has the ability to find the optimal solutions of three systems widely used in the distribution system reconfiguration literature was introduced.

Keywords: Constructive heuristic algorithm, electricity system optimization, heuristics, power flow for radial systems, reconfiguration of distribution systems.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema inicial de distribuição	11
Figura 2 – Topologia base do sistema de 33 barras	30
Figura 3 – Topologia base do sistema de 84 barras	33
Figura 4 – Sistema de distribuição radial	40
Figura 5 – Sistema de distribuição radial com ramos ordenados em camadas . . .	40
Figura 6 – Trecho de um sistema de distribuição radial	41
Figura 7 – Algoritmo de fluxo de potência de varredura para sistemas radiais . . .	44
Figura 8 – Sistema de distribuição fracamente malhado	45
Figura 9 – Circuito equivalente de Thévenin da rede vista pelos <i>breakpoints</i>	45
Figura 10 – Algoritmo de fluxo de potência de varredura para sistemas fracamente malhados	48
Figura 11 – Topologia base do sistema de 14 barras	58
Figura 12 – Topologia base do sistema de 33 barras	60
Figura 13 – Topologia base do sistema de 84 barras	63

Lista de tabelas

Tabela 1 – Sistema de 14 barras - Todos os ramos fechados - Perdas: 426,26 kW	20
Tabela 2 – Sistema de 14 barras - Um ramo aberto - Perdas: 428,24 kW	20
Tabela 3 – Sistema de 14 barras - Dois ramos abertos - Perdas: 430,03 kW	21
Tabela 4 – Sistema de 14 barras - Três ramos abertos - Perdas: 466,13 kW	21
Tabela 5 – Sistema de 33 barras - Todos os ramos fechados - Perdas: 123,29 kW	23
Tabela 6 – Sistema de 33 barras - Um ramo aberto - Perdas: 123,26 kW	23
Tabela 7 – Sistema de 33 barras - Dois ramos abertos - Perdas: 123,85 kW	24
Tabela 8 – Sistema de 33 barras - Três ramos abertos - Perdas: 124,24 kW	24
Tabela 9 – Sistema de 33 barras - Quatro ramos abertos - Perdas: 125,28 kW	25
Tabela 10 – Sistema de 33 barras - Cinco ramos abertos - Perdas: 140,28 kW	25
Tabela 11 – Comparação de propostas de soluções do sistema de 33 barras	29
Tabela 12 – Comparação de propostas de soluções do sistema de 84 barras	31
Tabela 13 – Fluxo de potência do sistema de 14 barras em malha fechada - Perdas: 426,26 kW	49
Tabela 14 – Tensão nas barras do sistema de 14 barras em malha fechada	49
Tabela 15 – Fluxo de potência do sistema de 14 barras em configuração radial - Perdas: 466,13 kW	49
Tabela 16 – Tensão nas barras do sistema de 14 barras em configuração radial	50
Tabela 17 – Fluxo de potência do sistema de 33 barras em malha fechada - Perdas: 123,29 kW	50
Tabela 18 – Tensão nas barras do sistema de 33 barras em malha fechada	51
Tabela 19 – Fluxo de potência do sistema de 33 barras em configuração radial - Perdas: 140,28 kW	51
Tabela 20 – Tensão nas barras do sistema de 33 barras em configuração radial	52
Tabela 21 – Fluxo de potência do sistema de 84 barras em malha fechada - Perdas: 462,68 kW	53
Tabela 22 – Tensão nas barras do sistema de 84 barras em malha fechada	54
Tabela 23 – Fluxo de potência do sistema de 84 barras em configuração radial - Perdas: 471,73 kW	55
Tabela 24 – Tensão nas barras do sistema de 84 barras em configuração radial	56
Tabela 25 – Dados de ramos do sistema de 14 barras	57
Tabela 26 – Dados de barras do sistema de 14 barras	57
Tabela 27 – Dados de ramos do sistema de 33 barras	59
Tabela 28 – Dados de barras do sistema de 33 barras	59
Tabela 29 – Dados de ramos do sistema de 84 barras	61
Tabela 30 – Dados de barras do sistema de 84 barras	62

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO PARA RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	12
2.1	Heurísticas	12
2.2	Meta-heurísticas	14
2.3	Técnicas clássicas de otimização	14
3	A HEURÍSTICA DE MERLIN-BACK	16
3.1	A estrutura básica da heurística de Merlin-Back	16
3.2	Implementação computacional da heurística de Merlin-Back	17
3.3	Testes usando a heurística de Merlin-Back	19
3.3.1	Sistema de 14 barras	19
3.3.2	Sistema de 33 barras	22
3.3.3	Sistema de 84 barras	26
3.4	Análise crítica da heurística de Merlin-Back	27
4	REFORMULAÇÃO DA HEURÍSTICA DE MERLIN-BACK	28
4.1	Introdução	28
4.2	Análise detalhada dos resultados encontrado	28
4.2.1	Sistema de 14 barras	28
4.2.2	Sistema de 33 barras	28
4.2.3	Sistema de 84 barras	31
4.3	Heurística de Merlin-Back modificada	34
5	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36
	APÊNDICES	38
	APÊNDICE A – ALGORITMO DE FLUXO DE POTÊNCIA PARA REDES RADIAIS E FRACAMENTE MALHADAS	39
A.1	Algoritmo de fluxo de potência de varredura	39
A.1.1	Problema de fluxo de potência para sistemas de distribuição radiais	39
A.1.2	Problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados	43

A.2	Testes com o algoritmo de fluxo de potência de varredura	49
A.2.1	Sistema de 14 barras	49
A.2.2	Sistema de 33 barras	50
A.2.3	Sistema de 84 barras	53

APÊNDICE B – DADOS E FIGURAS DOS SISTEMAS USADOS NOS TESTES

B.1	Sistema de 14 barras	57
B.2	Sistema de 33 barras	58
B.3	Sistema de 84 barras	60

1 Introdução

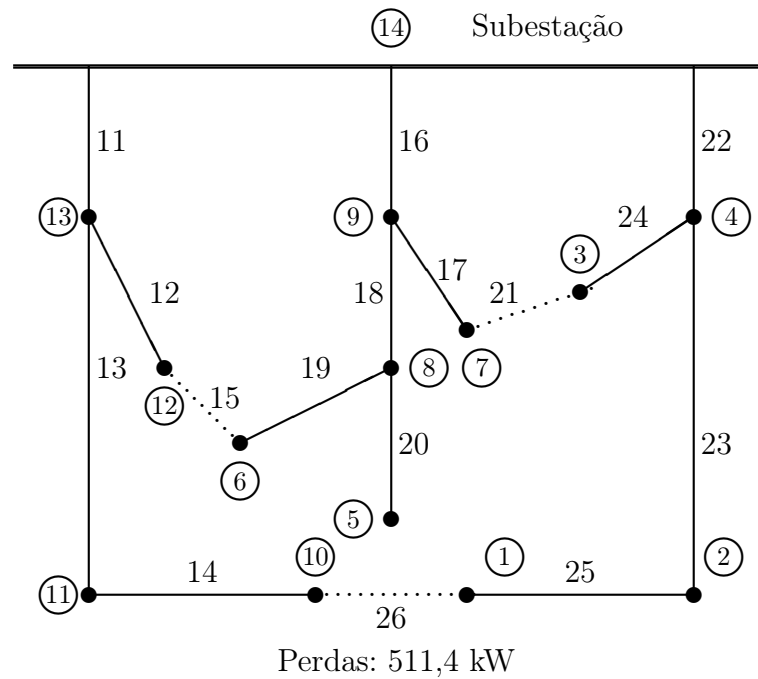
O problema da reconfiguração ótima em sistemas de distribuição de energia elétrica envolve encontrar uma topologia radial do sistema, na qual alguns ramos estejam em operação e outros fora de operação, visando otimizar um objetivo específico, geralmente a redução das perdas para um determinado perfil de carga. Normalmente, um sistema de distribuição opera em configuração radial. Nessa configuração, o sistema possui um conjunto de circuitos energizados que formam a configuração radial chamada de árvore, segundo a teoria dos grafos. Os circuitos não energizados são conhecidos como ramos de ligação. A troca adequada de um ramo de ligação por um ramo da árvore resulta em uma nova configuração radial. Assim, o problema de reconfiguração ótima de um sistema de distribuição busca encontrar a configuração radial que minimiza as perdas de potência ativa entre todas as configurações possíveis. Esse processo de busca ótima requer a análise, implícita ou explicitamente, de todas as configurações radiais possíveis. Outra forma de formular esse problema é a seguinte: dado um grafo, encontrar uma árvore geradora que minimiza as perdas, respeitando 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 dificultou por muito tempo o desenvolvimento de uma modelagem matemática adequada para o problema da reconfiguração usando relações algébricas relativamente simples. Esse obstáculo foi superado recentemente, em 2012. Além disso, a natureza combinatória do problema tornou sua resolução ainda mais complexa. Por esse motivo, o problema da reconfiguração é um dos mais pesquisados entre os problemas de otimização na operação de sistemas elétricos de potência. Na Figura 1, é apresentada a configuração inicial de um sistema de distribuição amplamente utilizado na literatura especializada. Atualmente, é possível provar que esse sistema, de tamanho reduzido, possui 190 topologias radiais. Esse tipo de análise é recente na literatura especializada (MACEDO et al., 2018). Em um sistema real, ocorre uma explosão combinatória do número de possíveis topologias radiais, e, portanto, à medida que o tamanho do sistema aumenta, torna-se mais difícil resolver o problema da reconfiguração.

Dessa maneira, a complexidade do problema de reconfiguração depende fundamentalmente do número de ramos de ligação em uma topologia radial. Supor que um sistema de distribuição tem n_b barras e n_r ramos. Nesse contexto, o número de ramos de ligação (ramos abertos em uma topologia radial) é igual a $n_{lig} = n_r - n_b + 1$. Assim, se n_{lig} é pequeno (por exemplo, menor que 8), o problema é resolvido facilmente encontrando a solução ótima; se n_{lig} é razoável (por exemplo, menor que 15), o processo de solução não é

mais trivial, se n_{lig} é grande (por exemplo, entre 20 e 40), o problema é muito difícil de resolver e se n_{lig} é muito grande (por exemplo, entre 80 e 200), não é possível encontrar a solução ótima com as técnicas de otimização existentes. Essas técnicas no campo de otimização do planejamento e da operação de sistemas de energia elétrica podem ser agrupados em três grandes grupos: (i) técnicas heurísticas, (ii) técnicas meta-heurísticas e (iii) técnicas exatas de otimização que usam modelos matemáticos completos e *solvers* comerciais para resolver esses modelos.

Figura 1 – Sistema inicial de distribuição



Fonte: Civanlar et al. (1988).

2 Técnicas de otimização para reconfiguração de sistemas de distribuição

O modelo matemático do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição que deve operar em topologia radial é um problema de programação não linear inteira mista. Adicionalmente, como é analisado adiante, esse modelo foi completamente desenvolvido apenas em 2012. Também, esse modelo precisa de um tempo computacional muito elevado para ser resolvido pelos *solvers* mais eficientes quando cresce o tamanho do sistema, especialmente quando cresce o número de ramos desligados para caracterizar uma topologia radial. Por esses motivos, por muito tempo, as técnicas de otimização usadas para resolver o problema da reconfiguração foram as heurísticas e as meta-heurísticas. Atualmente, praticamente todas as técnicas de otimização já foram usadas para resolver o problema da reconfiguração. Essas técnicas podem ser separadas em três grandes grupos:

- As técnicas heurísticas
- As técnicas meta-heurísticas
- As técnicas clássicas de otimização

2.1 Heurísticas

As técnicas heurísticas encontram uma solução, geralmente de boa qualidade, de um problema complexo de se resolver em termos de otimalidade. Assim, através de uma sequência de passos claramente definidos, se encontra uma solução de boa qualidade. Portanto, do ponto de vista teórico, uma heurística não garante encontrar a solução ótima global do problema. Adicionalmente, a heurística não pode provar se a solução encontrada é ótima ou não é ótima. As heurísticas mais usadas para resolver o problema da reconfiguração são o algoritmo heurístico construtivo (AHC), mas na literatura especializada a heurística de busca através de vizinhança (*steepest descent heuristic*, SDH) é também muito importante.

No AHC, em cada passo, é adicionada uma componente da solução em construção usando um critério ou indicador de sensibilidade e o processo termina quando for encontrada uma solução viável. Assim, por exemplo, um AHC para o problema da reconfiguração pode iniciar o processo de otimização com todos os ramos desligados. Dessa forma, em cada passo é adicionado um ramo que não gera laço com os ramos já ligados em passos anteriores do AHC e usando um indicador de sensibilidade. O processo termina quando a adição de um novo ramo gera uma topologia radial (árvore geradora mínima em termos

de grafos). Outra alternativa consiste em iniciar o processo de otimização com todos os ramos ligados (topologia malhada) e em cada passo se desliga um ramo desde que esse desligamento preserve a topologia corrente conexa (grafo conexo em termos de grafos). O processo termina quando o desligamento de um novo ramo deixa a topologia corrente na forma de topologia radial. Essa é a estratégia do AHC de Merlin-Back usado como ponto de partida neste trabalho. Assim, um AHC pode adicionar ou retirar uma componente da solução em construção. Por outro lado, a heurística de busca através de vizinhança (SDH) inicia o processo de otimização a partir de uma proposta de solução factível, que no caso do problema da reconfiguração, pode ser a topologia atual de operação ou uma proposta de solução encontrada usando um AHC. Assim, a partir da topologia corrente, o SDH define um conjunto de propostas de solução vizinhas e passa para a proposta de solução vizinha de melhor qualidade, desde que seja melhor que a topologia corrente. Em caso contrário, termina o processo.

O AHC de Merlin e Back (1975) é o trabalho fundamental usado como base neste trabalho e assume a seguinte forma genérica:

1. Armazenar os dados do problema e escolher o indicador de sensibilidade a ser usado. Escolher os componentes que podem ser incorporados na solução em construção (geralmente o processo é iniciado sem componentes ou com todos os componentes).
2. Verificar se a solução em construção já representa uma solução factível. Caso seja factível, então pare o processo porque foi encontrada a solução factível procurada. Em caso contrário ir ao Passo 3.
3. Usando a solução em construção, resolver o problema que permite identificar o indicador de sensibilidade de todos os componentes do problema que ainda não foram incorporados na solução em construção.
4. Usando a informação dos indicadores de sensibilidade encontrados no passo anterior, identificar o componente que deve ser incorporado (ou retirado) na solução em construção. Adicionar (ou retirar) o componente identificado na solução em construção e voltar ao Passo 2.

Nessa estrutura genérica, o AHC de Merlin-Back apresenta as seguintes características específicas:

1. Os dados do problema estão representados pelos ramos e barras do sistema de distribuição com as características dos ramos (resistência, reatância, capacidade de transmissão) e das barras (demanda) e a topologia malhada, além de outras restrições operacionais. O indicador de sensibilidade escolhido é o valor de fluxo de potência aparente em cada ramo na topologia corrente e, portanto, deve ser desligado o ramo

com o menor valor de potência aparente na topologia corrente, desde que a nova topologia corrente seja conexa. A topologia inicial é o sistema de distribuição com todos os ramos ligados.

2. Se a topologia corrente é radial, então pare o processo de otimização. Em caso contrário ir ao Passo 3.
3. Resolver o problema de fluxo de potência para a topologia corrente para encontrar o indicador de sensibilidade de cada ramo (fluxo de potência aparente em cada ramo).
4. Usando fluxo de potência aparente em cada ramo, desligar o ramo que preserva a nova topologia como uma topologia conexa e leva o menor valor de fluxo de potência. Desligar o ramo identificado para encontrar a nova topologia corrente e voltar ao Passo 2.

Assim, um aspecto a ser discutido em detalhes é a justificativa de Merlin-Back para escolher o indicador de sensibilidade. Esse tópico é abordado em outra seção. Outras heurísticas interessantes apresentadas na literatura especializada são as propostas apresentadas por Civanlar et al. (1988), Baran e Wu (1989), Schmidt et al. (2005) e Gomes et al. (2006).

2.2 Meta-heurísticas

As meta-heurísticas podem ser definidas de várias maneiras. A definição mais popular é a seguinte: meta-heurísticas são técnicas de solução que gerenciam a interação entre estratégias de busca local e estratégias de nível superior para criar um processo de otimização capaz de sair de soluções ótimas locais e realizar uma busca robusta através do espaço de busca. Alternativamente, uma meta-heurística pode ser definida como um processo de otimização que generaliza e/ou integra o algoritmo heurístico construtivo do tipo guloso e a heurística de busca por vizinhança, possibilitando encontrar soluções de qualidade ao explorar o espaço de busca de forma eficiente. Em outras palavras, uma meta-heurística pode ser vista como uma generalização e/ou integração do AHC e da heurística SDH. Meta-heurísticas de excelente desempenho para o problema da reconfiguração podem ser encontradas em Mendoza et al. (2006), Macedo (2015), Delbem et al. (2005) e Chiou et al. (2005).

2.3 Técnicas clássicas de otimização

Os pesquisadores no problema de reconfiguração demoraram em contornar os problemas existentes nas características específicas do problema da reconfiguração para

idealizar um modelo matemático completo de otimização e que seja possível de se resolver usando técnicas de otimização clássicas.

O problema com relação a representação das restrições de radialidade através de relações algébricas relativamente simples foi resolvido quase de forma simultânea, mas usando argumentos diferentes, nas propostas apresentadas por Lavorato et al. (2012) e Jabr et al. (2012), e posteriormente apareceram propostas alternativas como a apresentada por Ahmadi et al. (2015).

Atualmente, existe pesquisa muito intensa relacionada com a forma de resolver o problema da reconfiguração usando técnicas de otimização clássica.

3 A heurística de Merlin-Back

Nesta seção é apresentada a heurística de Merlin-Back em detalhes. Dessa forma, inicialmente é apresentada a heurística, depois é implementado computacionalmente o AHC usando dados de três sistemas elétricos, isto é, os sistemas de 14, 33 e 84 barras muito usados na literatura especializada. Finalmente, é apresentada uma análise crítica da proposta de Merlin-Back. Para implementar computacionalmente a proposta de Merlin-Back, existe necessidade de ter disponível e implementado um algoritmo de fluxo de potência radial de tipo varredura que resolve problemas de fluxo de potência radial e levemente malhado. Essa tarefa foi realizada previamente e os detalhes são apresentados no Apêndice A.

3.1 A estrutura básica da heurística de Merlin-Back

Para resolver um problema complexo, são utilizadas as heurísticas, as quais são técnicas de otimização, e encontram, em tempos computacionais curtos, uma solução de alta qualidade. Foram amplamente utilizadas para problemas que possuem alto nível de dificuldade, especialmente para problemas não lineares, discretos e não convexos.

Teoricamente, as heurísticas retornam uma solução ótima global de um problema complexo, porém essa solução é raramente encontrada para problema de grande porte. O problema é considerado complexo quando apresenta grande dificuldade de encontrar a solução ótima global pela característica da explosão combinatória quando o tamanho do problema cresce ou por apresentar uma modelagem matemática complexa como citado anteriormente.

Portanto, é interessante usar essa técnica nas seguintes condições: quando o problema em análise não pode ser resolvido por nenhum método exato de otimização existente; quando, no ponto de vista prático, a solução ótima não é crucial, devido a fatores como a existência de muitas soluções ótimas locais que possui qualidade bastante próxima da solução ótima global; quando os dados utilizados apresentam elevada incerteza, como em muitos problemas de planejamento; quando há limitações de tempo de processamento para encontrar a solução desejada e problemas de memória para armazenamento de dados; e quando o objetivo é encontrar uma solução inicial de boa qualidade que sirva como ponto de partida para a aplicação de uma técnica de otimização mais sofisticada.

O algoritmo heurístico construtivo, AHC, é comumente utilizado para resolver esses tipos de problemas. Ele consiste em um processo passo a passo, ou iterativo. Em cada passo é gerando um elemento ou componente da solução em construção, e no último passo

é gerada uma solução factível. Antes da última iteração, não existe uma solução ótima. Estes elementos e componentes são escolhidos utilizando um indicador de sensibilidade, que executa a função de identificar o componente mais interessante a ser incorporado na solução que está sendo edificado. O indicador de sensibilidade é uma marca para diferenciar os AHCs, que podem ser simples ou sofisticados.

Com o propósito de diminuir as perdas de energia elétrica, a solução de Merlin-Back, que é um AHC, propõe, pela primeira vez, a alteração de topologia da rede de distribuição. O trabalho consiste, basicamente, na análise das perdas de modo iterativo até que se encontre uma topologia radial que apresenta menor perda possível.

Inicia-se o processo com uma configuração em que todas as chaves estão fechadas. Em cada passo é calculado o fluxo de potência de cada ramo. Neste caso, o ramo que será desconectado deverá satisfazer os dois critérios a seguir, que são o indicador de sensibilidade: apresentar menor fluxo e manter o sistema conexo quando retirada. Cumprindo essas duas condições, um ramo é escolhido para ser aberta, constituindo assim uma parte da solução. O processo é repetido e é escolhido o ramo que julga ser interessante ser aberto até obter uma configuração radial, que é o último passo da iteração e corresponde a solução encontrada pela heurística.

De acordo com os autores, a configuração radial com perdas mínimas é aquela que possui menor desvio de distribuição dos fluxos nos ramos em comparação à configuração de malha fechada, o que significa dizer que o objetivo é encontrar um sistema radial que mais se aproxima da característica de perdas reduzidas de malha fechada.

3.2 Implementação computacional da heurística de Merlin-Back

O AHC de abertura sequencial de chaves baseado na proposta de Merlin-Back assume a seguinte estrutura:

Inicialização: Todas as chaves do sistema de distribuição são fechadas.

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

1. Identificar os ramos que se forem abertos mantêm o sistema conexo;
2. Resolver um problema de fluxo de potência para a topologia corrente e calcular o fluxo de potência aparente em cada ramo da configuração fracamente malhada;
3. Para os ramos determinados no Passo 1, encontrar aquele com menor fluxo de potência;

4. Abrir a chave do ramo encontrado em no Passo 3 e atualizar a topologia corrente.

Calcular: a função objetivo da solução resolvendo fluxo de potência para redes radiais para a topologia radial encontrada.

No Passo 4, o ramo com o menor fluxo de potência é retirado para que dessa forma, a topologia final varie menos da configuração inicial que é malhada. Observa-se que o cálculo de fluxo de potência é efetuado no Passo 2 a fim de determinar a potência em cada ramo. Portanto, para o desenvolvimento do algoritmo é necessário a implementação do algoritmo de fluxo de potência, apresentado no Apêndice A.

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 as 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 menores perdas, então a distribuição dos fluxos de potência através desses ramos corresponde às perdas mínimas. Portanto, a melhor topologia radial visando 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 dessa topologia radial se desviem o menos possível com os fluxos nesses ramos na 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.

3.3 Testes usando a heurística de Merlin-Back

A heurística de Merlin-Back foi implementada computacionalmente no ambiente MATLAB. Assim, 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. Os resultados de cada iteração são mostrados em tabelas mostrando os fluxos de potência em cada ramo.

3.3.1 Sistema de 14 barras

O sistema de 14 barras apresenta 16 ramos. Portanto, uma topologia radial deve ter 13 ramos ligados e a topologia deve ser conexa. Os resultados de cada passo do algoritmo de Merlin-Back são mostrados as perdas ativas e os fluxos nos ramos de cada topologia corrente.

Para o sistema de 14 barras, observa-se, na Tabela 1 que descreve o fluxo de potências em cada ramo na configuração malhada, que o ramo o qual possui menor fluxo é o número 7, com 632,29 kVA. Portanto, de acordo com Merlin-Back, o ramo a ser desconectado será este. Nessa configuração, a perda total é de 426,26 kW.

A Tabela 2 apresenta o fluxo em cada ramo quando o ramo 7 é retirado. A perda total é de 428,24 kW, maior que a configuração inicial, já que o sistema malhado possui perdas mínimas na maior parte dos casos. A tendência é que a perda total aumente cada vez que um ramo for aberto até chegar na topologia radial, logo, naturalmente, o sistema radial encontrado terá perdas maiores que o malhado, porém, em tese, a configuração encontrada possui perda mínima possível.

Pela Tabela 2, encontra-se o ramo que leva menor fluxo que é o ramo 16 com 913,84 kVA, o que significa dizer que este deve ser retirado do sistema.

A Tabela 3 mostra os fluxos com os ramos 7 e 16 abertos. Nota-se que o ramo 15 apresenta o menor fluxo com 1345,36 kVA, porém este não pode ser aberto, uma vez que o sistema não é mantido conexo. Por este motivo, é procurado o próximo ramo com fluxo pequeno em que a sua abertura não prejudique o sistema, mantendo-o conexo. Neste caso, o ramo encontrado é o ramo 8 com 2266,07 kVA.

A Tabela 4 mostra o fluxo em cada ramo quando os ramos 7, 8 e 16 estão abertos. Nessa configuração, já foi alcançada a topologia radial. A perda total obtida é 466,13 kW. A topologia radial encontrada pelo AHC de Merlin-Back é a topologia ótima. Pode-se verificar que a solução é ótima usando força bruta, isto é, identificando as 190 topologias radiais e verificando que a topologia encontrada por Merlin-Back é a proposta ótima. Também, recentemente, apareceram modelos exatos e *solvers* comerciais que permitem verificar que a topologia radial encontrada por Merlin-Back é a ótima.

Outra observação importante é verificar que a cada iteração e, portanto, a cada ramo desligado, as perdas aumentam. Outra observação importante é verificar que apenas na última iteração (quando o último ramo é desligado) as perdas aumentam de forma significativa.

Em resumo, foram desligados os seguintes ramos na sequência ordenada:

- Ramo 7 ligando as barras 9-7 gerando perdas de 428,24 kW.
- Ramo 16 ligando as barras 10-1 gerando perdas de 430,03 kW.
- Ramo 8 ligando as barras 8-6 gerando perdas de 466,13 kW.

Tabela 1 – Sistema de 14 barras - Todos os ramos fechados - Perdas: 426,26 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	14	13	10702,73	11050,43	9	8	5	4519,35	4819,21
2	13	12	5880,58	5893,25	10	14	4	7464,26	7605,07
3	13	11	2730,56	2804,99	11	4	3	2506,72	2514,55
4	11	10	723,33	1256,47	12	4	2	3893,92	3905,06
5	14	9	10959,27	11177,60	13	2	1	2881,48	2947,93
6	9	8	7320,69	7324,98	14	12	6	2852,19	2852,68
7	9	7	-498,85	632,29	15	7	3	-1499,31	1977,20
8	8	6	-2242,84	2285,19	16	10	1	-777,32	796,40

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 – Sistema de 14 barras - Um ramo aberto - Perdas: 428,24 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	14	13	10721,69	11070,46	9	8	5	4519,37	4819,22
2	13	12	5995,94	6015,89	10	14	4	7051,58	7145,34
3	13	11	2633,84	2689,59	11	4	3	2004,46	2013,85
4	11	10	627,18	1122,93	12	4	2	3990,96	4010,15
5	14	9	11354,98	11626,03	13	2	1	2977,86	3023,99
6	9	8	7206,29	7214,93	14	12	6	2966,35	2966,75
7	9	7	-2356,01	2416,78	15	7	3	-1000,00	1345,36
8	8	6	-2356,01	2416,78	16	10	1	-873,33	913,84

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3 – Sistema de 14 barras - Dois ramos abertos - Perdas: 430,03 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	14	13	11465,90	11856,11	9	8	5	4519,39	4819,22
2	13	12	5846,95	5864,29	10	14	4	6156,89	6216,81
3	13	11	3513,53	3609,21	11	4	3	2004,45	2013,84
4	11	10	1501,53	1923,08	12	4	2	3109,93	3111,98
5	14	9	11507,24	11783,84	13	2	1	2102,06	2248,42
6	9	8	7354,49	7361,21	14	12	6	2818,79	2818,82
7	9	7			15	7	3	-1000,00	1345,36
8	8	6	-2209,61	2266,07	16	10	1		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4 – Sistema de 14 barras - Três ramos abertos - Perdas: 466,13 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	14	13	9192,15	9508,10	9	8	5	4519,61	4819,33
2	13	12	3610,88	3611,89	10	14	4	6156,89	6216,81
3	13	11	3513,47	3609,12	11	4	3	2004,45	2013,84
4	11	10	1501,52	1923,08	12	4	2	3109,93	3111,98
5	14	9	13817,08	14172,30	13	2	1	2102,06	2248,42
6	9	8	9596,14	9598,95	14	12	6	600,25	781,06
7	9	7			15	7	3	-1000,00	1345,36
8	8	6			16	10	1		

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.2 Sistema de 33 barras

No sistema de 33 barras existem 37 ramos e, portanto, uma topologia radial deve ter 32 ramos ligados e a topologia deve ser conexa. A configuração inicial com todos os ramos fechados possui perda total de 123,29 kW de acordo com a Tabela 5. Os resultados, passo a passo, são mostradas na Tabelas 5 a 10.

Em resumo, foram desligados os seguintes ramos na sequência ordenada:

- Ramo 10 ligando as barras 10-11 gerando perdas de 123,26 kW.
- Ramo 14 ligando as barras 14-15 gerando perdas de 123,85 kW.
- Ramo 32 ligando as barras 32-33 gerando perdas de 124,24 kW.
- Ramo 7 ligando as barras 7-8 gerando perdas de 125,28 kW.
- Ramo 37 ligando as barras 25-29 gerando perdas de 140,28 kW.

Em relação aos resultados encontrados, as seguintes observações são muito importantes:

- O valor das perdas com todos os ramos fechados é igual a 123,29 kW. Por outro lado, o valor das perdas após desligar o ramo 10-11 é igual a 123,26 kW. Em outras palavras, o valor das perdas diminui após desligar um ramo contradizendo a hipótese de Merlin-Back de que a topologia malhada apresenta o menor valor das perdas de um sistema de distribuição.
- Novamente, pode-se observar que os valores de perdas variam muito pouco nas primeiras iterações e essa variação é significativa apenas na última iteração. Essa observação experimental é interessante porque pode sugerir que uma topologia levemente malhada pode ser adequada visando uma operação com diminuição das perdas. Assim, por exemplo, se for permitido ao sistema de 33 barras operar com o ramo 25-29 fechado, então o sistema opera com valor de perdas igual a 125,28 kW.
- A proposta de solução encontrada pelo AHC de Merlin-Back não é ótima.

Tabela 5 – Sistema de 33 barras - Todos os ramos fechados - Perdas: 123,29 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3838,29	4520,47	20	20	21	825,06	1041,94
2	2	3	2707,23	3140,97	21	21	22	408,82	515,28
3	3	4	1250,03	1419,35	22	3	23	1336,67	1592,05
4	4	5	1125,30	1270,54	23	23	24	1239,34	1480,46
5	5	6	1061,33	1199,01	24	24	25	806,57	1005,11
6	6	7	441,63	455,47	25	6	26	552,03	693,54
7	7	8	241,38	241,61	26	26	27	491,38	630,15
8	8	9	362,07	407,69	27	27	28	430,64	567,18
9	9	10	70,37	71,03	28	28	29	368,37	506,15
10	10	11	10,33	31,46	29	29	30	626,54	917,26
11	11	12	-34,67	69,05	30	30	31	423,65	429,15
12	12	13	220,60	281,59	31	31	32	272,43	272,44
13	13	14	159,82	212,07	32	32	33	62,27	120,29
14	14	15	39,66	71,24	33	8	21	-320,97	423,91
15	15	16	209,07	306,63	34	9	15	230,57	290,22
16	16	17	148,60	252,34	35	12	22	-315,28	414,92
17	17	18	88,04	203,26	36	18	33	-2,16	143,06
18	2	19	1019,31	1253,32	37	25	29	380,57	548,53
19	19	20	927,69	1154,80					

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6 – Sistema de 33 barras - Um ramo aberto - Perdas: 123,26 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3838,26	4520,42	20	20	21	826,35	1040,48
2	2	3	2705,94	3141,92	21	21	22	413,72	511,11
3	3	4	1249,01	1420,21	22	3	23	1336,39	1592,00
4	4	5	1124,27	1271,36	23	23	24	1239,06	1480,41
5	5	6	1060,29	1199,82	24	24	25	806,29	1005,08
6	6	7	440,14	455,42	25	6	26	552,48	692,76
7	7	8	239,88	240,42	26	26	27	491,83	629,33
8	8	9	356,94	410,33	27	27	28	431,09	566,31
9	9	10	60,03	63,28	28	28	29	368,83	505,21
10	10	11			29	29	30	626,72	916,28
11	11	12	-45,00	54,08	30	30	31	423,84	429,09
12	12	13	215,25	287,84	31	31	32	272,62	272,65
13	13	14	154,44	219,24	32	32	33	62,46	121,69
14	14	15	34,26	82,81	33	8	21	-317,33	427,43
15	15	16	208,90	307,63	34	9	15	235,76	285,80
16	16	17	148,42	253,47	35	12	22	-320,26	410,16
17	17	18	87,86	204,56	36	18	33	-2,35	144,58
18	2	19	1020,57	1251,96	37	25	29	380,29	548,58
19	19	20	928,96	1153,38					

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7 – Sistema de 33 barras - Dois ramos abertos - Perdas: 123,85 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3838,85	4520,84	20	20	21	811,76	1011,28
2	2	3	2721,84	3170,74	21	21	22	377,94	438,91
3	3	4	1256,91	1433,64	22	3	23	1343,82	1606,86
4	4	5	1132,09	1284,60	23	23	24	1246,35	1495,15
5	5	6	1068,02	1212,98	24	24	25	813,32	1020,03
6	6	7	443,56	459,73	25	6	26	556,62	701,77
7	7	8	243,30	244,12	26	26	27	495,96	638,45
8	8	9	381,11	457,83	27	27	28	435,19	575,55
9	9	10	60,03	63,28	28	28	29	372,85	514,55
10	10	11			29	29	30	637,49	941,64
11	11	12	-45,00	54,08	30	30	31	434,44	443,97
12	12	13	180,52	214,28	31	31	32	283,13	283,85
13	13	14	120,08	144,34	32	32	33	72,96	108,28
14	14	15			33	8	21	-338,10	475,10
15	15	16	198,14	282,33	34	9	15	259,65	335,61
16	16	17	137,73	227,32	35	12	22	-285,53	337,78
17	17	18	77,28	177,89	36	18	33	-12,88	120,79
18	2	19	1005,25	1222,31	37	25	29	387,14	564,44
19	19	20	913,71	1123,58					

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 – Sistema de 33 barras - Três ramos abertos - Perdas: 124,24 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3839,24	4521,35	20	20	21	828,12	1014,57
2	2	3	2705,77	3165,85	21	21	22	377,94	438,91
3	3	4	1270,80	1438,54	22	3	23	1313,97	1600,40
4	4	5	1145,94	1289,67	23	23	24	1216,56	1489,02
5	5	6	1081,84	1218,00	24	24	25	783,64	1017,10
6	6	7	500,77	504,16	25	6	26	513,16	698,82
7	7	8	300,46	303,47	26	26	27	452,50	637,49
8	8	9	454,46	486,63	27	27	28	391,73	577,00
9	9	10	60,03	63,28	28	28	29	329,39	519,39
10	10	11			29	29	30	564,32	956,90
11	11	12	-45,00	54,08	30	30	31	361,18	399,69
12	12	13	180,52	214,29	31	31	32	210,12	232,76
13	13	14	120,08	144,34	32	32	33		
14	14	15			33	8	21	-354,44	475,38
15	15	16	271,09	296,91	34	9	15	332,81	358,33
16	16	17	210,64	233,51	35	12	22	-285,53	337,78
17	17	18	150,16	170,21	36	18	33	60,02	72,14
18	2	19	1021,70	1226,46	37	25	29	357,49	569,69
19	19	20	930,17	1127,37					

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 9 – Sistema de 33 barras - Quatro ramos abertos - Perdas: 125,28 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3840,28	4524,52	20	20	21	1133,52	1259,47
2	2	3	2394,63	2924,57	21	21	22	377,96	438,94
3	3	4	1034,03	1253,33	22	3	23	1244,14	1545,69
4	4	5	910,35	1105,03	23	23	24	1147,24	1435,29
5	5	6	847,35	1035,30	24	24	25	715,26	968,53
6	6	7	200,06	223,75	25	6	26	581,59	747,60
7	7	8			26	26	27	520,85	684,64
8	8	9	454,53	486,72	27	27	28	459,97	622,14
9	9	10	60,03	63,28	28	28	29	397,26	561,28
10	10	11			29	29	30	564,31	956,88
11	11	12	-45,00	54,08	30	30	31	361,17	399,68
12	12	13	180,53	214,29	31	31	32	210,12	232,76
13	13	14	120,08	144,34	32	32	33		
14	14	15			33	8	21	-654,53	709,59
15	15	16	271,11	296,93	34	9	15	332,85	358,39
16	16	17	210,65	233,52	35	12	22	-285,54	337,78
17	17	18	150,17	170,21	36	18	33	60,02	72,14
18	2	19	1333,87	1482,70	37	25	29	289,70	534,08
19	19	20	1241,61	1381,29					

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10 – Sistema de 33 barras - Cinco ramos abertos - Perdas: 140,28 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3855,28	4542,78	20	20	21	1133,52	1259,47
2	2	3	2409,54	2942,75	21	21	22	377,97	438,94
3	3	4	1353,21	1794,46	22	3	23	939,53	1044,86
4	4	5	1225,66	1643,34	23	23	24	846,38	938,30
5	5	6	1159,01	1571,51	24	24	25	421,28	466,77
6	6	7	200,06	223,76	25	6	26	885,76	1284,09
7	7	8			26	26	27	823,53	1222,54
8	8	9	454,53	486,72	27	27	28	760,68	1161,02
9	9	10	60,03	63,28	28	28	29	691,08	1094,44
10	10	11			29	29	30	564,46	957,05
11	11	12	-45,00	54,08	30	30	31	361,21	399,74
12	12	13	180,53	214,29	31	31	32	210,12	232,76
13	13	14	120,08	144,34	32	32	33		
14	14	15			33	8	21	-654,53	709,59
15	15	16	271,11	296,93	34	9	15	332,85	358,39
16	16	17	210,65	233,52	35	12	22	-285,54	337,78
17	17	18	150,17	170,21	36	18	33	60,02	72,14
18	2	19	1333,87	1482,70	37	25	29		
19	19	20	1241,61	1381,29					

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.3 Sistema de 84 barras

O sistema de 84 barras tem 96 ramos e, portanto, uma topologia radial deve ter 13 ramos desligados e a topologia deve ser conexa. A topologia com todos os ramos ligados apresenta um valor de perdas de 462,69 kW. Em resumo, foram desligados os seguintes ramos na sequência ordenada:

- Ramo 33 ligando as barras 32-33 gerando perdas de 462,69 kW.
- Ramo 42 ligando as barras 41-42 gerando perdas de 462,70 kW.
- Ramo 89 ligando as barras 14-18 gerando perdas de 462,69 kW.
- Ramo 84 ligando as barras 5-55 gerando perdas de 462,66 kW.
- Ramo 39 ligando as barras 38-39 gerando perdas de 462,97 kW.
- Ramo 63 ligando as barras 62-63 gerando perdas de 462,79 kW.
- Ramo 7 ligando as barras 6-7 gerando perdas de 463,75 kW.
- Ramo 82 ligando as barras 81-82 gerando perdas de 461,57 kW.
- Ramo 86 ligando as barras 11-43 gerando perdas de 462,04 kW.
- Ramo 88 ligando as barras 13-76 gerando perdas de 466,66 kW.
- Ramo 92 ligando as barras 28-32 gerando perdas de 468,73 kW.
- Ramo 72 ligando as barras 71-72 gerando perdas de 468,74 kW.
- Ramo 90 ligando as barras 16-26 gerando perdas de 471,73 kW.

Em relação aos resultados encontrados, as seguintes observações são muito importantes:

- O valor das perdas com todos os ramos fechados é igual a 462,68 kW. Por outro lado, o valor das perdas após desligar 9 ramos é igual a 462,04 kW. Em outras palavras, operando com 9 ramos a menos o sistema apresenta um valor de perdas menor que o sistema com todos os ramos ligados.
- Novamente, pode-se observar que os valores de perdas variam muito pouco nas primeiras iterações e essa variação é significativa apenas nas últimas iterações.
- A proposta de solução encontrada pelo AHC de Merlin-Back não é ótima.

3.4 Análise crítica da heurística de Merlin-Back

Da análise dos testes efetuados de cada sistema utilizando o algoritmo implementado da heurística de Merlin-Back, verifica-se que a solução ótima é encontrada somente para o sistema de 14 barras.

Para o sistema de 33 barras, a solução ótima é encontrada por Macedo (2015), sendo a perda total de 139,5513 kW com os ramos 7, 9, 14, 32 e 37 abertos. No algoritmo de Merlin-Back, com exceção do ramo 9, os ramos abertos foram os mesmos. Na heurística de Merlin-Back, ao invés de 9, o ramo 10 é aberto no primeiro passo, já que apresentava o menor fluxo. Como consequência, houve diferença de 0,7287 kW entre a solução ótima e a encontrada. Em resumo, no primeiro passo do algoritmo de Merlin-Back aconteceu o erro de diagnóstico ao desligar o ramo 10 quando deveria ser desligado o ramo 9.

Para o sistema de 84 barras, a solução ótima apresenta perda de 469,8799 kW com os ramos 7, 13, 34, 39, 42, 55, 62, 72, 83, 86, 89, 90 e 92 abertos, de acordo com Macedo (2015). No algoritmo de Merlin-Back, os ramos 13, 34, 55, 62 e 83 não foram abertos, ao invés disso, os ramos 33, 63, 82, 84 e 88 foram desligados, causando uma diferença de 1,8501 kW na perda total. Em resumo, no primeiro passo do algoritmo de Merlin-Back aconteceu o erro de diagnóstico ao desligar o ramo 33 quando esse ramo não é desligado na topologia ótima.

Após uma reformulação da proposta de Merlin-Back, pretende-se desenvolver o AHC modificado com a pretensão de contornar as limitações da proposta original de Merlin-Back. Esse trabalho desenvolvido é apresentado no seguinte capítulo.

4 Reformulação da heurística de Merlin-Back

4.1 Introdução

A heurística de Merlin-Back foi analisada em detalhes a partir dos resultados encontrados para os sistemas de 14, 33 e 84 barras. Assim, o objetivo fundamental é tentar encontrar uma explicação consistente para o desempenho não eficiente da heurística de Merlin-Back para os sistemas usados em testes.

4.2 Análise detalhada dos resultados encontrado

Pretende-se analisar cada sistema em relação aos resultados encontrados pela heurística de Merlin-Back. Essa análise detalhada deve ser usada para tentar identificar as limitações da heurística de Merlin-Back e encontrar propostas de melhorias alternativas.

4.2.1 Sistema de 14 barras

A heurística de Merlin-Back encontra a solução ótima do sistema de 14 barras. Na topologia ótima os ramos 7 (7-9), 8 (6-8) e 16 (1-10) estão abertos e o sistema opera com perdas de 466,13 kW. O sistema de 14 barras é muito pequeno e, portanto, foi relativamente fácil encontrar a solução ótima usando a heurística de Merlin-Back. Assim, em relação a este sistema não existe análise especializada a ser realizada

4.2.2 Sistema de 33 barras

A heurística de Merlin-Back não encontra a solução ótima do sistema de 33 barras. Na topologia ótima o sistema opera com perdas de 139,55 kW e na topologia encontrada com a heurística de Merlin-Back o sistema opera com 140,28 kW de perdas.

A Tabela 11 mostra os ramos desligados pela heurística de Merlin-Back e pela solução ótima.

Na Tabela 11 os ramos estão ordenados na sequência em que esses ramos são adicionados pela heurística de Merlin-Back. Da tabela podem ser observados os seguintes fatos:

- A diferença de perdas entre a topologia encontrada pela heurística de Merlin-Back com a topologia ótima é pequena, isto é, igual a 0,52% (140,28 kW e 139,55 kW).

Na Tabela 11 os ramos abertos encontrados pela heurística de Merlin-Back estão ordenados na sequência em que são abertos pela heurística.

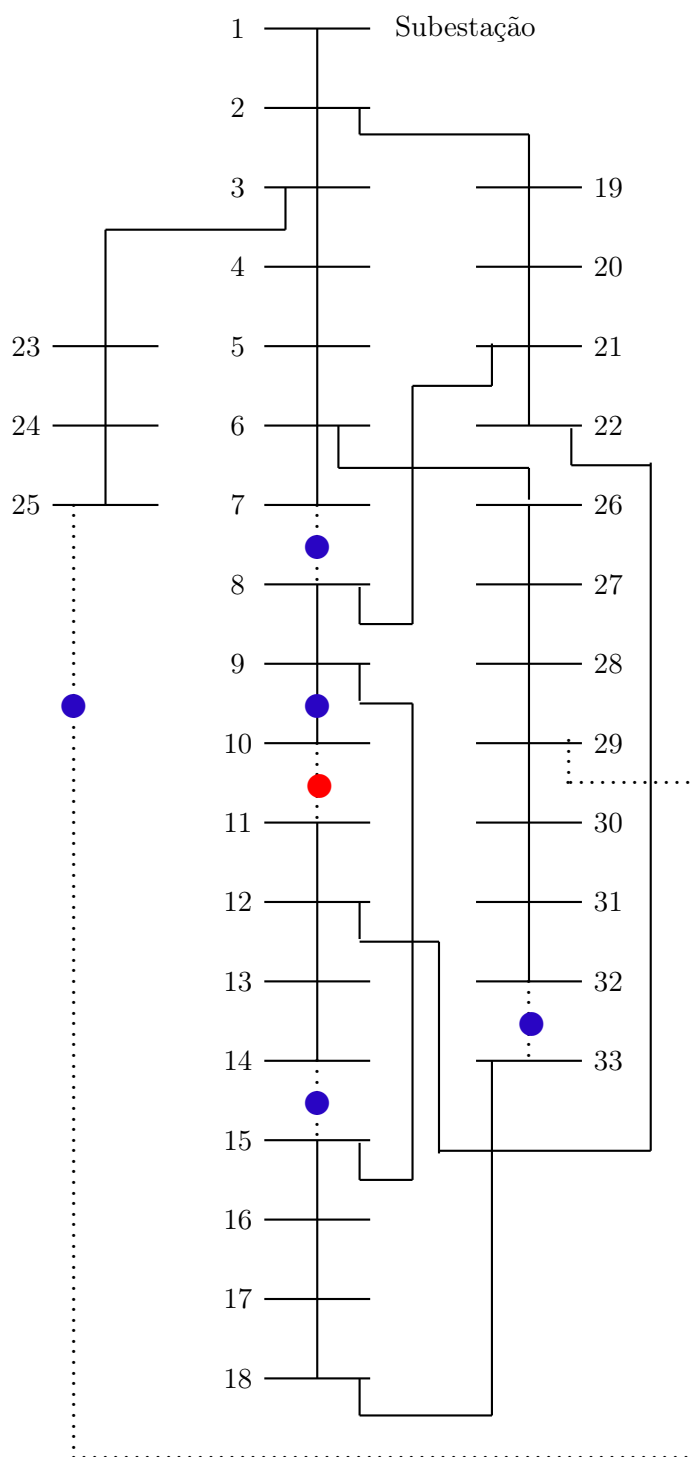
- A heurística de Merlin-Back erra na primeira abertura de ramo ao abrir o ramo 10 (10-11) que não faz parte da solução ótima.
- Mesmo com esse erro na primeira iteração, os seguintes ramos abertos são ramos que fazem parte da solução ótima. Esse comportamento é típico do problema da reconfiguração que não se repete em outros problemas de otimização de sistemas de energia elétrica.
- Para encontrar a solução ótima a partir da solução encontrada pela heurística de Merlin-Back apenas precisa-se trocar o ramo 10 (10-11) pelo ramo 9 (9-10).
- Levando em conta a observação anterior, um aspecto importante é observar a posição dos ramos 10 e 9 da topologia do sistema de 33 barras. Na Figura 2, apresenta-se com bolinhas de cor azul os ramos abertos da topologia ótima. Adicionalmente, uma bolinha de cor vermelha mostra o ramo 10 identificada pela heurística de Merlin-Back e que não faz parte da solução ótima. Adicionalmente, pode-se observar que os ramos 9 e 10 são ramos adjacentes que tem a barra 10 como barra comum a ambos os ramos.
- A observação anterior é muito importante porque permite verificar que o erro da heurística de Merlin-Back, do ponto de vista topológico, acontece apenas em abrir um ramo que se encontra ao lado do ramo ótimo que deve ser aberto. Pode-se verificar que essa característica se repete para o caso de um sistema de maior porte.

Tabela 11 – Comparação de propostas de soluções 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

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 2 – Topologia base do sistema de 33 barras



Fonte: Baran e Wu (1989).

4.2.3 Sistema de 84 barras

A heurística de Merlin-Back não encontra a solução ótima do sistema de 84 barras. Na topologia ótima o sistema opera com perdas de 469,88 kW e na topologia encontrada com a heurística de Merlin-Back o sistema opera com 471,73 kW de perdas.

A Tabela 12 mostra os ramos desligados pela heurística de Merlin-Back e pela solução ótima.

Tabela 12 – Comparação de propostas de soluções 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

Fonte: Elaborado pela autora.

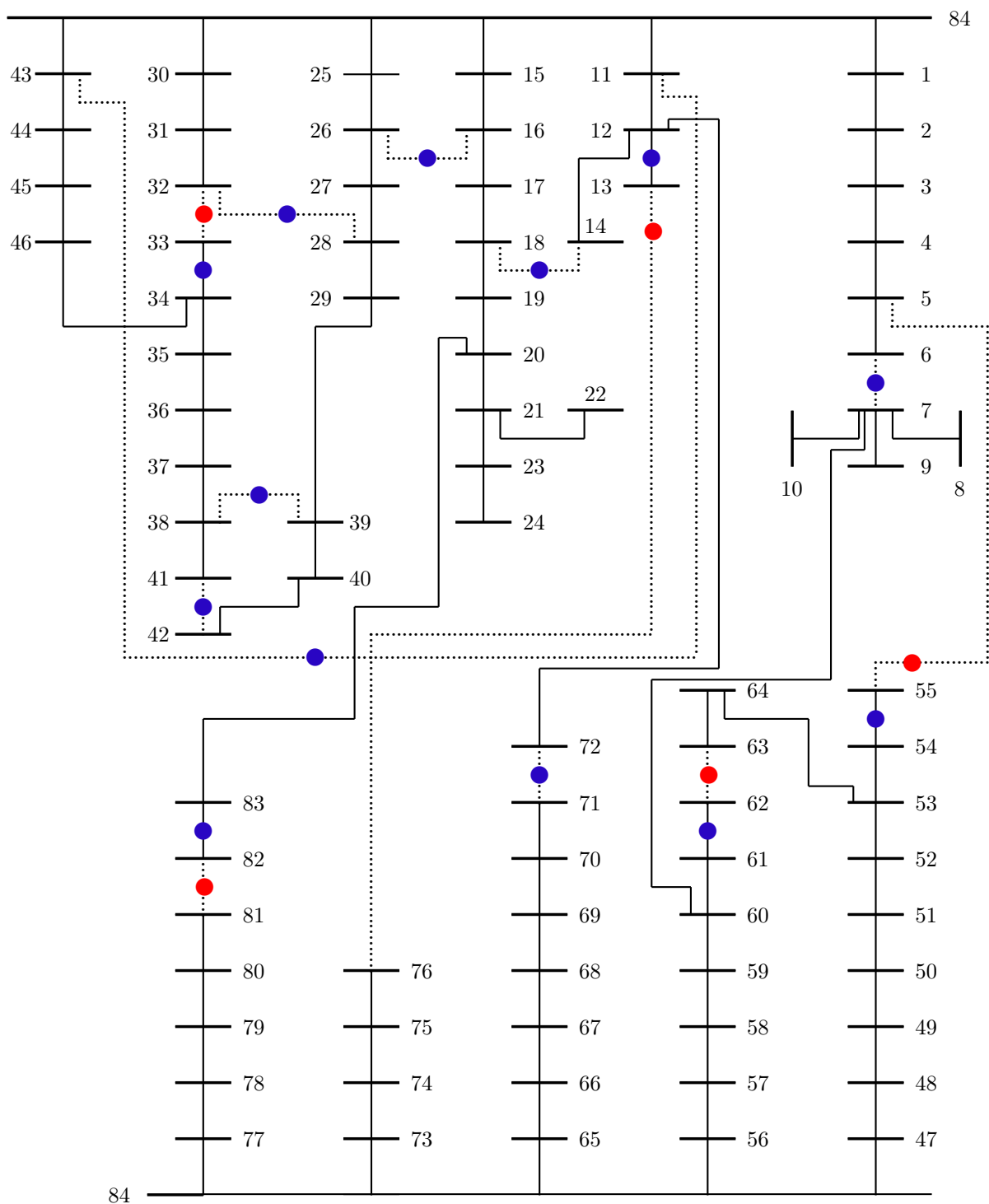
Na Tabela 12 os ramos estão ordenados na sequência em que esses ramos são adicionados pela heurística de Merlin-Back. Os ramos da solução ótima foram ordenados, propositalmente, de forma que seja possível identificar os ramos que são os mesmos em ambas as topologias e os ramos diferentes foram ordenados de forma que exista uma afinidade entre cada par de ramos em ambas as topologias. Da tabela podem ser observados os seguintes fatos:

- A diferença de perdas entre a topologia encontrada pela heurística de Merlin-Back com a topologia ótima é pequena, isto é, igual a 0,39% (471,73 kW e 469,88 kW). Na Tabela 12 os ramos abertos encontrados pela heurística de Merlin-Back estão ordenados na sequência em que são abertos pela heurística.
- A heurística de Merlin-Back erra na primeira abertura de ramo ao abrir o ramo 33 (32-33) que não faz parte da solução ótima. Depois são adicionados dois ramos ótimos. Depois existe um novo erro ao adicionar o ramo 84 (5-55). Dessa forma, pode-se verificar que são abertos ramos não ótimos nas iterações 1, 4, 6, 8 e 10. Assim, a topologia encontrada pela heurística de Merlin-Back encontra oito ramos ótimos e cinco ramos não ótimos. Assim, pode-se imaginar que ambas as soluções se encontram muito distantes.

- Em relação aos ramos não ótimos abertos, deve-se realizar as seguintes observações:
 1. O ramo aberto não ótimo 33 (32-33) da heurística de Merlin-Back é um ramo adjacente com o ramo 34 (33-34), já que ambos os ramos tem a barra comum 33, como pode ser observado na Figura 3 e, por esse motivo, foi colocado na mesma linha na Tabela 12.
 2. O ramo aberto não ótimo 84 (5-55) da heurística de Merlin-Back é um ramo adjacente com o ramo 55 (54-55), já que ambos os ramos tem a barra comum 55, como pode ser observado na Figura 3 e, por esse motivo, foi colocado na mesma linha na Tabela 12.
 3. O ramo aberto não ótimo 63 (62-63) da heurística de Merlin-Back é um ramo adjacente com o ramo 62 (61-62), já que ambos os ramos tem a barra comum 62, como pode ser observado na Figura 3 e, por esse motivo, foi colocado na mesma linha na Tabela 12.
 4. O ramo aberto não ótimo 82 (81-82) da heurística de Merlin-Back é um ramo adjacente com o ramo 83 (82-83), já que ambos os ramos tem a barra comum 82, como pode ser observado na Figura 3 e, por esse motivo, foi colocado na mesma linha na Tabela 12.
 5. O ramo aberto não ótimo 88 (13-76) da heurística de Merlin-Back é um ramo adjacente com o ramo 13 (12-13), já que ambos os ramos tem a barra comum 13, como pode ser observado na Figura 3 e, por esse motivo, foi colocado na mesma linha na Tabela 12.
- Para encontrar a solução ótima a partir da solução encontrada pela heurística de Merlin-Back, apenas precisa-se trocar cada um dos cinco ramos não ótimos pelos respectivos ramos adjacentes que são ótimos.
- A observação anterior é muito importante porque permite verificar que o erro da heurística de Merlin-Back, do ponto de vista topológico, acontece apenas em abrir um ramo que se encontra ao lado do ramo ótimo que deve ser aberto. Pode-se verificar que essa característica se repete para o caso do sistema de 84 barras e também para o sistema de 33 barras.

A partir das observações experimentais com os testes dos sistemas de 33 e 84 barras, uma estratégia muito simples consiste em modificar a heurística de Merlin-Back para ter a capacidade de encontrar a solução ótima dos sistemas de 14, 33 e 84 barras que era o objetivo deste trabalho. Dessa forma, foi idealizada uma heurística que pode ser chamada de heurística de Merlin-Back Modificada com capacidade de encontrar a solução ótima desses sistemas com um esforço adicional muito pequeno. Essa proposta é apresentada na próxima seção.

Figura 3 – Topologia base do sistema de 84 barras



Fonte: Chiou et al. (2005)

4.3 Heurística de Merlin-Back modificada

A heurística de Merlin-Back pode ser modificada de forma que se torne mais eficiente apenas com a incorporação de um passo adicional. Esse passo adicional foi inspirado pelas observações experimentais mostradas na seção anterior.

O AHC de Merlin-Back apresentado anteriormente foi modificado apenas com um passo adicional de refinamento e assume a seguinte forma:

1. Armazenar os dados do problema. O indicador de sensibilidade sugere desligar o ramo que leva o menor fluxo de potência na topologia corrente dentre os ramos que podem ser desligados e preservam a conectividade do sistema elétrico.
2. Verificar se a solução em construção já representa uma topologia radial. Caso a topologia seja radial, então foi encontrada a solução factível de boa qualidade e, deve-se ir ao Passo 5 de refinamento. Em caso contrário ir ao Passo 3.
3. Usando a solução em construção, resolver um problema de fluxo de potência para a topologia corrente e encontrar os fluxos de potência em cada ramo da topologia corrente.
4. Usando os valores de fluxo de potência em cada ramo da topologia corrente (indicador de sensibilidade), identifique o ramo que leva o menor valor absoluto de fluxo de potência e que pode ser desligado sem desconectar o sistema elétrico. Desligar esse ramo da topologia corrente para encontrar a nova topologia corrente e voltar ao Passo 2.
5. Ordenar os ramos desligados de forma hierarquizada sendo que o primeiro classificado é o ramo desligado relacionado com o menor módulo de tensão na topologia corrente (uma das barras que está nos extremos do ramo desligado).
6. Para cada ramo da lista anterior, resolver dois problemas de fluxo de potência radial. Em cada caso ligar o ramo desligado e desligar o ramo que se encontra em um dos extremos do ramo que está sendo ligado. Dessa forma, estão sendo calculadas as perdas de duas topologias vizinhas da topologia corrente. Após resolver os dois problemas de fluxo de potência, caso uma das topologias radiais vizinhas apresente menores valores de perdas, então realizar a troca de ramos para encontrar a nova topologia corrente. Assim, após analisar cada ramo desligado da lista ordenada, o processo termina encontrando uma topologia radial de qualidade.

O algoritmo de Merlin-Back modificado encontra as topologias ótimas dos sistemas de 14, 33 e 84 barras.

5 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. A análise mostrou que a heurística de Merlin-Back encontra soluções de boa qualidade para sistemas de tamanho razoável, mas nem sempre para os mais complexos, e por possuir tempo de processamento muito pequeno, isto é, menos de um segundo, é aplicável onde o tempo de processamento é crítico. Também foi verificado que, a rede malhada, com todos os ramos ligados, nem sempre é a topologia com menores valores de perdas, contrariando a hipótese de Merlin-Back. Com a análise, foi introduzida uma modificação na heurística de Merlin-Back, ou seja, introdução de uma etapa adicional no algoritmo. Esta estratégia modificada foi capaz de encontrar as topologias ótimas dos três sistemas usados nos testes.

Referências

AHMADI, H.; MARTI, J. Mathematical representation of radiality constraint in distribution systems reconfiguration problems, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 64, p. 293-299, 2015.

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, 1989.

CHIOU, J.P.; CHANG, C.-F.; SU, C.-T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.

CIVANLAR, S.; GRAINGER, J.J.; YIN, H.; LEE, S. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 3, n. 3, p. 1217-1223, 1988.

DELBEM, A.C.B.; CARVALHO, A.C.; BRETAS, N.G. Main chain representation for evolutionary algorithms applied to distribution systems reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 1, p. 425-436, 2005.

GOLVER, F.; KOCHENBERGER, G. *Handbook of metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 2003.

GOMES, F.V.; CARNEIRO, S.; PEREIRA, J.L.R; VINAGRE, M.P.; GARCIA, P.A.N.; ARAUJO, L.R. A new distribution system reconfiguration approach using optimum power flow and sensitivity analysis for loss reduction, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 4, p. 1616-1623, 2006.

HARRIS, J.M.; HIRST, J.L.; MOSSINGHOFF, M.J. *Combinatory and graph theory*, v. 51, Springer, 2013.

JABR, R.; SINGH, R.; PAL, B.C. Minimum loss network reconfiguration using mixed-integer convex programming, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 27, n. 2, p. 1106-1115, 2012.

LAVORATO, M.; FRANCO, J.F.; RIDER, M.J.; ROMERO, R. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 27, n. 1, p. 172-180, 2012.

MACEDO, L.H. Reconfiguração de sistemas de distribuição operando em vários níveis de demanda através de uma meta-heurística de busca em vizinhança variável, *Dissertação de mestrado*, UNESP, 2015.

MACEDO, L.H.; FRANCO, J.F.; MAHDAVI, M.; ROMERO, R. A contribution to the optimization of the reconfiguration problem in radial distribution systems, *Journal of Control Automation and Electrical Systems*, v. 29, n. 6, p. 756-768, 2018.

MENDOZA, J.; LOPEZ, R.; MORALES, D.; LOPEZ, E.; DESSANTE, P.; MORAGA, R. Minimal loss reconfiguration using genetic algorithms with restricted population and addressed operators: Real applications, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 2, p. 948-954, 2006.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system, *Power System Computation Conference*, p. 1-18, 1975.

ROMERO, R.; ASADA, E.; CARREÑO, E.; ROCHA, C. Constructive heuristic algorithm in branch and bound structure applied to transmission network expansion planning, *IET Generation, Transmission and Distribution*, v. 1, n. 2, p. 318-323, 2007.

SCHMIDT, H.P.; IDA, N.; KAGAN, N.; GUARALDO, J.C. Fast reconfiguration of distribution systems considering loss minimization, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1311-1319, 2005.

SHIRMOHAMMADI, D.; HONG, H.W.; SEMLYEN, A.; LUO, G.X. A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 2, p. 753-762, 1988.

Apêndices

APÊNDICE A – Algoritmo de fluxo de potência para redes radiais e fracamente malhadas

A.1 Algoritmo de fluxo de potência de varredura

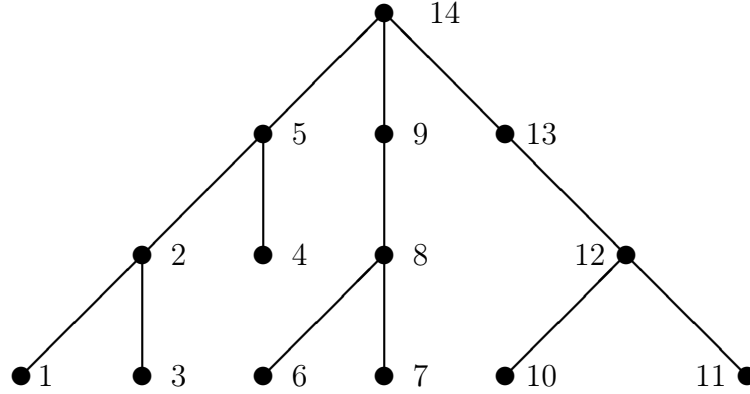
Para implementar o AHC proposto por Merlin e Back (1975) visto no Capítulo 3, faz-se necessário o desenvolvimento do algoritmo de fluxo de potência para sistemas radiais e fracamente malhados. O problema pode ser modelado matematicamente como um sistema de equações algébricas não lineares, obtido utilizando método específico conhecido como método de varredura que apresenta melhor convergência, além de ser rápido, sendo mais adequado para resolver sistema de distribuição. O algoritmo é chamado de varredura por realizar um percurso das barras extremas em direção à subestação e vice-versa no processo iterativo.

A.1.1 Problema de fluxo de potência para sistemas de distribuição radiais

Renumerar os ramos do sistema na estrutura de camadas é o primeiro passo desse método, na qual são remunerados todos os ramos de uma camada antes de seguir à próxima camada. A primeira camada é composta pelos ramos ligados à subestação, a segunda corresponde aos ramos ligados à primeira camada e os ramos que constituem as seguintes camadas são determinados seguindo a mesma lógica. A Figura 4 mostra um sistema de distribuição radial com numeração original das barras e a Figura 5 ilustra o mesmo sistema com ramos remunerados utilizando o método de camadas.

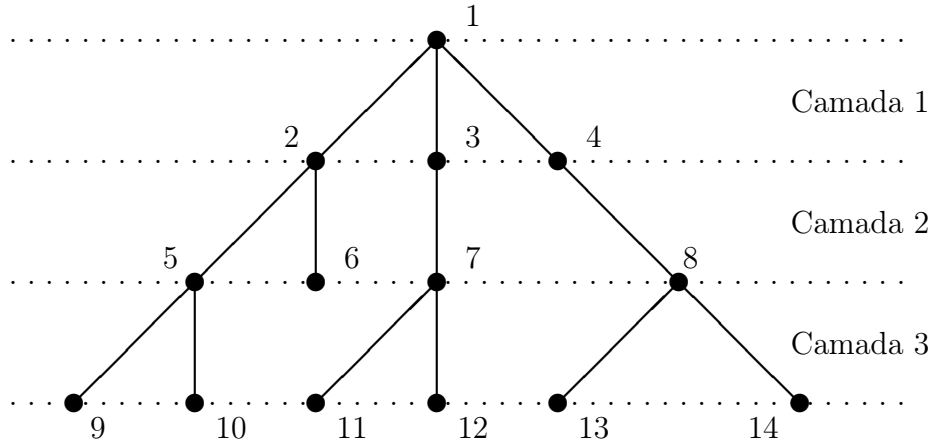
Inicia-se o processo escolhendo um valor para os módulos de tensão nas barras, sendo que esta é normalmente a mesma tensão da subestação. Após isso, é calculada a corrente de carga em todas as barras e as correntes em todos os ramos do sistema. Este processo é denominado *backward*, processo iniciado das barras extremas à subestação. Assim, com as correntes definidas, é possível calcular as perdas aproximadas do sistema e também conhecer a corrente que está saindo da subestação. Novos valores das tensões em todas as barras são calculados a partir das correntes de ramos que foram determinadas no processo de *backward*, começando da subestação em direção às barras extremas. Esse processo é denominado *forward*. Utilizando os novos valores de tensão, são calculadas novamente as correntes utilizando o processo *backward* e a nova aproximação das perdas

Figura 4 – Sistema de distribuição radial



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 5 – Sistema de distribuição radial com ramos ordenados em camadas

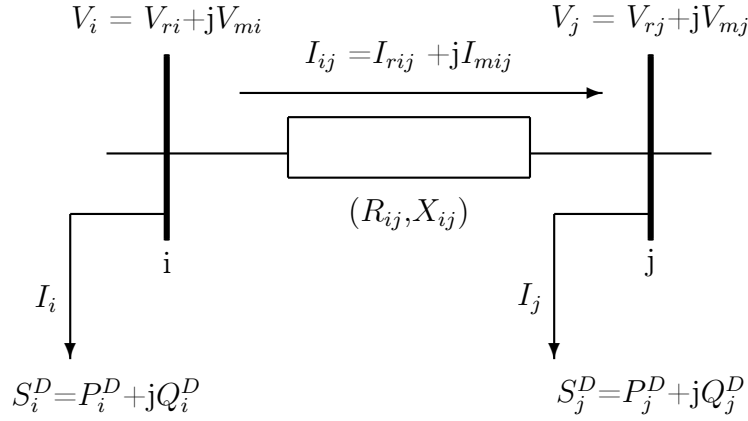


Fonte: Elaborado pela autora.

do sistema. O processo é iterativo e é encerrado quando a variação das perdas em duas iterações consecutivas, ΔP_a , é menor que uma tolerância especificada, ε . A Figura 6 apresenta duas barras de um sistema de distribuição radial, na qual será utilizado para dedução a seguir.

Na Figura 6, a carga da barra i é descrita na forma $S_i^D = P_i^D + jQ_i^D$, na qual S_i^D é a potência complexa, P_i^D e Q_i^D são potências ativa e reativa, respectivamente. A tensão de barra é representada da forma $V_i = V_{ri} + jV_{mi}$, onde V_{ri} e V_{mi} é parte real e imaginária de V_i , na ordem. A corrente absorvida pela carga na barra i é I_i , e a corrente no ramo ij é $I_{ij} = I_{rij} + jI_{mij}$, sendo I_{rij} e I_{mij} as partes real e imaginária de I_{ij} , respectivamente. R_{ij} e X_{ij} são a resistência e a reatância do ramo ij , respectivamente.

Figura 6 – Trecho de um sistema de distribuição radial



Fonte: Elaborado pela autora.

• Cálculo das correntes nos ramos

No processo *backward* do método de varredura, são calculadas as correntes absorvidas pelas cargas e as correntes nos ramos no sistema. A seguir são feitas as deduções para se obter as expressões dessas correntes. Tem-se:

$$S_i^D = P_i^D + jQ_i^D$$

e a tensão na barra i na iteração $k - 1$ sendo

$$V_i^{k-1} = V_{ri}^{k-1} + jV_{mi}^{k-1}$$

Pela definição:

$$S_i^D = V_i I_i^{*(k)} \rightarrow I_i^{*(k)} = \frac{P_i^D + jQ_i^D}{V_{ri}^{k-1} + jV_{mi}^{k-1}} = \frac{(P_i^D + jQ_i^D)(V_{ri}^{k-1} - jV_{mi}^{k-1})}{(V_{ri}^{k-1} + jV_{mi}^{k-1})(V_{ri}^{k-1} - jV_{mi}^{k-1})}$$

$$I_i^k = \frac{(P_i^D + jQ_i^D)(V_{ri}^{k-1} - jV_{mi}^{k-1})}{(V_{ri}^{k-1})^2 + (V_{mi}^{k-1})^2} = \frac{(P_i^D V_{ri}^{k-1} + Q_i^D V_{mi}^{k-1}) + j(P_i^D V_{mi}^{k-1} - Q_i^D V_{ri}^{k-1})}{(V_{ri}^{k-1})^2 + (V_{mi}^{k-1})^2}$$

Separando as partes real e imaginária da corrente, são encontrados:

$$I_{ri}^k = \frac{P_i^D V_{ri}^{k-1} + Q_i^D V_{mi}^{k-1}}{(V_{ri}^{k-1})^2 + (V_{mi}^{k-1})^2}$$

$$I_{mi}^k = \frac{P_i^D V_{mi}^{k-1} - Q_i^D V_{ri}^{k-1}}{(V_{ri}^{k-1})^2 + (V_{mi}^{k-1})^2}$$

Portanto, a corrente que flui no ramo ij na iteração k é dada por:

$$I_{ij}^k = I_{rij}^k + jI_{mij}^k$$

e a maneira de como se calcula as correntes nos ramos é dada por:

$$I_{ij}^k = I_j^k + \sum_{jl \in \Omega_l} I_{jl}^k$$

Sendo j a barra mais distante da subestação em cada ramo ij . I_{ij}^k a corrente absorvida pela carga na barra j , na iteração k . O somatório corresponde aos fluxos de corrente em ramos ligados à barra i e que pertencem às camadas inferiores, na iteração k . A equação é aplicada da última para a primeira camada.

• Cálculo das tensões nas barras

O cálculo das tensões é realizado no processo *forward*, da subestação às barras terminais. É necessário calcular a tensão na barra j a partir da tensão na barra i conhecida, que é mais próxima da subestação. A dedução da expressão da tensão na barra j é descrita a seguir.

Pela definição:

$$\begin{aligned} V_i^k &= V_{ri}^k + jV_{mi}^k = V_j^k + (R_{ij} + jX_{ij})(I_{rij}^k + jI_{mij}^k) \\ V_{ri}^k + jV_{mi}^k &= V_{rj}^k + jV_{mj}^k + (R_{ij}I_{rij}^k - X_{ij}I_{mij}^k) + j(R_{ij}I_{mij}^k + X_{ij}I_{rij}^k) \end{aligned}$$

Separando a parte imaginária e real são obtidas as seguinte equações

$$\begin{aligned} V_{rj}^k &= V_{ri}^k - R_{ij}I_{rij}^k + X_{ij}I_{mij}^k \\ V_{mj}^k &= V_{mi}^k - R_{ij}I_{mij}^k - X_{ij}I_{rij}^k \end{aligned}$$

No processo *forward*, essas equações devem ser aplicadas da primeira para última camada.

• Cálculo das perdas

A dedução da expressão para o cálculo das perdas do sistema elétrico é uma relação simples. As perdas nas linhas, na iteração k , podem ser calculadas por:

$$P_{aij} = R_{ij}I_{ij}^2$$

$$Q_{aij} = X_{ij} I_{ij}^2$$

As perdas ativas e reativas totais no sistema são dados por:

$$P_a = \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij}^2$$

$$Q_a = \sum_{ij \in \Omega} X_{ij} I_{ij}^2$$

A Figura 7 apresenta o fluxograma do algoritmo de fluxo de potência para sistemas radiais utilizando o método de varredura.

A.1.2 Problema de fluxo de potência para sistemas fracamente malhados

O algoritmo de varredura não pode ser aplicado diretamente a rede fracamente malhada, portanto é preciso convertê-la em um sistema radial seccionando a rede em *breakpoints*, na qual a quantidade de desses seccionamentos é igual ao número de malhas independentes que existem no sistema. A Figura 8 mostra um exemplo de um sistema de distribuição fracamente malhado, contendo três laços independentes, com três pontos de rupturas selecionados.

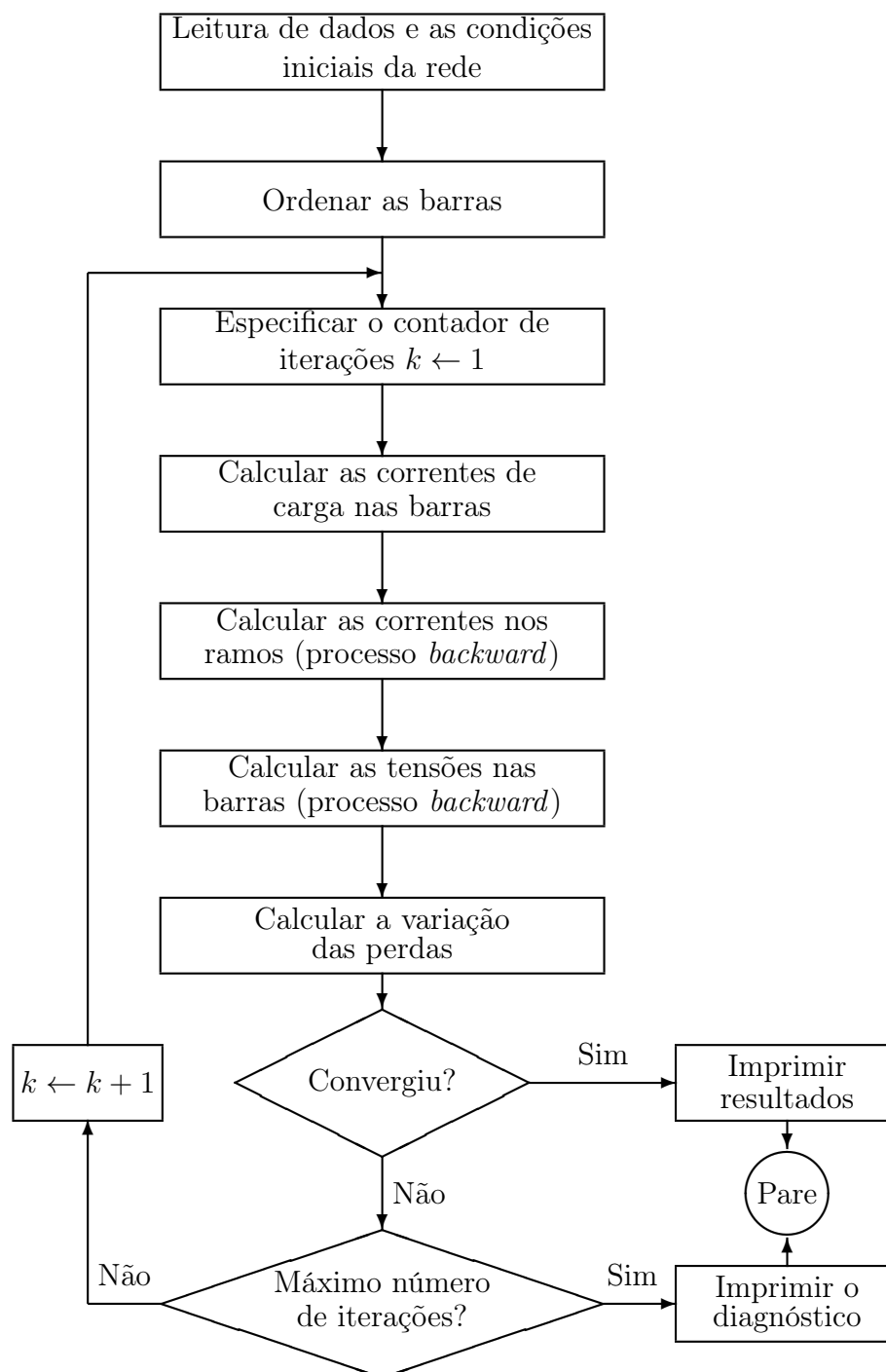
As correntes nos ramos que foram cessadas pelo *breakpoints*, podem ser substituídas por injeção de correntes em ambos nós terminais sem afetar a operação do sistema. Ao aplicar o fluxo de potência para sistemas radiais, na iteração k , a corrente nos ramos interrompidas em j, I_j^k , deve ser injetada com a polaridade contrária com a mesma magnitude em ambos nós terminais como:

$$\begin{aligned} I_{j1}^k &= -I_j^k \\ I_{j2}^k &= I_j^k \end{aligned}$$

Onde $j1$ e $j2$ são os dois terminais de *breakpoint* j , I_{j1}^k e I_{j2}^k são as injeções de correntes nodais nestes nós, e I_j^k é a corrente no *breakpoint* j . As correntes I_j^k e $-I_j^k$ são somadas às correntes nodais na presença de correntes nodais nos nós de *breakpoints* devido a elementos shunt e/ou cargas. É possível utilizar o processo *backward* e *backward* do método de varredura para redes radiais diretamente após I_{j1}^k e I_{j2}^k serem atualizados.

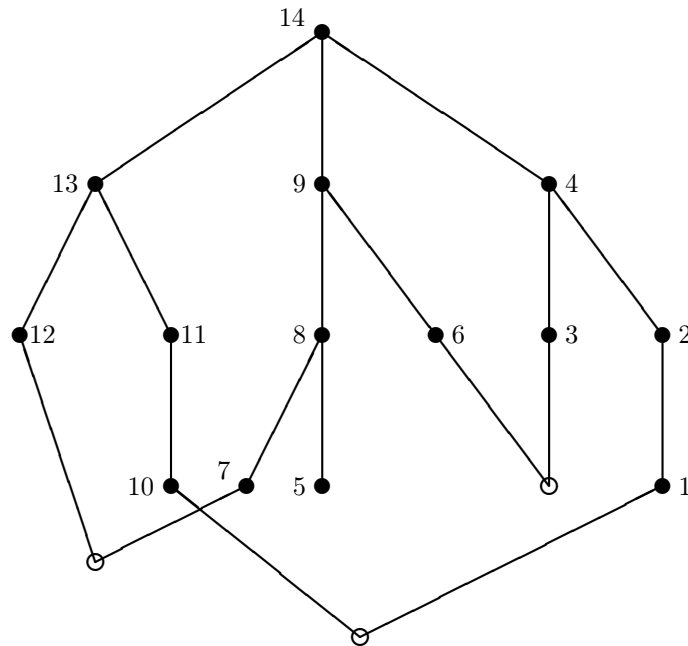
- Cálculo das correntes nos *breakpoints* usando o método de compensação

Figura 7 – Algoritmo de fluxo de potência de varredura para sistemas radiais



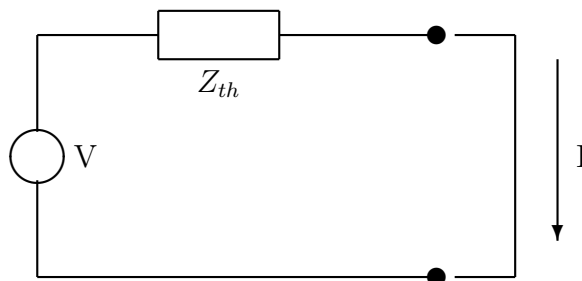
Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

Figura 8 – Sistema de distribuição fracamente malhado



Fonte: Elaborado pela autora.

É introduzido o método de compensação multiporta a fim de calcular as correntes nos *breakpoints*. O sistema resultante da abertura de *breakpoints* corresponde a rede multiporta, com os nós dos *breakpoints* formando as portas do circuito. Para uma rede linear, este circuito é o circuito equivalente de Thévenin da rede radial vista pelos *breakpoints*. Neste circuito, a tensão de Thévenin, V , é o vetor $p \times 1$ de tensões de circuito aberto nos *breakpoints*, sendo que p é o número de *breakpoints*. Z_{th} é a matriz $p \times p$ das impedâncias vista pelos *breakpoints* obtido do problema do fluxo de potência, e I é o vetor $p \times 1$ das correntes de *breakpoints* desejadas, assim como é mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Circuito equivalente de Thévenin da rede vista pelos *breakpoints*

Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

Assim, a equação que descreve esse circuito é:

$$V = Z_{th}I$$

A equação não pode ser aplicada diretamente na presença de cargas de potência constante, uma vez que a rede de distribuição é não linear (SHIRMOHAMMADI et al., 1988).

- **Cálculo da matriz de impedâncias equivalentes vistas pelos *breakpoints***

Uma matriz pode ser utilizada para descrever as impedâncias vistas pelos *breakpoints*, equivalentes de Thévenin, da seguinte maneira. A equação do circuito obtida anteriormente pode ser escrita como

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_j \\ \vdots \\ V_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1j} & \dots & Z_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{j1} & \dots & Z_{jj} & \dots & Z_{jp} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{p1} & \dots & Z_{pj} & \dots & Z_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_j \\ \vdots \\ I_p \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Em que $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$.

A matriz é baseada na situação em que uma corrente de valor 1 p.u. é aplicada no *breakpoint* j com todas as cargas e outros elementos de conexão removidas, o que equivale a injetar uma corrente de 1 p.u. e polaridades opostas nos dois nós terminais do *breakpoint* j . O resultado do fluxo de potência para redes radiais pode ser obtido em uma única iteração com as cargas retiradas. Subtraindo as tensões nos dois terminais de cada *breakpoint* é possível definir cada uma das tensões nos *breakpoints*. O processo é repetido até que toda coluna da matriz de impedâncias vistas pelos *breakpoints* estejam preenchidas.

- **Processo iterativo de compensação**

As correntes nos *breakpoints* são calculadas pelo processo iterativo de compensação utilizando o circuito equivalente de Thévenin. O processo é apresentado a seguir:

1. Montar a matriz de impedância equivalentes de Thévenin vistas pelos *breakpoints* mantendo-a constante durante todo o processo;
2. Por meio dos processos *backward* e *forward*, calcular a tensão equivalente de Thévenin do sistema radial, incluindo as correntes nos *breakpoints* calculados em (1), sendo que os valores iniciais das correntes nos *breakpoints* é zero;
3. Utilizando o circuito equivalente de Thévenin, calcula-se a mudança incremental nas correntes dos *breakpoints*. Na iteração k , a mudança incremental das correntes os *breakpoints* é dada por:

$$\Delta I^k = Z_{th}^{-1} V^k$$

e pode ser representada como

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r^k \\ \Delta I_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{th}^r & -Z_{th}^m \\ Z_{th}^m & Z_{th}^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_r^k \\ \Delta V_m^k \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

onde ΔI_r^k e ΔI_m^k são os vetores com as partes real e imaginária do vetor ΔI^k , na ordem, Z_{th}^r e Z_{th}^m são matrizes com as partes real e imaginária da matriz Z_{th} , respectivamente, e ΔV_r^k e ΔV_m^k são vetores com as partes real e imaginária do vetor ΔV^k , respectivamente.

4. Atualizar as correntes nos *breakpoints* de acordo com a expressão a seguir.

$$I^k = I^{k-1} + \Delta I^k$$

e que pode ser descrita como:

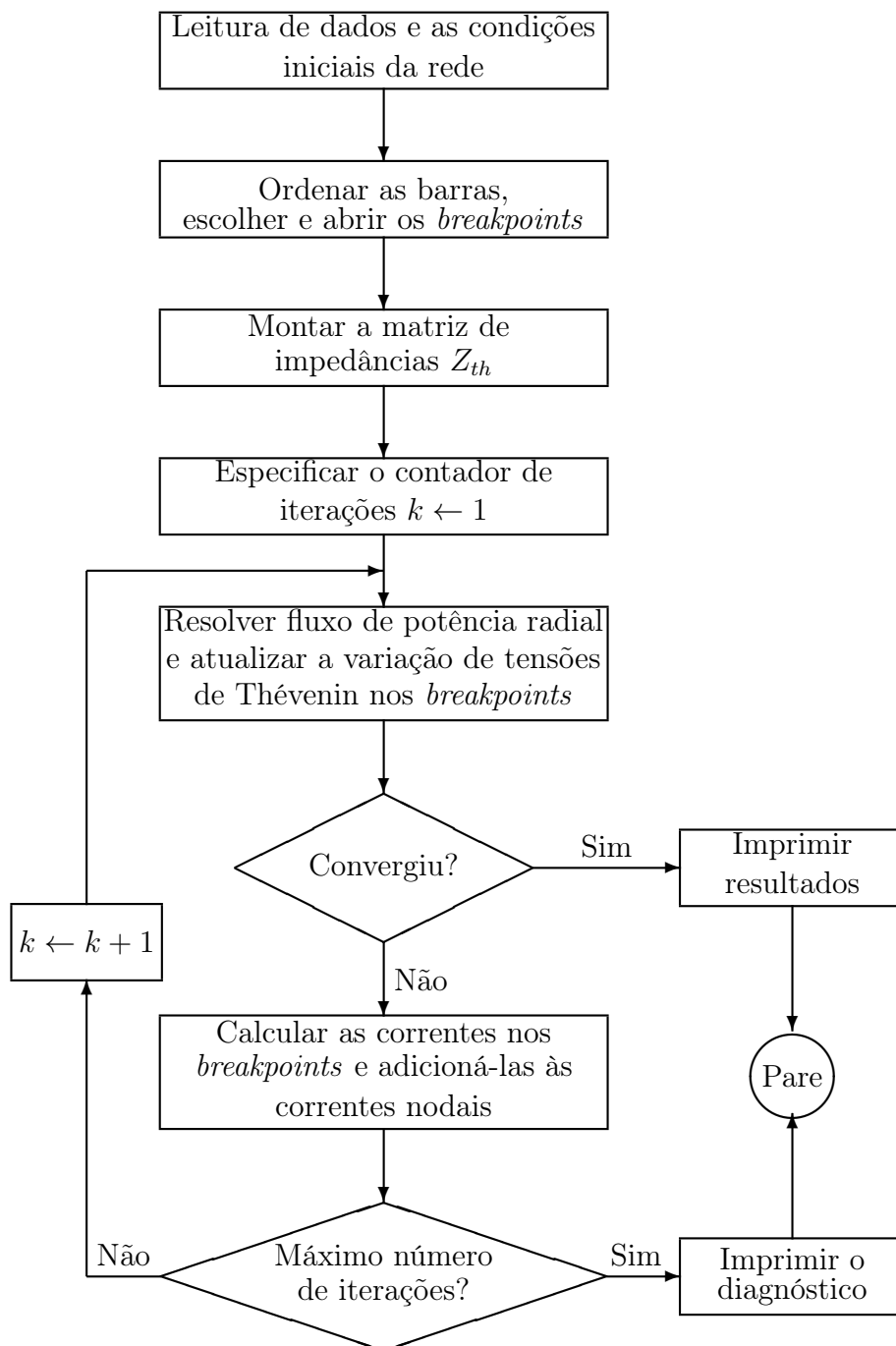
$$\begin{bmatrix} I_r^k \\ I_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r^k \\ I_m^k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_r^k \\ \Delta I_m^k \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Onde I_r^k e I_m^k são vetores com as partes real e imaginária do vetor I^k , respectivamente.

5. Repetir os passos (2) a (4) até alcançar a convergência, sendo que a máxima tensão nos *breakpoints*, calculada no passo (2) deve estar dentro do limite especificado.

A Figura 10 mostra o fluxograma do algoritmo de fluxo de potência de varredura para sistemas de distribuição fracamente malhados.

Figura 10 – Algoritmo de fluxo de potência de varredura para sistemas fracamente malhados



Fonte: Shirmohammadi et al. (1988).

A.2 Testes com o algoritmo de fluxo de potência de varredura

Nesta seção são mostradas as tabelas de fluxo de potência e tensão nas barras determinadas pelo algoritmo de fluxo de potência de varredura, para configuração em malha fechada e radial, para cada sistema.

A.2.1 Sistema de 14 barras

Tabela 13 – Fluxo de potência do sistema de 14 barras em malha fechada - Perdas: 426,26 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	14	13	10702,73	11050,43	9	8	5	4519,35	4819,21
2	13	12	5880,58	5893,25	10	14	4	7464,26	7605,07
3	13	11	2730,56	2804,99	11	4	3	2506,72	2514,55
4	11	10	723,33	1256,47	12	4	2	3893,92	3905,06
5	14	9	10959,27	11177,60	13	2	1	2881,48	2947,93
6	9	8	7320,69	7324,98	14	12	6	2852,19	2852,68
7	9	7	-498,85	632,29	15	7	3	-1499,31	1977,20
8	8	6	-2242,84	2285,19	16	10	1	-777,32	796,40

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 14 – Tensão nas barras do sistema de 14 barras em malha fechada

Barra	Tensão [kV]	Barra	Tensão [kV]
1	22,6741	8	22,5388
2	22,6951	9	22,6682
3	22,7170	10	22,6529
4	22,7748	11	22,6692
5	22,4976	12	22,6342
6	22,6080	13	22,7530
7	22,6910	14	23,0000

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 15 – Fluxo de potência do sistema de 14 barras em configuração radial - Perdas: 466,13 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	14	13	9192,15	9508,10	9	8	5	4519,61	4819,33
2	13	12	3610,88	3611,89	10	14	4	6156,89	6216,81
3	13	11	3513,47	3609,12	11	4	3	2004,45	2013,84
4	11	10	1501,52	1923,08	12	4	2	3109,93	3111,98
5	14	9	13817,08	14172,30	13	2	1	2102,06	2248,42
6	9	8	9596,14	9598,95	14	12	6	600,25	781,06
7	9	7			15	7	3	-1000,00	1345,36
8	8	6			16	10	1		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 16 – Tensão nas barras do sistema de 14 barras em configuração radial

Barra	Tensão [kV]	Barra	Tensão [kV]
1	22,7503	8	22,3877
2	22,7624	9	22,5723
3	22,7865	10	22,6534
4	22,8228	11	22,6786
5	22,3462	12	22,7215
6	22,7205	13	22,7862
7	22,7689	14	23,0000

Fonte: Elaborado pela autora.

A.2.2 Sistema de 33 barras

Tabela 17 – Fluxo de potência do sistema de 33 barras em malha fechada - Perdas: 123,29 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3838,29	4520,47	20	20	21	825,06	1041,94
2	2	3	2707,23	3140,97	21	21	22	408,82	515,28
3	3	4	1250,03	1419,35	22	3	23	1336,67	1592,05
4	4	5	1125,30	1270,54	23	23	24	1239,34	1480,46
5	5	6	1061,33	1199,01	24	24	25	806,57	1005,11
6	6	7	441,63	455,47	25	6	26	552,03	693,54
7	7	8	241,38	241,61	26	26	27	491,38	630,15
8	8	9	362,07	407,69	27	27	28	430,64	567,18
9	9	10	70,37	71,03	28	28	29	368,37	506,15
10	10	11	10,33	31,46	29	29	30	626,54	917,26
11	11	12	-34,67	69,05	30	30	31	423,65	429,15
12	12	13	220,60	281,59	31	31	32	272,43	272,44
13	13	14	159,82	212,07	32	32	33	62,27	120,29
14	14	15	39,66	71,24	33	8	21	-320,97	423,91
15	15	16	209,07	306,63	34	9	15	230,57	290,22
16	16	17	148,60	252,34	35	12	22	-315,28	414,92
17	17	18	88,04	203,26	36	18	33	-2,16	143,06
18	2	19	1019,31	1253,32	37	25	29	380,57	548,53
19	19	20	927,69	1154,80					

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 18 – Tensão nas barras do sistema de 33 barras em malha fechada

Barra	Tensão [kV]	Barra	Tensão [kV]
1	12,6600	18	12,0771
2	12,6632	19	12,6009
3	12,4858	20	12,4162
4	12,4391	21	12,3645
5	12,3954	22	12,3173
6	12,2935	23	12,4161
7	12,2812	24	12,2802
8	12,2670	25	12,1871
9	12,2253	26	12,2808
10	12,2199	27	12,2648
11	12,2199	28	12,1995
12	12,2215	29	12,1553
13	12,1785	30	12,1149
14	12,1632	31	12,0754
15	12,1587	32	12,0685
16	12,1358	33	12,0713
17	12,0911		

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 19 – Fluxo de potência do sistema de 33 barras em configuração radial - Perdas: 140,28 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	2	3855,28	4542,78	20	20	21	1133,52	1259,47
2	2	3	2409,54	2942,75	21	21	22	377,97	438,94
3	3	4	1353,21	1794,46	22	3	23	939,53	1044,86
4	4	5	1225,66	1643,34	23	23	24	846,38	938,30
5	5	6	1159,01	1571,51	24	24	25	421,28	466,77
6	6	7	200,06	223,76	25	6	26	885,76	1284,09
7	7	8			26	26	27	823,53	1222,54
8	8	9	454,53	486,72	27	27	28	760,68	1161,02
9	9	10	60,03	63,28	28	28	29	691,08	1094,44
10	10	11			29	29	30	564,46	957,05
11	11	12	-45,00	54,08	30	30	31	361,21	399,74
12	12	13	180,53	214,29	31	31	32	210,12	232,76
13	13	14	120,08	144,34	32	32	33		
14	14	15			33	8	21	-654,53	709,59
15	15	16	271,11	296,93	34	9	15	332,85	358,39
16	16	17	210,65	233,52	35	12	22	-285,54	337,78
17	17	18	150,17	170,21	36	18	33	60,02	72,14
18	2	19	1333,87	1482,70	37	25	29		
19	19	20	1241,61	1381,29					

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 20 – Tensão nas barras do sistema de 33 barras em configuração radial

Barra	Tensão [kV]	Barra	Tensão [kV]
1	12,6600	18	11,9750
2	12,6230	19	12,5976
3	12,4953	20	12,3844
4	12,4381	21	12,3258
5	12,3835	22	12,2871
6	12,2462	23	12,4501
7	12,2381	24	12,3660
8	12,1730	25	12,3241
9	12,1240	26	12,2237
10	12,1176	27	12,1939
11	12,2090	28	12,0606
12	12,2107	29	12,9653
13	12,1781	30	12,9247
14	12,1681	31	11,8813
15	12,0472	32	11,8728
16	12,0250	33	11,9708
17	11,9880		

Fonte: Elaborado pela autora.

A.2.3 Sistema de 84 barras

Tabela 21 – Fluxo de potência do sistema de 84 barras em malha fechada - Perdas: 462,68 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	84	-2372,75	2883,94	49	48	49	3129,72	3875,21
2	1	2	2372,75	2883,94	50	49	50	3121,76	3859,15
3	2	3	2259,01	2745,90	51	50	51	2916,98	3593,70
4	3	4	1944,72	2356,98	52	51	52	2108,65	2577,31
5	4	5	1590,54	1918,70	53	52	53	1606,49	1991,80
6	5	6	1286,61	1632,49	54	53	54	622,74	754,16
7	6	7	185,73	275,16	55	54	55	122,49	174,92
8	7	8	300,11	360,78	56	56	84	-2140,18	2623,78
9	7	9	300,28	378,60	57	56	57	2140,18	2623,78
10	7	10	300,14	397,28	58	57	58	2080,97	2529,41
11	11	84	-3256,86	3844,92	59	58	59	1478,20	1791,54
12	11	12	3508,09	4203,21	60	59	60	1477,12	1788,57
13	12	13	538,59	602,06	61	60	61	339,16	385,81
14	12	14	737,17	899,77	62	61	62	319,13	363,41
15	15	84	-2970,70	3758,98	63	62	63	119,01	126,75
16	15	16	2970,70	3758,98	64	63	64	-181,02	267,14
17	16	17	4073,27	4995,87	65	65	84	-1691,38	2249,15
18	17	18	3562,94	4364,87	66	65	66	1691,38	2249,15
19	18	19	2875,75	3553,42	67	66	67	1634,72	2177,75
20	19	20	1671,72	1989,70	68	67	68	1630,21	2164,22
21	20	21	550,93	681,95	69	68	69	1222,08	1601,99
22	21	22	50,00	53,86	70	69	70	1221,07	1598,99
23	21	23	100,02	104,44	71	70	71	1219,55	1594,50
24	23	24	50,00	50,99	72	71	72	-781,63	915,60
25	25	84	-3054,33	3747,40	73	73	84	-1766,14	2301,73
26	25	26	3004,33	3689,27	74	73	74	1766,14	2301,73
27	26	27	1483,02	1974,36	75	74	75	1764,77	2297,69
28	27	28	1375,40	1836,98	76	75	76	562,37	761,36
29	28	29	390,60	469,86	77	77	84	-2803,47	3592,07
30	30	84	-2837,93	3526,13	78	77	78	2803,47	3592,07
31	30	31	2837,93	3526,13	79	78	79	2390,06	3016,31
32	31	32	1025,12	1126,27	80	79	80	386,43	654,05
33	32	33	6,95	35,53	81	80	81	185,97	429,15
34	33	34	-193,05	235,48	82	81	82	-314,23	315,34
35	34	35	340,19	400,04	83	82	83	-414,31	414,33
36	35	36	240,13	283,30	84	5	55	77,55	89,56
37	36	37	139,81	166,09	85	7	60	-1114,83	1376,95
38	37	38	119,80	143,86	86	11	43	-252,13	370,62
39	38	39	-74,82	97,98	87	12	72	985,60	1172,45
40	39	40	95,51	116,86	88	13	76	-261,49	421,90
41	38	41	174,61	219,44	89	14	18	36,65	39,55
42	41	42	-25,47	37,30	90	16	26	-1408,38	1596,24
43	43	84	-2634,66	3385,81	91	20	83	815,27	893,57
44	43	44	2382,39	3019,18	92	28	32	-816,51	887,55
45	44	45	2349,61	2977,53	93	29	39	190,37	236,71
46	45	46	1540,58	1899,03	94	34	46	-1333,32	1634,52
47	47	84	-3137,69	3891,30	95	40	42	75,48	94,76
48	47	48	3137,69	3891,30	96	53	64	481,16	623,65

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 22 – Tensão nas barras do sistema de 84 barras em malha fechada

Barra	Tensão [kV]	Barra	Tensão [kV]
1	11,2621	43	11,3577
2	11,1554	44	11,3363
3	11,0401	45	11,2658
4	11,0013	46	11,1859
5	10,9291	47	11,1594
6	10,9170	48	11,1133
7	10,9138	49	11,0672
8	10,9069	50	11,0396
9	10,8971	51	10,9882
10	10,9058	52	10,9698
11	11,3483	53	10,9410
12	11,1023	54	10,9338
13	11,0998	55	10,9292
14	11,0896	56	11,2520
15	11,2911	57	11,0019
16	11,2554	58	10,9780
17	11,2088	59	10,9598
18	11,0864	60	10,9471
19	11,0610	61	10,9495
20	11,0012	62	10,9389
21	10,9717	63	10,9344
22	10,9704	64	10,9363
23	10,9688	65	11,3721
24	10,9680	66	11,3003
25	11,3477	67	11,2301
26	11,2794	68	11,1042
27	11,1877	69	11,0834
28	11,1637	70	11,0522
29	11,1528	71	11,0280
30	11,2769	72	11,0322
31	11,1941	73	11,2027
32	11,1709	74	11,1831
33	11,1710	75	11,1487
34	11,1782	76	11,1386
35	11,1746	77	11,1636
36	11,1501	78	11,0426
37	11,1490	79	11,0045
38	11,1480	80	10,9872
39	11,1494	81	10,9757
40	11,1451	82	10,9779
41	11,1401	83	10,9900
42	11,1417	84	11,4000

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 23 – Fluxo de potência do sistema de 84 barras em configuração radial - Perdas: 471,73 kW

Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Potência ativa [kW]	Potência aparente [kVA]
1	1	84	-2100,05	2558,68	49	48	49	3329,02	4040,39
2	1	2	2100,05	2558,68	50	49	50	3320,35	4023,17
3	2	3	1989,26	2426,53	51	50	51	3115,15	3757,52
4	3	4	1678,16	2043,91	52	51	52	2306,03	2741,41
5	4	5	1325,04	1607,63	53	52	53	1803,58	2153,87
6	5	6	1100,60	1361,36	54	53	54	700,33	797,11
7	6	7			55	54	55	200,05	215,49
8	7	8	300,12	360,78	56	56	84	-2212,19	2782,87
9	7	9	300,29	378,61	57	56	57	2212,19	2782,87
10	7	10	300,14	397,28	58	57	58	2149,26	2679,86
11	11	84	-2936,45	3623,22	59	58	59	1546,13	1941,53
12	11	12	2935,55	3622,49	60	59	60	1544,85	1937,89
13	12	13	800,21	1000,43	61	60	61	220,07	260,89
14	12	14	700,47	861,18	62	61	62	200,05	238,64
15	15	84	-4101,38	5138,43	63	62	63		
16	15	16	4101,38	5138,43	64	63	64	-300,00	384,19
17	16	17	3790,45	4786,63	65	65	84	-2499,64	3226,77
18	17	18	3280,89	4157,42	66	65	66	2499,64	3226,77
19	18	19	2559,06	3315,87	67	66	67	2435,90	3140,58
20	19	20	1355,51	1746,52	68	67	68	2426,45	3112,97
21	20	21	550,94	681,97	69	68	69	2009,43	2526,91
22	21	22	50,00	53,86	70	69	70	2006,86	2519,55
23	21	23	100,02	104,44	71	70	71	2003,00	2508,54
24	23	24	50,00	50,99	72	71	72		
25	25	84	-2363,59	2900,92	73	73	84	-1502,55	1885,28
26	25	26	2313,59	2842,79	74	73	74	1502,55	1885,28
27	26	27	2207,03	2713,37	75	74	75	1501,64	1882,68
28	27	28	2092,69	2562,57	76	75	76	300,05	349,98
29	28	29	290,14	336,43	77	77	84	-3120,77	3835,11
30	30	84	-2007,39	2673,10	78	77	78	3120,77	3835,11
31	30	31	2007,39	2673,10	79	78	79	2705,46	3258,94
32	31	32	200,06	250,13	80	79	80	701,22	862,66
33	32	33			81	80	81	500,41	616,94
34	33	34	-200,00	223,61	82	81	82		
35	34	35	440,97	534,48	83	82	83	-100,00	104,40
36	35	36	340,86	417,88	84	5	55		
37	36	37	240,16	300,32	85	7	60	-1300,54	1647,35
38	37	38	220,13	278,29	86	11	43		
39	38	39			87	12	72	200,17	250,35
40	39	40	70,02	80,65	88	13	76		
41	38	41	200,10	256,34	89	14	18		
42	41	42			90	16	26		
43	43	84	-2492,09	3143,10	91	20	83	500,29	634,71
44	43	44	2492,09	3143,10	92	28	32		
45	44	45	2459,08	3100,98	93	29	39	90,02	103,00
46	45	46	1649,28	2021,59	94	34	46	-1441,04	1755,25
47	47	84	-3337,68	4057,63	95	40	42	50,01	58,32
48	47	48	3337,68	4057,63	96	53	64	600,21	744,50

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 24 – Tensão nas barras do sistema de 84 barras em configuração radial

Barra	Tensão [kV]	Barra	Tensão [kV]
1	11,2775	43	11,3614
2	11,1828	44	11,3392
3	11,0890	45	11,2660
4	11,0472	46	11,1813
5	10,9866	47	11,1543
6	10,9768	48	11,1069
7	10,8667	49	11,0596
8	10,8598	50	11,0312
9	10,8499	51	10,9783
10	10,8586	52	10,9592
11	11,3494	53	10,9289
12	11,1321	54	10,9218
13	11,1273	55	10,9174
14	11,1199	56	11,2386
15	11,2518	57	10,9681
16	11,2030	58	10,9412
17	11,1574	59	10,9216
18	11,0374	60	10,9074
19	11,0129	61	10,9062
20	10,9570	62	10,9017
21	10,9274	63	10,9210
22	10,9261	64	10,9235
23	10,9245	65	11,3595
24	10,9237	66	11,2593
25	11,3596	67	11,1604
26	11,3070	68	10,9833
27	11,1872	69	10,9315
28	11,1563	70	10,9035
29	11,1487	71	10,8663
30	11,3032	72	11,1165
31	11,2380	73	11,2443
32	11,2320	74	11,2288
33	11,1669	75	11,2017
34	11,1731	76	11,1978
35	11,1682	77	11,1573
36	11,1308	78	11,0332
37	11,1287	79	10,9941
38	11,1267	80	10,9737
39	11,1474	81	10,9590
40	11,1445	82	10,9430
41	11,1173	83	10,9477
42	11,1425	84	11,4000

Fonte: Elaborado pela autora.

APÊNDICE B – Dados e figuras dos sistemas usados nos testes

Neste anexo são apresentados os dados e figuras de sistema de 14, 33 e 84 barras utilizado em testes.

B.1 Sistema de 14 barras

Os dados do sistema de 14 barras são descritos na Tabela 25 e Tabela 26.

- Barra da subestação: 14;
- Tensão na subestação (tensão base): 23,00 kV;
- Potência base: 100000 kVA

Tabela 25 – Dados de ramos do sistema de 14 barras

Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [%]	Reatância [%]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [%]	Reatância [%]
1	14	13	7,5000	10,0000	9	8	5	8,0000	11,0000
2	13	12	8,0000	11,0000	10	14	4	11,0000	11,0000
3	13	11	9,0000	18,0000	11	4	3	9,0000	12,0000
4	11	10	4,0000	4,0000	12	4	2	8,0000	11,0000
5	14	9	11,0000	11,0000	13	2	1	4,0000	4,0000
6	9	8	8,0000	11,0000	14	12	6	4,0000	4,0000
7	9	7	11,0000	11,0000	15	7	3	4,0000	4,0000
8	8	6	11,0000	11,0000	16	10	1	9,0000	12,0000

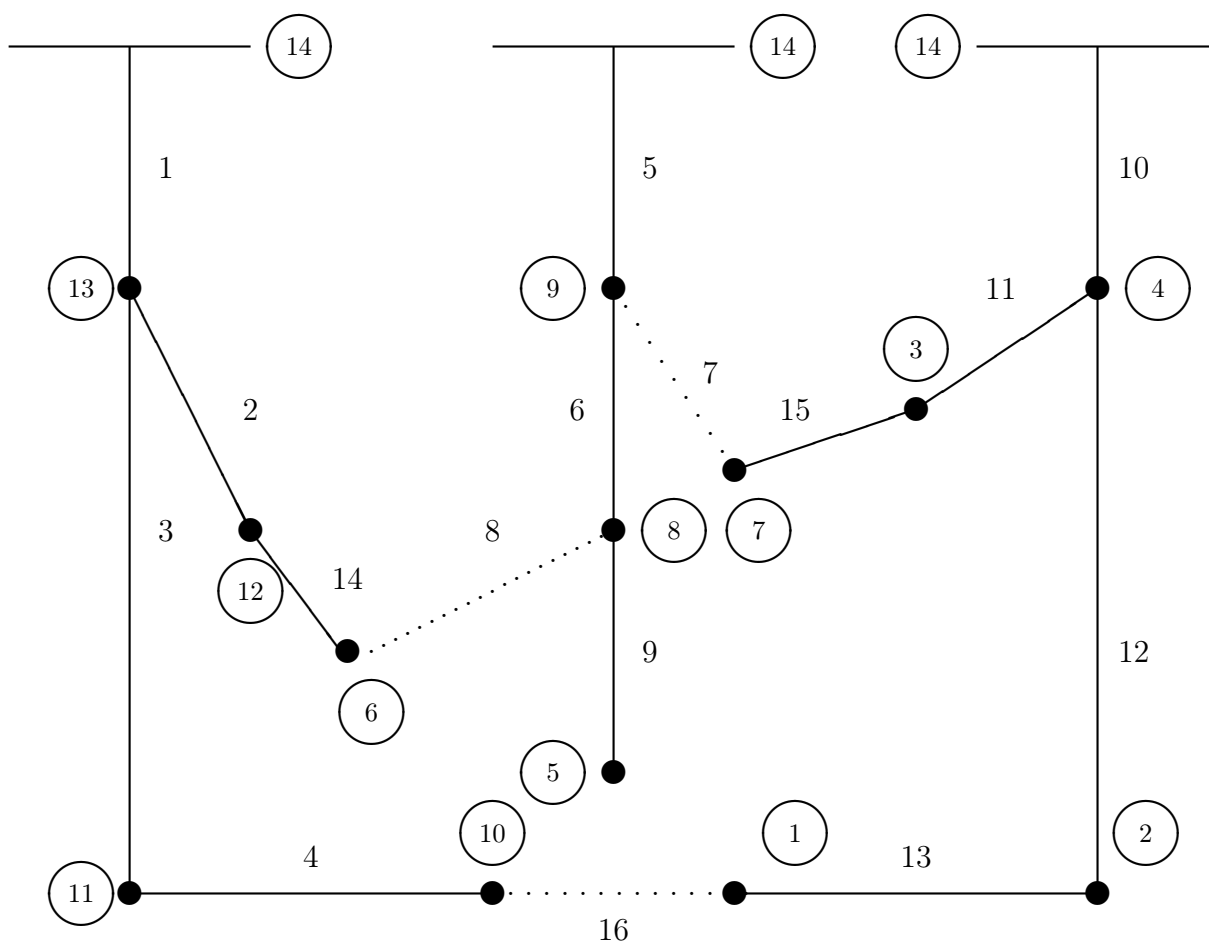
Fonte: Civanlar et al. (1988).

Tabela 26 – Dados de barras do sistema de 14 barras

Barra	Demanda ativa [kW]	demanda reativa [kVAr]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	2100,00	-800,00	8	5000,00	1800,00
2	1000,00	900,00	9	4000,00	2700,00
3	1000,00	-1100,00	10	1500,00	1200,00
4	1000,00	900,00	11	2000,00	-400,00
5	4500,00	-1700,00	12	3000,00	400,00
6	600,00	-500,00	13	2000,00	1600,00
7	1000,00	900,00	14	0,00	0,00

Fonte: Civanlar et al. (1988).

Figura 11 – Topologia base do sistema de 14 barras



Fonte: Civanlar et al. (1988).

B.2 Sistema de 33 barras

Os dados do sistema de 33 barras são descritos na Tabela 27 e Tabela 28.

- Barra da subestação: 1;
- Tensão na subestação (tensão base): 12,66 kV;
- Potência base: 1000 kVA

Tabela 27 – Dados de ramos do sistema de 33 barras

Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]
1	1	2	0,0922	0,0470	20	20	21	0,4095	0,4784
2	2	3	0,4930	0,2511	21	21	22	0,7089	0,9373
3	3	4	0,3660	0,1864	22	3	23	0,4512	0,3083
4	4	5	0,3811	0,1941	23	23	24	0,8980	0,7091
5	5	6	0,8190	0,7070	24	24	25	0,8960	0,7011
6	6	7	0,1872	0,6188	25	6	26	0,2030	0,1034
7	7	8	0,7114	0,2351	26	26	27	0,2842	0,1447
8	8	9	1,0300	0,7400	27	27	28	1,0590	0,9337
9	9	10	1,0440	0,7400	28	28	29	0,8042	0,7006
10	10	11	0,1966	0,0650	29	29	30	0,5075	0,2585
11	11	12	0,3744	0,1238	30	30	31	0,9744	0,9630
12	12	13	1,4680	1,1550	31	31	32	0,3105	0,3619
13	13	14	0,5416	0,7129	32	32	33	0,3410	0,5302
14	14	15	0,5910	0,5260	33	8	21	2,0000	2,0000
15	15	16	0,7463	0,5450	34	9	15	2,0000	2,0000
16	16	17	1,2890	1,7210	35	12	22	2,0000	2,0000
17	17	18	0,7320	0,5740	36	18	33	0,5000	0,5000
18	2	19	0,1640	0,1565	37	25	29	0,5000	10,5000
19	19	20	1,5042	1,3554					

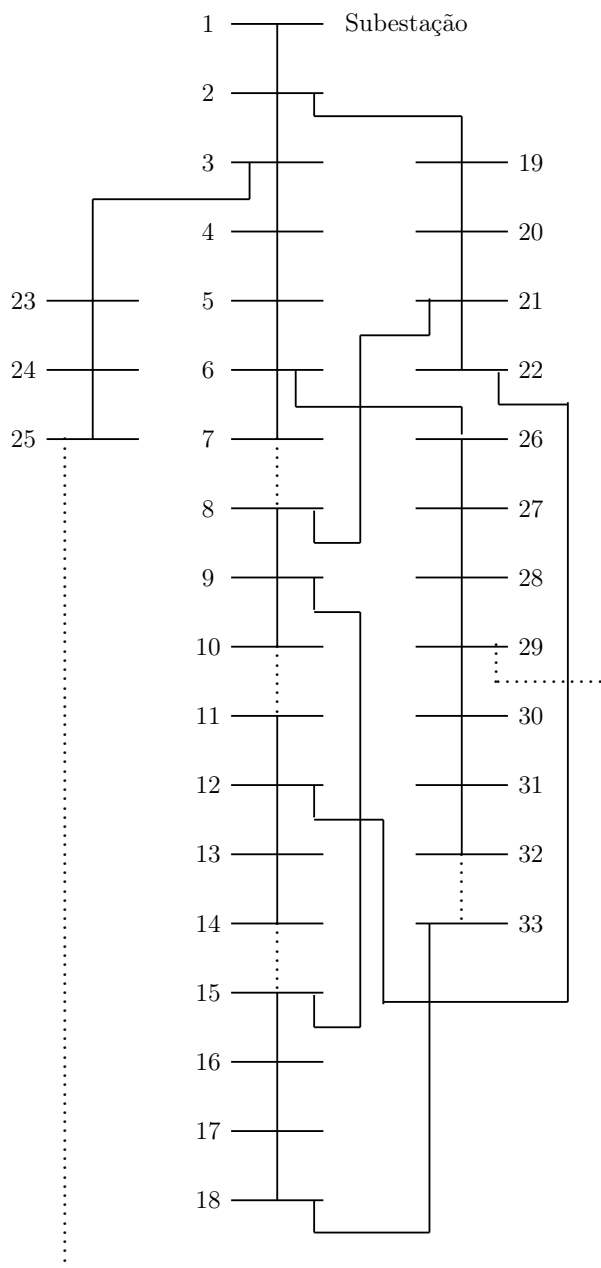
Fonte: Fonte: Baran e Wu (1989).

Tabela 28 – Dados de barras do sistema de 33 barras

Barra	Demanda ativa [kW]	demanda reativa [kVAr]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	0,00	0,00	18	90,00	40,00
2	100,00	60,00	19	90,00	40,00
3	90,00	40,00	20	90,00	40,00
4	120,00	80,00	21	90,00	40,00
5	60,00	30,00	22	90,00	40,00
6	60,00	20,00	23	90,00	50,00
7	200,00	100,00	24	420,00	200,00
8	200,00	100,00	25	420,00	200,00
9	60,00	20,00	26	60,00	25,00
10	60,00	20,00	27	60,00	25,00
11	45,00	30,00	28	60,00	20,00
12	60,00	35,00	29	120,00	70,00
13	60,00	35,00	30	200,00	600,00
14	120,00	80,00	31	150,00	70,00
15	60,00	10,00	32	210,00	100,00
16	60,00	20,00	33	60,00	40,00
17	60,00	20,00			

Fonte: Baran e Wu (1989).

Figura 12 – Topologia base do sistema de 33 barras



Fonte: Baran e Wu (1989).

B.3 Sistema de 84 barras

Os dados do sistema de 84 barras são descritos na Tabela 29 e Tabela 30.

- Barra da subestação: 84;
- Tensão na subestação (tensão base): 11,40 kV;
- Potência base: 10000 kVA

Tabela 29 – Dados de ramos do sistema de 84 barras

Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]	Ramo	Barra inicial	Barra final	Resistência [p.u.]	Reatância [p.u.]
1	1	84	0,1944	0,6624	49	48	49	0,0655	0,1345
2	1	2	0,2096	0,4304	50	49	50	0,0393	0,0807
3	2	3	0,2358	0,4842	51	50	51	0,0786	0,1614
4	3	4	0,0917	0,1883	52	51	52	0,0393	0,0807
5	4	5	0,2096	0,4304	53	52	53	0,0786	0,1614
6	5	6	0,0393	0,0807	54	53	54	0,0524	0,1076
7	6	7	0,0405	0,1380	55	54	55	0,1310	0,2690
8	7	8	0,1048	0,2152	56	56	84	0,2268	0,7728
9	7	9	0,2358	0,4842	57	56	57	0,5371	1,1029
10	7	10	0,1048	0,2152	58	57	58	0,0524	0,1076
11	11	84	0,0789	0,1614	59	58	59	0,0405	0,1380
12	11	12	0,3406	0,6944	60	59	60	0,0393	0,0807
13	12	13	0,0262	0,0538	61	60	61	0,0262	0,0538
14	12	14	0,0786	0,1614	62	61	62	0,1048	0,2152
15	15	84	0,1134	0,3864	63	62	63	0,2358	0,4842
16	15	16	0,0524	0,1076	64	63	64	0,0243	0,0828
17	16	17	0,0524	0,1076	65	65	84	0,0486	0,1656
18	17	18	0,1572	0,3228	66	65	66	0,1703	0,3497
19	18	19	0,0393	0,0807	67	66	67	0,1215	0,4140
20	19	20	0,1703	0,3497	68	67	68	0,2187	0,7452
21	20	21	0,2358	0,4842	69	68	69	0,0486	0,1656
22	21	22	0,1572	0,3228	70	69	70	0,0729	0,2484
23	21	23	0,1965	0,4035	71	70	71	0,0567	0,1932
24	23	24	0,1310	0,2690	72	71	72	0,0262	0,0528
25	25	84	0,0567	0,1932	73	73	84	0,3240	1,1040
26	25	26	0,1048	0,2152	74	73	74	0,0324	0,1104
27	26	27	0,2489	0,5111	75	74	75	0,0567	0,1932
28	27	28	0,0486	0,1656	76	75	76	0,0486	0,1656
29	28	29	0,1310	0,2690	77	77	84	0,2511	0,8556
30	30	84	0,1965	0,3960	78	77	78	0,1296	0,4416
31	30	31	0,1310	0,2690	79	78	79	0,0486	0,1656
32	31	32	0,1310	0,2690	80	79	80	0,1310	0,2640
33	32	33	0,0262	0,0538	81	80	81	0,1310	0,2640
34	33	34	0,1703	0,3497	82	81	82	0,0917	0,1883
35	34	35	0,0524	0,1076	83	82	83	0,3144	0,6456
36	35	36	0,4978	1,0222	84	5	55	0,1310	0,2690
37	36	37	0,0393	0,0807	85	7	60	0,1310	0,2690
38	37	38	0,0393	0,0807	86	11	43	0,1310	0,2690
39	38	39	0,0786	0,1614	87	12	72	0,3406	0,6994
40	39	40	0,2096	0,4304	88	13	76	0,4585	0,9415
41	38	41	0,1965	0,4035	89	14	18	0,5371	1,0824
42	41	42	0,2096	0,4304	90	16	26	0,0917	0,1883
43	43	84	0,0486	0,1656	91	20	83	0,0786	0,1614
44	43	44	0,0393	0,0807	92	28	32	0,0524	0,1076
45	44	45	0,1310	0,2690	93	29	39	0,0786	0,1614
46	45	46	0,2358	0,4842	94	34	46	0,0262	0,0538
47	47	84	0,2430	0,8280	95	40	42	0,1965	0,4035
48	47	48	0,0655	0,1345	96	53	64	0,0393	0,0807

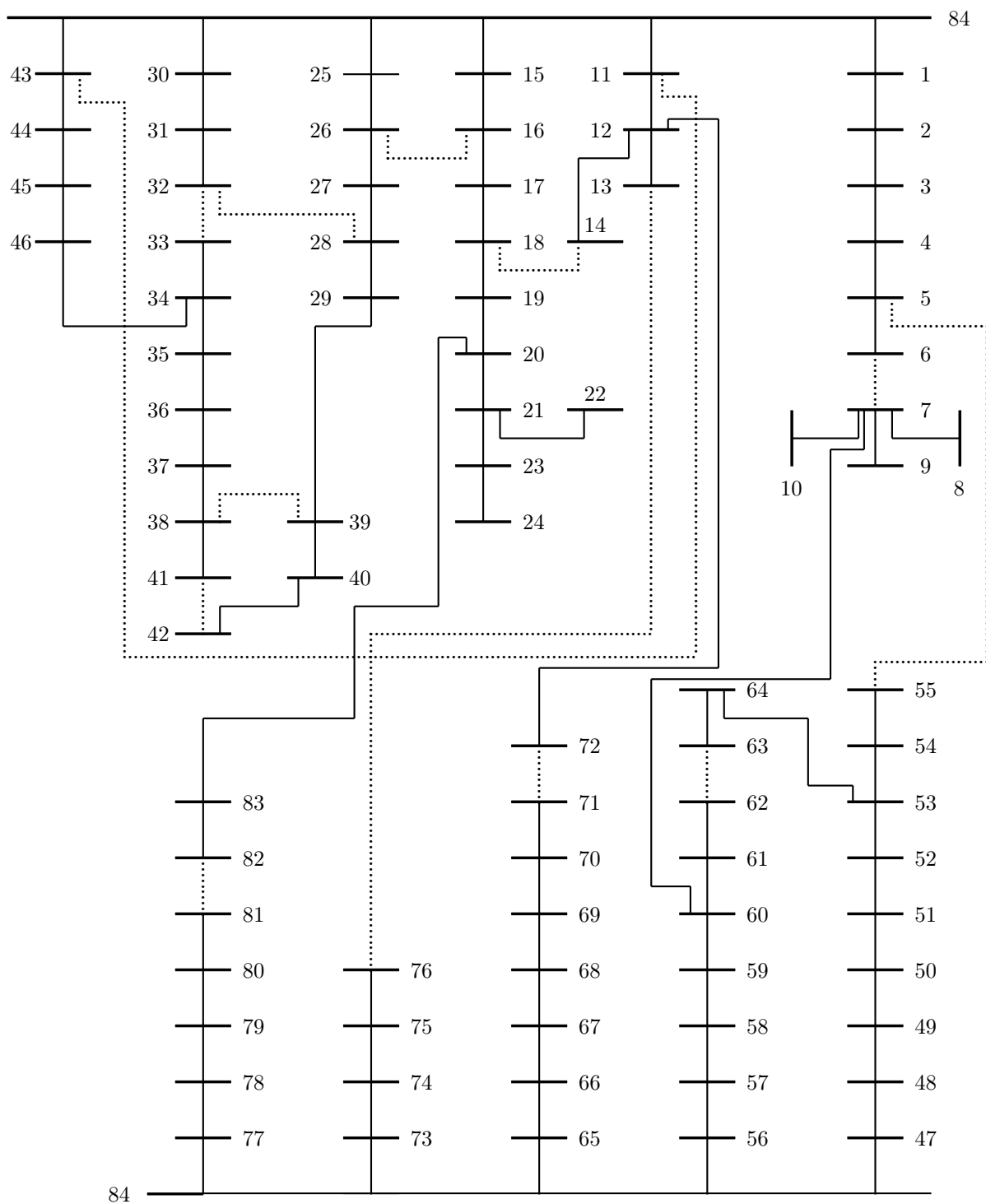
Fonte: Chiou et al. (2005).

Tabela 30 – Dados de barras do sistema de 84 barras

Barra	Demanda ativa [kW]	demanda reativa [kVAr]	Barra	Demanda ativa [kW]	Demanda reativa [kVAr]
1	0,00	0,00	43	0,00	0,00
2	100,00	50,00	44	30,00	20,00
3	300,00	200,00	45	800,00	700,00
4	350,00	250,00	46	200,00	150,00
5	220,00	100,00	47	0,00	0,00
6	1100,00	800,00	48	0,00	0,00
7	400,00	320,00	49	0,00	0,00
8	300,00	200,00	50	200,00	160,00
9	300,00	230,00	51	800,00	600,00
10	300,00	260,00	52	500,00	300,00
11	0,90	0,00	53	500,00	350,00
12	1200,00	800,00	54	500,00	300,00
13	800,00	600,00	55	200,00	80,00
14	700,00	500,00	56	0,00	0,00
15	0,00	0,00	57	30,00	20,00
16	300,00	150,00	58	600,00	420,00
17	500,00	350,00	59	0,00	0,00
18	700,00	400,00	60	20,00	10,00
19	1200,00	1000,00	61	20,00	10,00
20	300,00	300,00	62	200,00	130,00
21	400,00	350,00	63	300,00	240,00
22	50,00	20,00	64	300,00	200,00
23	50,00	20,00	65	0,00	0,00
24	50,00	10,00	66	50,00	30,00
25	50,00	30,00	67	0,00	0,00
26	100,00	60,00	68	400,00	360,00
27	100,00	70,00	69	0,00	0,00
28	1800,00	1300,00	70	0,00	0,00
29	200,00	120,00	71	2000,00	1500,00
30	0,00	0,00	72	200,00	150,00
31	1800,00	1600,00	73	0,00	0,00
32	200,00	150,00	74	0,00	0,00
33	200,00	100,00	75	1200,00	950,00
34	800,00	600,00	76	300,00	180,00
35	100,00	60,00	77	0,00	0,00
36	100,00	60,00	78	400,00	360,00
37	20,00	10,00	79	2000,00	1300,00
38	20,00	10,00	80	200,00	140,00
39	20,00	10,00	81	500,00	360,00
40	20,00	10,00	82	100,00	30,00
41	200,00	160,00	83	400,00	360,00
42	50,00	30,00	84	0,00	0,00

Fonte: Chiou et al. (2005).

Figura 13 – Topologia base do sistema de 84 barras



Fonte: Chiou et al. (2005)