

Universidade Federal de Juiz de Fora
Engenharia Elétrica
Departamento de Energia

Taís Lacerda Oliveira Araújo

**MÉTODO HÍBRIDO DE OTIMIZAÇÃO PARA A RECONFIGURAÇÃO
DO SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Juiz de Fora
2017

Taís Lacerda Oliveira Araújo

**MÉTODO HÍBRIDO DE OTIMIZAÇÃO PARA A RECONFIGURAÇÃO
DO SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Relatório final apresentada à Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Eletricista

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Coorientador: Saulo Custódio de Aquino Ferreira

Juiz de Fora

2017

Araújo, Taís.

MÉTODO HÍBRIDO DE OTIMIZAÇÃO PARA A RECONFIGURAÇÃO DO SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA / Taís Lacerda Oliveira Araújo. – 2017.

42 f. : il.

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira

Coorientador: Saulo Custódio de Aquino Ferreira

Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal de Juiz de Fora, Engenharia Elétrica. Departamento de Energia, 2017.

1. Reconfiguração do sistema de distribuição. 2. Método híbrido. 3. Metaheurística. I. de Oliveira, Leonardo Willer de Oliveira, orient. II. Ferreira, Saulo Cutódio de Aquino Ferreira, coorient.

Taís Lacerda Oliveira Araújo

**MÉTODO HÍBRIDO DE OTIMIZAÇÃO PARA A RECONFIGURAÇÃO
DO SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Relatório final apresentada à Universidade Federal de Juiz de Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheira Eletricista

Aprovada em: 29 de Junho de 2017

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Willer de Oliveira - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Eng. Saulo Custódio de Aquino Ferreira -
Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Professor Dr. Edimar José de Oliveira
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, pelo dom da vida, pela sabedoria dada e pela força concedida para lutar nos momentos que foram mais difíceis.

Agradeço também aos meus pais, Jorge e Lúcia, pois sem o esforço, companheirismo e dedicação deles não seria possível obter essa conquista. Obrigado por me apoiarem, vocês sempre serão meus exemplos de determinação.

A minha irmã, Charleny, pelas palavras de carinho, pela compreensão de sempre me ouvir e pelo incentivo dado para que este sonho tornasse realidade.

Ao meu irmão, Tiago, aos meus sobrinhos e familiares obrigado pelo apoio contínuo ao longo desta jornada.

Ao Guilherme, pelo carinho e compreensão durante os bons e maus momentos.

Ao professor e orientador Leonardo Willer, pelo apoio, dedicação, paciência e pelo conhecimento passado ao longo de toda a graduação e pesquisas.

Aos professores da Faculdade de Engenharia que contribuíram para minha formação acadêmica.

A todos os meus amigos, pelo companheirismo, conversas e troca contínua de conhecimentos. Vocês foram essenciais durante estes anos de convivência.

Agradeço a todos que torceram para que este sonho se tornasse realidade.

“Saiba que, desta vida só levaremos os conhecimentos adquiridos e as relações vivas.”
(C.L.O.A.)

RESUMO

Resumo da Monografia apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheira Eletricista.

Método Híbrido de Otimização para a Reconfiguração do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

Taís Lacerda Oliveira Araújo

Junho, 2017

Orientador: Leonardo Willer de Oliveira.

O objetivo da presente monografia de final de curso é aplicar uma metodologia de otimização meta-heurística bioinspirada híbrida ao problema de reconfiguração de redes radiais de distribuição de energia elétrica. A reconfiguração visa ao objetivo clássico de minimização de perdas técnicas por efeito Joule nos trechos de alimentadores de redes elétricas de distribuição. A metodologia baseia-se na hibridização entre as técnicas conhecidas na literatura como *Big Bang-Big Crunch* e *Enxame de Partículas*, a fim de conciliar os requisitos de exploração local e global destes métodos em uma abordagem única. Restrições importantes são consideradas, como as elétricas de rede, operacionais e topológicas, envolvendo a manutenção de configuração radial e conexa. Três estudos de casos com sistemas conhecidos na literatura são realizados para avaliar o método e concluir sobre as vantagens da hibridização em relação à aplicação isolada de meta-heurísticas.

Palavras-chave: Reconfiguração. Sistemas de distribuição. Método híbrido. Metaheurística.

ABSTRACT

Abstract of the Monograph presented to the UFJF as a partial fulfilment of the requirements for the title of Electrical Engineer.

Hybrid Optimization Method for the Reconfiguration of the Electric Power Distribution System

Taís Lacerda Oliveira Araújo

June, 2017

Supervisor: Leonardo Willer de Oliveira.

The objective of this document is to present a new methodology for obtaining new radial configurations for the Electric Power Distribution Systems (EPD). This new configuration is intended to optimize such energy system by minimizing total active losses. It is proposed to use a hybrid algorithm, composed by the algorithms *Big Bang-Big Crush* and *PSO - Composed by the algorithms*, as a solution method for the EPD reconfiguration problem. The problem presents network and operational constraints, such as the radial and connected structure of the network and the operational limits of nodal tension. Three case studies with systems known in the literature are performed to prove the efficiency of the method and to conclude on the relationship between the proposed objective.

Key-words: Reconfiguration of distribution systems. Hybrid method. Metaheuristics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Perdas Totais de Energia - Cemig.	12
Figura 2 – Perdas Totais de Energia - Energisa.	12
Figura 3 – Representação passo a passo do Método Híbrido.	22
Figura 4 – Sistema exemplo de 2 barras.	24
Figura 5 – Sistema Exemplo de 5 barras.	26
Figura 6 – Solução Contínua do Sistema de 5 barras.	26
Figura 7 – Solução Binária do Sistema de 6 barras.	27
Figura 8 – Topologia Final do Sistema Exemplo.	27
Figura 9 – Sistema de 16 barras [23] - Topologia Inicial.	30
Figura 10 – Solução Ótima do Sistema 16 barras.	31
Figura 11 – Topologia Final do Sistema 16 barras.	31
Figura 12 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP.	32
Figura 13 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP-BBBC.	32
Figura 14 – Sistema 33 barras Figura 14 - Topologia Inicial.	33
Figura 15 – Solução Ótima do Sistema 33 barras.	34
Figura 16 – Topologia do Final do Sistema 33 barras.	34
Figura 17 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP.	35
Figura 18 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP-BBBC.	35
Figura 19 – Topologia Inicial do Sistema 69 barras.	36
Figura 20 – Solução Ótima do Sistema 69 barras.	36
Figura 21 – Topologia Final do Sistema 69 barras.	37
Figura 22 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP.	38
Figura 23 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP-BBBC.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perdas de energia de 2014 em algumas distribuidoras do Brasil.	11
Tabela 2 – Indentificação de cada termo relacionado ao EP.	20
Tabela 3 – Resultados Obtidos para a Reconfiguração do Sistema 16 barras.	32
Tabela 4 – Resultados Obtidos para a Reconfiguração do Sistema 33 barras.	34
Tabela 5 – Resultados Obtidos para a Reconfiguração do Sistema 69 barras.	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AG	Algoritmo Genético
BBBC	<i>Big Bang-Big Cruch</i>
SDE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SIA	Sistemas Imunológicos Artificiais
EP	Enxame de Partículas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	11
1.2	DESAFIOS E CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA	14
1.3	JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO	14
1.4	OBJETIVO DO TRABALHO	15
1.5	PUBLICAÇÕES DECORRENTES	15
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS A RECONFI- GURAÇÃO	17
2.1	INTRODUÇÃO	17
2.2	MÉTODOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO	18
2.3	MÉTODO BIG BANG-BIG CRUNCH	18
2.4	MÉTODO ENXAME DE PARTÍCULAS (EP)	19
2.5	MÉTODO HÍBRIDO EP-BBBC	21
2.6	CONCLUSÕES PARCIAIS	22
3	MODELAGEM PROPOSTA	24
3.1	INTRODUÇÃO	24
3.2	FORMULAÇÃO PARA O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	24
3.3	MODELAGEM DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO	25
3.3.1	TRATAMENTO DA RADIALIDADE E CONECTIVIDADE	27
3.4	CONCLUSÕES PARCIAIS	29
4	ESTUDOS DE CASOS	30
4.1	INTRODUÇÃO	30
4.2	SISTEMA 16 BARRAS	30
4.3	SISTEMA 33 BARRAS	33
4.4	SISTEMA 69 BARRAS	36
4.5	CONCLUSÕES PARCIAIS	37
5	CONCLUSÃO	39
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	39
5.2	SUGESTÕES FUTURAS	39
	REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O mercado de energia elétrica vem se tornando cada vez mais exigente e assim, a regulação do serviço de distribuição de energia tem evoluído no sentido de incentivo às concessionárias para esforços contínuos visando melhoria na qualidade do serviço de fornecimento de eletricidade ao consumidor final. A qualificação do fornecimento de energia é primordial para cada cliente, como os comerciais e industriais, cujas atividades de produção e comercialização requerem confiabilidade no suprimento do insumo energético. Quanto aos consumidores residenciais, estes dependem da energia entregue em suas casas para suas necessidades básicas [1]. Mas, historicamente, as empresas de eletricidade, principalmente as distribuidoras de energia elétrica, são sujeitas a perdas técnicas e não-técnicas, que causam prejuízos de bilhões de reais e afetam a qualidade do serviço de fornecimento do produto energia elétrica.

A Tabela 1 apresenta as perdas percentuais de energia, técnicas e não-técnicas, de algumas das principais distribuidoras brasileiras, apuradas no ano de 2014. Estes dados foram disponibilizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2016.

Tabela 1 – Perdas de energia de 2014 em algumas distribuidoras do Brasil.

Empresas	Perdas Técnicas	Perdas não Técnicas
AME	1,44%	37,45%
BANDEIRANTES	5,54%	3,94%
CEMAR	9,39%	8,02%
CEMIG	10,28%	1,55%
COSERN	8,54%	1,66%
CPFL-Paulista	5,90%	3,30%
CPFL-Piratininga	4,29%	2,08%
ELEKTRO	6,35%	0,23%
EMG	9,62%	0,00%
ENERGSUL	9,17%	5,90%
EPB	9,73%	2,60%
ESCELSA	7,58%	6,86%

As perdas registradas pelas distribuidoras de energia elétrica, tanto técnicas como não-técnicas, permanecem como um problema de difícil solução. As Figuras 1 e 2 apresentam, em forma de gráficos, as perdas técnicas de energia de duas das principais distribuidoras de energia elétrica do estado de Minas Gerais [2] e [3]. Com os gráficos apresentados, observa-se a variação destas perdas. Este cenário provoca debates e busca por soluções, constituindo um desafio para as empresas do setor.

Diversos estudos e pesquisas já comprovaram que o País perde uma enorme quantidade de energia elétrica, que poderia ser aproveitada para o seu desenvolvimento. Segundo dados do estudo “O Setor Elétrico Brasileiro e a Sustentabilidade no Século 21: Oportu-

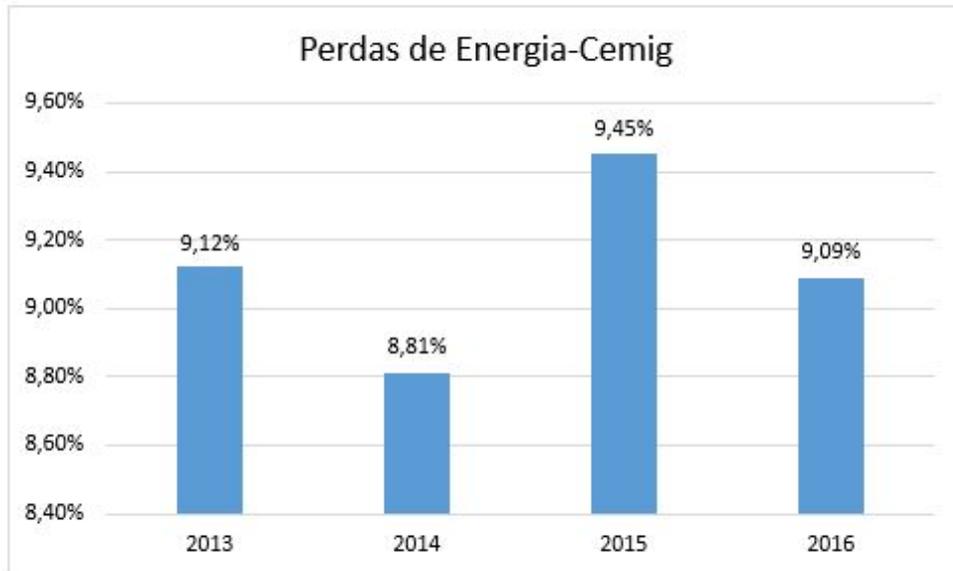


Figura 1 – Perdas Totais de Energia - Cemig.

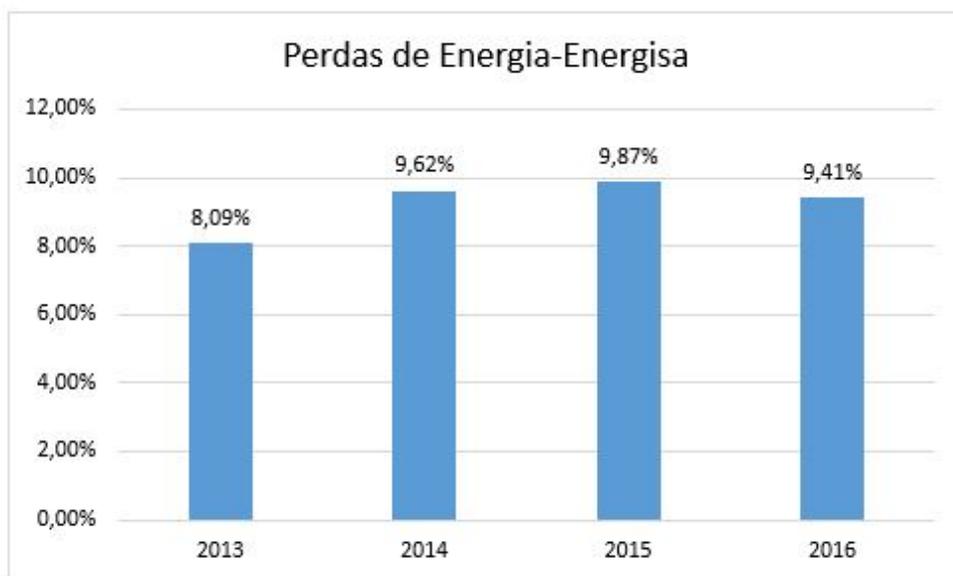


Figura 2 – Perdas Totais de Energia - Energisa.

nidades e Desafios”, de autoria da Iniciativa sobre Alternativas de Política para o Setor Elétrico no Brasil, lançado em 2012, um quinto da energia produzida no País é desperdiçada durante a transmissão até os centros de consumo, o que gera aumento de até 5% na tarifa média paga pelo consumidor.

Tanto as perdas não-técnicas, onde se encaixam os furtos, as fraudes e os problemas de medição e faturamento, como as perdas técnicas, aquelas relacionadas ao processo de distribuição de energia elétrica, onde parte da energia é dissipada na forma de calor devido ao efeito Joule, são inevitáveis, mas podem ser minimizadas. Para tanto, as concessionárias investem em ações de combate ao furto de energia e de modernização tecnológica de suas

redes [4].

Essas modernas tecnologias proporcionam maior flexibilidade operacional e consequentemente permitem maior qualificação na entrega de energia, com melhora da confiabilidade. Com o desenvolvimento tecnológico, o requisito confiabilidade pode ser melhor atendido, juntamente com o critério econômico, conforme prerrogativa da ANEEL no Módulo 2 dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), observando tanto as restrições de carga como as operacionais. Uma vez que o sistema está operando em suas condições normais, deseja-se a máxima eficiência possível no transporte de energia com razoabilidade de custos segundo o PRODIST. Para se obter tais resultados, é importante operar o sistema com perdas mínimas [4].

Umas das alternativas mais investigadas para se minimizar perdas técnicas consiste na reconfiguração das redes elétricas de distribuição de energia. Essa opção é uma das mais atrativas, pois consiste no planejamento da operação ótima de ativos já incluídos nas redes. Portanto, a reconfiguração pode proporcionar a operação do sistema elétrico com o menor desperdício de energia [5]. A opção de reconfiguração pode ser considerada no portfólio para o planejamento e/ou controle em tempo real da operação do sistema. No planejamento da operação, buscam-se configurações com vistas a obter uma estratégia ótima para a topologia de rede, com minimização de perdas, atendimento da demanda diária com boa qualidade de serviço (perfil adequado do módulo das tensões e confiabilidade), além da redução dos custos operativos [6].

Em geral, pode-se dizer que o problema de reconfiguração de redes de distribuição baseia-se na definição dos estados (aberto ou fechado) dos dispositivos de manobra, envolvendo chaves de seccionamento (normalmente fechadas - NF) e de interconexão (normalmente abertas - NA). A condição de radialidade da rede deve ser mantida, visto que embora o sistema de distribuição seja estruturalmente malhado, opera de forma radial para fins de simplicidade da operação e da proteção. Ou seja, a configuração em malha dificulta o planejamento e a operação do sistema, ao passo que a operação radial facilita a coordenação da proteção, porém com menor confiabilidade. Com intuito de melhorar este requisito, chaves manobráveis, muitas vezes automatizadas, são utilizadas, cujos estados são definidos pela reconfiguração.

Em síntese, a reconfiguração consiste na busca de uma estratégia ótima de operação que possa minimizar as perdas nos alimentadores e também proporcionar um balanceamento adequado das cargas no sistema, considerando-se aspectos de confiabilidade da proteção e da qualidade de fornecimento de energia entregue aos consumidores.

1.2 DESAFIOS E CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA

A reconfiguração de redes de distribuição consiste em um problema de programação não linear inteira mista, que caracteriza-se pela explosão combinatória devido à grande dimensão do espaço de busca por possíveis soluções para sistemas de médio e grande porte. Sua resolução através de problemas matemáticos clássicos é difícil devido a estas características, porém se trata de um ambiente propício para a aplicação de técnicas de otimização heurísticas e metaheurísticas. Essas duas classes de métodos são aproximados, ou seja, não se pode garantir que a solução encontrada seja a melhor solução possível, ou a solução global para o problema, porém, permitem encontrar boas soluções com tempos viáveis para os requisitos dos sistemas gerenciadores de energia [6]. Devido ao grande espaço de busca, técnicas metaheurísticas, como algoritmos genéticos, enxame de partículas e sistemas imunológicos artificiais, vêm ganhando espaço, pois promovem uma varredura eficiente do espaço de busca sem percorrê-lo em sua totalidade.

Além da dificuldade na obtenção de boas soluções devido à sua natureza combinatorial, a reconfiguração também apresenta dificuldade na formulação matemática de certas restrições, como a radialidade e a conectividade da rede elétrica. Portanto, a observância desta restrição é complexa, com a rede elétrica podendo ser representada por um grafo. Além da restrição de radialidade, tem-se também o problema das variáveis inteiras e contínuas, devido à característica discreta dos estados de chaves manobráveis (aberto ou fechado) e contínua das variáveis de estado, como as tensões nodais, o que lhe atribui a característica de programação inteira mista e de difícil tratamento [6].

1.3 JUSTIFICATIVA E MOTIVAÇÃO

A importância do problema de reconfiguração para melhoria de eficiência do serviço de distribuição de energia elétrica, e o elevado número de opções topológicas possíveis, aliado à dificuldade de resolução em função de suas características, serviu como motivação que justifica o tema da presente monografia de final de curso. Com elevados espaços de busca, métodos não computacionais requerem grandes esforços para a produção das alternativas, são totalmente dependentes da experiência dos engenheiros de planejamento, incorrem no risco de não considerar a melhor alternativa e são podem se limitar a redes de menor porte [7].

Entretanto, mesmo com o surgimento de novas ferramentas computacionais, somente um número reduzido de alternativas deve ser analisado na prática devido ao tempo limitado para o planejamento e à dificuldade de se analisar todas as alternativas possíveis de maneira ótima, considerando-se os objetivos do problema. No caso da operação, estes tempos são ainda mais reduzidos. Portanto, a reconfiguração de redes de distribuição de energia tem sido uma opção atrativa para tratar problemas relacionados com SDE, como redução de

perdas técnicas ao longo da cadeia de produção-transporte-consumo de energia elétrica, balanceamento de cargas entre alimentadores e aumento das margens de estabilidade de tensão [8].

1.4 OBJETIVO DO TRABALHO

Observando a necessidade e a importância de um planejamento de SDE, aliados a uma operação eficiente com perdas mínimas de energia, o objetivo do presente trabalho consiste em desenvolver uma metodologia para resolver o problema de redução de perdas técnicas através de reconfiguração de redes radiais de distribuição. Para resolver este problema, utiliza-se um método híbrido composto pela combinação das técnicas de otimização por *Enxame de Partículas* e *Big Bang-Big Crunch*, que visa à melhoria de processos de busca por espaços de solução em relação ao desempenho individual de cada metaheurística.

1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES

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

Além disto, outros dois trabalhos também foram aceitos nos seguintes eventos:

- Ferreira, S. C. A.; Araújo, T. L. O.; Carvalho, J. S.; Oliveira, L. W. e Oliveira, E. J. 2017. Reconfiguração de Sistemas de Distribuição via Técnica de Decomposição. XLIX SBPO, Blumenau, SOBRAPO.
- Ferreira, S. C. A.; Araújo, T. L. O.; Carvalho, J. S.; Oliveira, L. W. e Oliveira, E. J. 2017. Reconfiguration of Distribution Systems for Feeder Balancing Through Decomposition Techniques. XII CLAGTEE, Mar Del Plata.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido em 5 capítulos. No Capítulo 1, são apresentadas considerações iniciais, abordando uma breve contextualização do problema, os desafios, a motivação e o objetivo do trabalho.

O segundo capítulo apresenta os métodos híbridos aplicados para a reconfiguração de SDE.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia utilizada para a formulação do problema proposto.

No quarto capítulo, são realizados estudos de casos referentes a sistemas conhecidos na literatura, onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos mediante a aplicação da metodologia proposta.

No quinto capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas do desenvolvimento deste trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

2 TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO APLICADAS A RECONFIGURAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

Em matemática, o termo otimização, ou programação matemática, refere-se ao estudo de problemas em que se busca minimizar ou maximizar alguma(s) função(ões) objetivo sujeito a um conjunto de restrições, através da escolha sistemática dos valores de variáveis reais ou inteiras dentro de um conjunto viável [9].

Os problemas de otimização podem ser classificados basicamente em dois métodos: os determinísticos (métodos clássicos) e não-determinísticos. Os modelos ditos determinísticos sempre retornam o mesmo resultado quando são executados com o uso de um conjunto específico de valores de entrada e recebem o mesmo banco de dados. São baseados nos cálculos de derivadas de primeira e segunda ordem, ou de uma aproximação dessas derivadas. Possuem como limitações [9] e [10]:

- Dificuldades em identificar soluções ótimas globais, pois são dependentes do ponto de partida;
- Dificuldade de trabalhar com variáveis discretas;
- Dificuldade de operar com funções não diferenciáveis;
- Necessidade de que a função objetivo seja contínua e diferenciável no espaço de busca.

Os modelos ditos não determinísticos podem retornar resultados diferentes cada vez que são chamados com um conjunto específico de valores de entrada, mesmo que o estado do banco de dados que eles acessam permaneça o mesmo. Alguns destes modelos procuram emular fenômenos ou processos encontrados na natureza, ou seja, são compostos por um conjunto de regras e métodos que conduzem à resolução relativamente rápida de problemas complexos, mas não asseguram que a solução encontrada seja a melhor. Com isso, obtêm-se ganhos em termos de eficiência computacional em detrimento da precisão das respostas alcançadas. Estes métodos utilizam-se somente da avaliação da função objetivo e introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos, além de não empregar o cálculo de derivadas, mas sim atuar diretamente na busca de soluções no espaço viável [10].

Em problemas de reconfiguração, devido à natureza discreta (chave aberta ou fechada) e à possibilidade de explosão combinatorial inerente ao modelo, a resolução do mesmo por técnicas de otimização determinística torna-se pouco atraente, dando espaço para algoritmos não-determinísticos baseados em heurísticas ou meta-heurísticas. Como exemplo, tem-se o método BBBC, utilizado no presente trabalho para resolver o problema

de reconfiguração de SDE juntamente com o método de busca local por Enxame de Partículas (EP) [11].

2.2 MÉTODOS HÍBRIDOS DE OTIMIZAÇÃO

Os métodos heurísticos e meta-heurísticos de otimização, ou métodos naturais, se definem pela busca da solução ótima através de regras de probabilidade aleatória. Tais métodos utilizam apenas as informações da função objetivo, não necessitando de informações sobre suas derivadas ou possíveis descontinuidades [12]. Entre estes métodos, os resultantes de hibridização de algoritmos de busca local com heurísticos de otimização mostram-se mais eficientes. Frequentemente, é retratada na literatura a capacidade de tais métodos em escapar de bacias de atração de mínimos locais, ainda retendo boa eficiência computacional [13].

Um método híbrido tende a aliar estratégias de busca global, para excursionamento amplo do espaço de soluções, porém não completo, com busca local, para intensificar a varredura em regiões mais promissoras. Normalmente, um dos métodos de uma hibridização promove a busca local. Como resultado, a população tende a ser melhorada para ser realimentada no algoritmo heurístico até que o critério de terminação do mesmo seja alcançado [15].

Tais métodos híbridos, ao invés de apresentarem operadores ou representações padrão, incorporam o conhecimento do problema a resolver por parte do usuário, de forma a produzir soluções melhores e produzi-las ainda mais rapidamente. Mesmo sendo menos genéricos e de implementação um pouco mais sofisticada, sua utilização em problemas reais, ou de dimensões maiores, vêm se mostrando bem mais eficiente, compensando suas possíveis desvantagens [14].

2.3 MÉTODO BIG BANG-BIG CRUNCH

A técnica meta-heurística Big Bang-Big Crunch é baseada em uma das teorias da evolução do universo, e tem sido investigada para a resolução de problemas de otimização matemática por possuir características com fácil implementação, rápida convergência e poucos parâmetros de controle [16], [17].

A técnica do BBBC é baseada em mecanismos populacionais, neste caso, a aleatoriedade pode ser vista como equivalente à dissipação de energia na natureza, enquanto que um ponto ótimo local ou global é comparado à atração gravitacional [16].

A modelagem do BBBC envolve duas etapas básicas:

Etapa 1: denominada *Big Bang*, neste ponto ocorre uma expansão do espaço de busca, onde as soluções candidatas são espalhadas pelo mesmo de maneira uniforme. O tamanho desta população é escolhido de forma empírica de acordo com o problema em questão [16].

Etapa 2: denominada *Big Crunch*, esta etapa aplica um operador de convergência com algumas entradas e apenas uma saída, denominada centro de massa. Cada indivíduo gerado na população inicial é considerado uma solução candidata. O cálculo do centro de massa associado a todas as partículas depende da posição de cada uma da seguinte forma [16]:

$$A_i^{c(k)} = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j} \cdot A_i^{c(k,j)}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j}}, i = 1, 2, \dots, D \quad (2.1)$$

Em que:

$A_i^{c(k)}$: ponto do centro de massa para a i -ésima variável na iteração k ;

N : tamanho da população de partículas geradas na fase do Big Bang;

D : número de variáveis de otimização de cada partícula;

f_i : valor da função objetivo da partícula j ;

$A_i^{c(k,j)}$: i -ésima variável da j -ésima partícula da geração de candidatos, na iteração k .

Após o cálculo do centro de massa, uma nova expansão é realizada, utilizando-se o conhecimento adquirido na fase anterior (fase Big Bang), pois as novas soluções são geradas por uma distribuição normal em torno do centro de massa, e o desvio padrão desta distribuição reduz-se a cada iteração até a convergência [16], [15]. A expansão das partículas é formulada como:

$$A_i^{(k+1j)} = A_i^{c(k)} + \frac{r_j \alpha_1 (A_{imax} - A_{imin})}{k + 1} \quad (2.2)$$

Em que:

r_j : número aleatório proveniente da distribuição normal em torno do centro de massa gerado para a partícula j ;

α_1 : parâmetro que limita o tamanho da região de busca;

A_{imax}, A_{imin} : limites superior e inferior para a i -ésima variável de otimização.

As etapas do *Big Bang* e *Big Crunch* descritas são repetidas até que um critério de parada seja atendido.

2.4 MÉTODO ENXAME DE PARTÍCULAS (EP)

O método de otimização por enxame de partículas (em inglês: *particle swarm optimization* ou PSO) consiste em um algoritmo heurístico inspirado no "comportamento social", ou seja, no comportamento durante a migração de espécies de pássaros. Este método foi proposto por Russell Eberhart e James Kennedy em 1995 e possui o objetivo de buscar a solução ótima, em um espaço de busca, através da troca de informações entre indivíduos de uma população determinando a trajetória que cada um deverá seguir no espaço [18].

No EP, a busca pela rota ótima e a interação entre os pássaros ao longo do voo são modeladas como um mecanismo de otimização. Numa analogia, o termo partícula foi adotado para simbolizar cada pássaro e representar uma possível solução do problema a ser resolvido. A área sobrevoada pelos pássaros é equivalente ao espaço de busca e encontrar a rota otimizada corresponde a encontrar a solução ótima [19].

Para que a partícula sempre se aproxime do objetivo, evitando o seu desvio, utiliza-se uma função objetivo, que avalia o seu desempenho. Para alcançar o destino correto, sejam rotas para alimentos ou ninhos, os pássaros fazem uso de suas experiências e da experiência do próprio agrupamento [19].

No EP artificial, o termo indicador da experiência ou conhecimento individual de cada partícula é denominado de *pbest*. Em uma abordagem mais simples, o termo responsável por representar o conhecimento do enxame como um todo, por sua vez, denomina-se *gbest* [19]. A Tabela 2 apresenta de forma resumida as nomenclaturas descritas.

Tabela 2 – Identificação de cada termo relacionado ao EP.

Termo	Significado
Partículas	Pássaros
Enxame	Agrupamento de passáros
Espaço de busca	Área sobrevoada
Posição	Localização de cada passáro durante o voo
Solução Ótima	Localização do passáro onde ele encontrou o alimento ou ninho
Função Objetivo	Função de avaliação
<i>pbest</i>	Melhor posição conhecida pelo passáro (Experiência individual)
<i>gbest</i>	Melhor posição conhecida pelo passáro (Experiência coletiva)

O EP adquiriu amplas aplicações em problemas de otimização devido à sua simplicidade de implementação e potencialidade para funções objetivo com restrições complexas em um espaço de busca multimodal [16].

Inicialmente, o EP gera posições para as partículas da população, que representam soluções candidatas para o problema de otimização. A população inicial pode ser aleatória ou conduzida por algum conhecimento prévio sobre o problema em estudo. Cada partícula segue uma trajetória pelo espaço de busca durante o processo iterativo, atualizando sua velocidade e posição a cada iteração [16].

A velocidade da partícula em uma determinada iteração depende da melhor posição até então encontrada pela mesma, em termos da função objetivo do problema, bem como da melhor posição até então encontrada por todo o grupo. O mecanismo de atualização de velocidade e posição implica na excursão de pontos mais promissores durante o processo.

Este mecanismo utiliza valores de inércia (w) e fatores de aceleração (c_1, c_2), que devem ser escolhidos adequadamente, pois uma escolha inadequada, por exemplo um valor muito baixo de inércia, pode acarretar em convergência precoce para um ponto de ótimo local. Em contrapartida, um valor muito alto pode dificultar a convergência e aumentar o esforço computacional. As equações 2.3 e 2.4 são de atualização de velocidade e posição [18].

$$V_j^{(k+1)} = w \cdot V_j^k + c_1 \cdot r_1 \cdot (pbest_j^k - x_j^k) + c_2 \cdot r_2 \cdot (gbest_j^k - x_j^k) \quad (2.3)$$

$$x_j^{(k+1)} = x_j^k + V_j^{(k+1)}, j = 1, \dots, N \quad (2.4)$$

Em que:

$V_j^{(k+1)}$: velocidade da partícula j na iteração k ;

w : fator inércia;

c_1, c_2 : fatores de aceleração cognitivo e social, respectivamente;

r_1, r_2 : números aleatórios distribuídos uniformemente entre 0 e 1;

$pbest_j^k$: melhor posição da j -ésima partícula na iteração k ;

$gbest_j^k$: melhor posição global na iteração k ;

x_j^k : posição da partícula j na iteração k .

2.5 MÉTODO HÍBRIDO EP-BBBC

O método híbrido tem por objetivo aperfeiçoar o processo de busca pela solução ótima de problemas de otimização, utilizando as potencialidades dos métodos BBBC e EP. Dessa forma, torna-se possível evitar a estagnação precoce em pontos de ótimos locais apresentada pelo método BBBC em decorrência da contração da população para um centro comum na fase de *big crunch*. Esta melhoria ocorre em decorrência da inclusão, no cálculo do centro de massa, das informações sobre as melhores posições encontradas por cada partícula ($pbest$) e pela população como um todo ($gbest$) [16]. A Equação 2.5 apresenta a inclusão do $pbest$ e do $gbest$ para o novo cálculo do centro de massa no algoritmo híbrido [16].

$$A_i^{(k+1,j)} = \alpha_2 * A_i^{c(k)} + (1 - \alpha_2) * (\alpha_3 * A_i^{gbest(k)} + (1 - \alpha_3) * A_i^{ibest(k,j)}) + \frac{r_j \alpha_1 (A_{imax} - A_{imin})}{k + 1}, \quad (2.5)$$

$$i = 1, 2, \dots, D \text{ e } j = 1, 2, \dots, N$$

Em que:

α_2, α_3 : parâmetros para controlar os efeitos das melhores posições globais e locais, respectivamente, nas novas posições dos candidatos;

$A_i^{gbest(k)}$: valor da variável de otimização i na melhor solução global da iteração k ;

$A_i^{ibest(k,j)}$: valor da variável de otimização i na melhor solução local para a partícula j , na iteração k .

Analisando a Equação 2.5, observa-se que os valores das posições globais e locais (α_2, α_3) , juntamente com o parâmetro que limita o tamanho da região de busca (α_1) , apresentam restrições quanto aos seus valores, pois caso as variáveis α_2 e α_3 adquiram valores '1' ou '0', respectivamente, a parcela do algoritmo EP será nula, resultando em sua não participação no novo cálculo do centro de massa. Analogamente, caso a variável α_1 adquira valor nulo, a parcela do algoritmo BBBC será eliminada do cálculo do centro de massa. O fluxograma a seguir apresenta o funcionamento simplificado do algoritmo EP-BBBC.

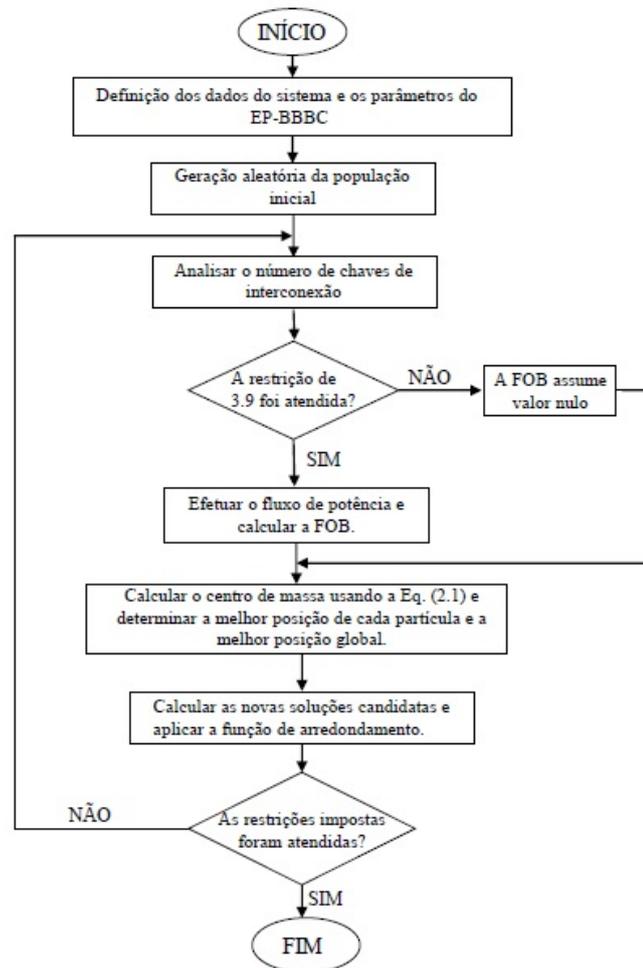


Figura 3 – Representação passo a passo do Método Híbrido.

2.6 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, foram apresentados conceitos gerais sobre as técnicas de otimização aplicadas ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de forma híbrida no presente trabalho. Tanto os fundamentos das técnicas individualizadas, quanto a justificativa de hibridização, são contemplados com suporte das respectivas formulações

para atualização de soluções candidatas. O próximo capítulo apresenta o detalhamento da modelagem do algoritmo híbrido aplicado ao problema de reconfiguração de SDE.

3 MODELAGEM PROPOSTA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho, utiliza-se o algoritmo híbrido EP-BBBC para a resolução do problema de reconfiguração de redes radiais de distribuição. Este capítulo apresenta a modelagem matemática utilizada para a implementação e aplicação deste algoritmo híbrido ao problema de reconfiguração visando a otimização do SDE para perda técnica mínima. A estratégia de discretização para acomodar a meta-heurística ao problema discreto de otimização também é detalhada.

3.2 FORMULAÇÃO PARA O PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO

Esta seção apresenta e formula a função objetivo e restrições do problema de reconfiguração de redes radiais de distribuição de energia elétrica, conforme exemplo elucidativo de 2 barras ilustrado na Figura 4. A função objetivo (FOB) corresponde à minimização da perda técnica de energia total, incluindo todos os trechos e alimentadores, do SDE. A função objetivo e respectivas restrições são formuladas a seguir.

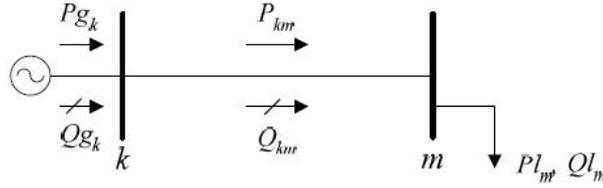


Figura 4 – Sistema exemplo de 2 barras.

$$FOB = P_{perda} = \min \sum_{k=1}^{N_{lin}} L_{km} \quad (3.1)$$

Sujeito a:

$$Pg_k - Pl_k - \sum_{m \in \Omega_k} [CH_{km} \cdot P_{km}] = 0 \quad (3.2)$$

$$Qg_k - Ql_k - \sum_{m \in \Omega_k} [CH_{km} \cdot Q_{km}] = 0 \quad (3.3)$$

$$P_{km} = V_k^2 \cdot g_{km} - V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} - V_k \cdot V_m \cdot b_{km} \cdot \sin \theta_{km} \quad (3.4)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 \cdot b_{km} + V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \cos \theta_{km} + V_k \cdot V_m \cdot g_{km} \cdot \sin \theta_{km} \quad (3.5)$$

$$L_{km} = g_{km} \cdot [V_k^2 + V_m^2 - 2V_k \cdot V_m \cdot \cos \theta_{km}] \cdot CH_{km} \quad (3.6)$$

$$CH_{km} = 0 \text{ ou } 1 \quad (3.7)$$

$$V_k, V_m \geq V_{min} \quad (3.8)$$

$$\textit{Radialidade e Conectividade} \quad (3.9)$$

Em que L_{km} é a perda de potência ativa no trecho $k - m$; N_{lin} é número total de trechos do sistema; Pg_k e Qg_k são as gerações de potência ativa e reativa, respectivamente, na barra k ; Pl_k e Ql_k são as cargas ativas e reativas, respctivamente, na barra k ; CH_{km} é o estado associado à chave manobrável acoplada ao trecho $k - m$; P_{km} e Q_{km} são os fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, no trecho $k - m$; g_{km} representa a condutância do trecho $k - m$; V_k é o módulo de tensão da barra k ; θ_{km} é o ângulo de fase entre as barras k e m e V_{min} é o limite mínimo de tensão.

As restrições (3.2) e (3.3) representam os balanços de potência ativa e reativa, respectivamente, em cada barra da rede elétrica, que envolvem os fluxos de potência nos trechos de distribuição formulados em (3.4) e (3.5). Já na restrição (3.6), o fator CH_{km} acomoda a representação da chave acoplada à linha km para o cálculo das perdas neste trecho. Ou seja, se a chave da linha km é aberta, $CH_{km} = 0$, e portanto, esta linha não contribui para a perda total de energia, resultando em $L_{km} = 0$. A restrição (3.7), por sua vez, define a natureza discreta das variáveis de chaveamento CH_{km} . O limite inferior de tensão do sistema é representado pela restrição (3.8). Por fim, as restrições de radialidade e conectividade são consideradas em (3.9). O atendimento a estas restrições é descrito com maiores detalhes adiante.

Como dito anteriormente, o cálculo de perdas de energia é muito importante, pois impacta financeiramente nos custos envolvidos no SDE e, sendo assim, um planejamento adequado da operação destes sistemas para a redução de perdas ao longo da cadeia de distribuição de energia elétrica é relevante.

3.3 MODELAGEM DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO

O método EP e BBBC clássico considera variáveis reais contínuas durante todo o processo de otimização. Entretanto, existem problemas cujo modelo envolve variáveis binárias e soluções combinatórias, em domínio discreto. O problema de reconfiguração do SDE é um exemplo de problema combinatório em que se faz necessária a modelagem no domínio discreto e/ou binário. A modelagem binária para o problema da reconfiguração consiste em: para cada chave do sistema, associa-se uma variável binária em que o valor *zero* indica que a chave está aberta e o valor *um* indica que a chave está fechada. As soluções consistem na combinação dos estados das chaves, sendo necessário o tratamento

das variáveis correspondentes durante sua atualização a cada iteração, adaptando os mecanismos de busca realizados pelo algoritmo híbrido.

Para obter a solução discreta do algoritmo híbrido EP-BBBC, é utilizada a função de arredondamento *round*, que arredonda os elementos da Equação 2.5, para os inteiros *zero* (0) ou *um* (1). A função de arredondamento é representada pela Equação 3.10.

$$A_i^{(k+1,j)} = \text{round}(\alpha_2 \cdot A_i^{c(k)} + (1-\alpha_2) \cdot (\alpha_3 \cdot A_i^{gbest(k)} + (1-\alpha_3) \cdot A_i^{ibest(k,j)}) + \frac{r_j \alpha_1 (A_{imax} - A_{imin})}{k+1}) \quad (3.10)$$

Em geral, os SDE são providos de algum nível de automação, com a presença de chaves automáticas e com controle remoto, que podem ser seccionadoras ou de interconexão, NF ou NA, respectivamente.

Como exemplo, considera-se o sistema simples de 5 barras representado pela Figura 5. Os trechos T_1 , T_2 , T_4 e T_6 têm chaves normalmente fechadas e os trechos T_3 e T_5 chaves normalmente abertas (representada por traços pontilhados).

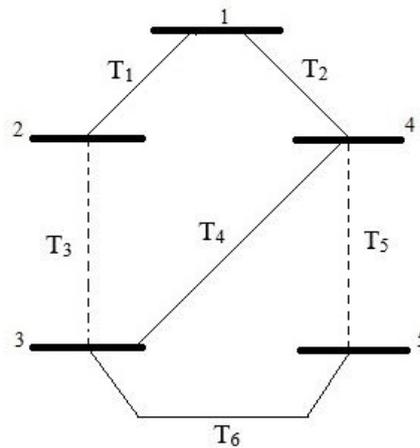


Figura 5 – Sistema Exemplo de 5 barras.

Cada solução obtida pelo algoritmo EP-BBBC representa uma nova topologia radial da rede, no sentido de redução de perdas. Considerando o sistema exemplo de 5 barras, uma possível solução gerada pelo método, que é contínuo em sua estratégia de atualização, é codificada através do vetor apresentado na Figura 6.

0,10	0,70	0,30	0,32	0,34	0,46
------	------	------	------	------	------

Figura 6 – Solução Contínua do Sistema de 5 barras.

A possível solução do sistema exemplo é então submetida à função de arredondamento para sua discretização. Como a topologia inicial tem duas chaves NA, cada configuração gerada durante o processo também deve apresentar o mesmo número de

chaves NA da topologia inicial. Sendo assim, as duas posições com os menores valores são arredondadas para *zero* (0), enquanto que as demais são arredondadas para *um* (1), resultando na solução discretizada da Figura 7.

0	1	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---

Figura 7 – Solução Binária do Sistema de 6 barras.

Como apresentado anteriormente, no algoritmo EP-BBBC, cada trecho do sistema exemplo de 5 barras dispõe de uma chave seccionadora, que recebe uma posição no vetor solução. Dessa forma, a topologia final deste sistema exemplo é ilustrada na Figura 8.

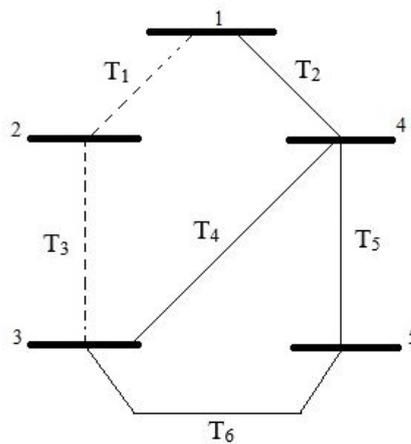


Figura 8 – Topologia Final do Sistema Exemplo.

3.3.1 TRATAMENTO DA RADIALIDADE E CONECTIVIDADE

Conforme descrito anteriormente, os SDE são, em sua maioria, configurados em estruturas malhadas e operam radialmente, a fim de se obter baixas correntes de curto-circuitos, resultando em um baixo custo de equipamentos de controle e proteção [20] e [21].

A alteração topológica, mantendo-se a radialidade, pode melhorar o balanceamento entre alimentadores e as condições de operação da rede. No entanto, a manutenção da radialidade é complexa e a rede elétrica consiste em um grafo. Ao mesmo tempo, a conectividade é fundamental para assegurar a energização de todos os pontos de carga do sistema. Portanto, estas restrições são extremamente importantes na modelagem do problema de reconfiguração de redes aéreas de distribuição, e também são requisitos severos do problema de programação [22].

A garantia de soluções radiais para o sistema de distribuição pode ser feita de diversas formas. Uma delas é através de restrições na forma de inequações para cada

possível malha da estrutura da rede [22]. Estas restrições são em função das variáveis inteiras e binárias CH_{km} , incluindo:

- 1) a existência de apenas um trecho aberto por possível malha;
- 2) nenhuma carga pode estar desenergizada;
- 3) os trechos que saem da subestação fechados.

Tais restrições foram baseadas na teoria de grafo, que garante soluções radiais e conexas [25] e [26].

Para exemplificar, considera-se o sistema de 5 barras da Figura 5. Nesta topologia, observa-se a formação de duas malhas, representadas pelos conjuntos de chaves a seguir:

Malha 1: T_1, T_2, T_3, T_4 ;

Malha 2: T_4, T_5, T_6 .

Observa-se ainda que em cada uma das malhas descritas, existe uma chave que se encontra aberta (linha pontilhada), a fim de manter o sistema radial. Mas o modelo apresentado se torna de difícil implementação quando o sistema analisado passa a ser de grande porte, pois a determinação de todas as inequações de malha presentes na rede torna o trabalho manualmente exaustivo.

Nesta monografia, a restrição de radialidade é tratada por penalização da FOB, ou seja, ao gerar soluções não radiais, o fluxo de potência para cálculo de perdas não alcança a convergência, devido à presença de barras isoladas e, neste caso, a função objetivo recebe uma penalização através de um valor elevado.

Considerando a restrição de radialidade, a possível solução gerada da Figura 8 para o sistema exemplo de 5 barras é plausível. Entretanto, ao se analisar a conectividade desta topologia, observa-se que a barra 2 está desconexa, resultando em sua desenergização. Dessa forma, a função objetivo é penalizada para a solução candidata desta figura. Na sequência, ao não observar a restrição de conectividade, o algoritmo EP-BBBC gera uma nova solução até que as restrições de radialidade e conectividade sejam simultaneamente atendidas.

Neste trabalho, uma configuração, para ser ótima, deve primeiramente atender as restrições operacionais do sistema mantendo a rede radial e conexa.

3.4 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo, apresentou-se a formulação e a modelagem para o problema de reconfiguração de sistemas radiais de distribuição para a aplicação da técnica de otimização meta-heurística hibridizada EP-BBBC. O tratamento de radialidade e conectividade foi explicado através da ilustração de um sistema exemplo de 5 barras. Estas restrições agregam dificuldade ao problema de reconfiguração são tratadas juntamente com uma estratégia de discretização dos pontos obtidos pela meta-heurística, cuja atualização de variáveis é originalmente contínua.

4 ESTUDOS DE CASOS

4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os estudos de casos realizados para analisar a implementação do algoritmo EP-BBBC e sua aplicação ao problema de reconfiguração de redes radiais de distribuição. Os testes foram conduzidos utilizando-se três sistemas amplamente divulgados na literatura especializada, de 16, 33 e 69 barras. O algoritmo foi implementado utilizando-se o software e ambiente de programação MATLAB versão R2016a.

4.2 SISTEMA 16 BARRAS

O sistema teste de 16 barras da literatura [23] é utilizado para a validação inicial do funcionamento do algoritmo desenvolvido no presente trabalho. Este sistema é composto de três alimentadores de 23 kV e 16 trechos, sendo 13 com chaves seccionadoras ou normalmente fechadas e 3 trechos com chaves de interconexão ou normalmente abertas. A chave S_9 não é manobrável, pois sua abertura ocasionaria a desenergização da barra 10. A carga total é de $28,9\text{ MW}$. A Figura 9 apresenta a topologia inicial, em que as linhas contínuas representam as chaves NF e as linhas tracejadas as chaves NA. Nesta configuração inicial, a perda técnica total é de $511,44\text{ kW}$.

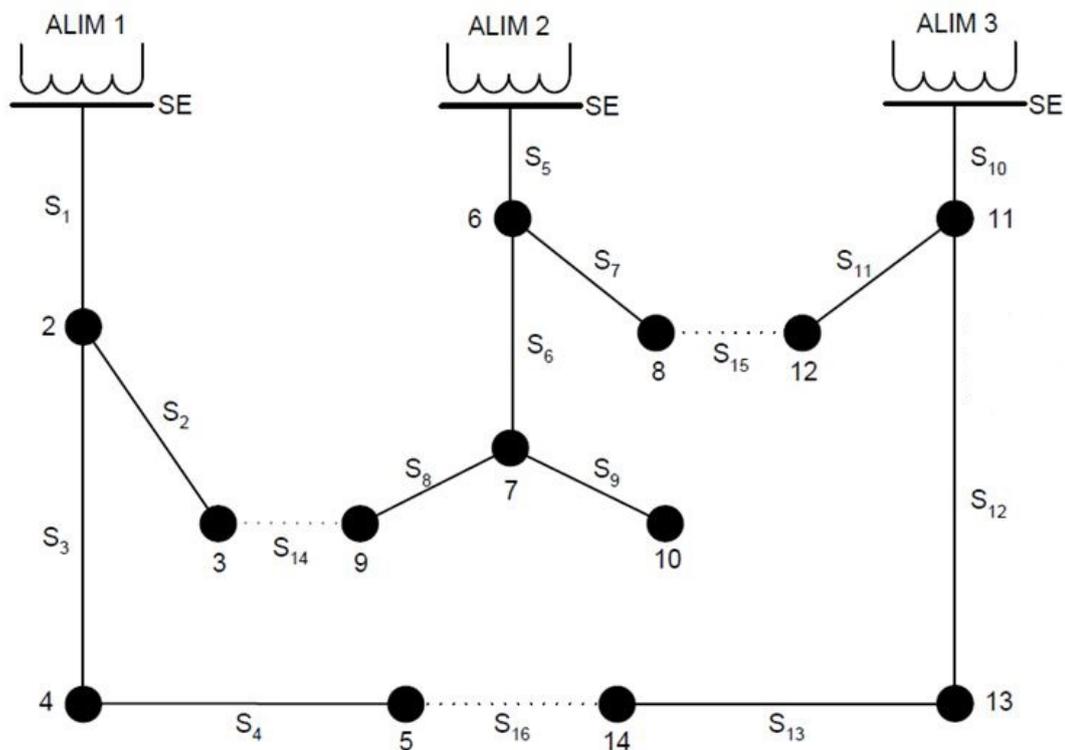


Figura 9 – Sistema de 16 barras [23] - Topologia Inicial.

A priori, a reconfiguração do sistema de 16 barras foi realizada utilizando-se somente o algoritmo por enxame de partículas. Com este algoritmo, realizou-se os testes repetidas vezes e a solução ótima global de acordo com [8] foi obtida em todas. Esta solução indica quais chaves devem ser abertas no sistema para que ocorra a mínima perda técnica, cuja topologia é ilustrada na Figura 10. Com esta nova topologia, a perda de energia diminuiu para $466,13 \text{ kW}$, o que significa uma redução de $8,86\%$ em relação à topologia original.

7	8	16
---	---	----

Figura 10 – Solução Ótima do Sistema 16 barras.

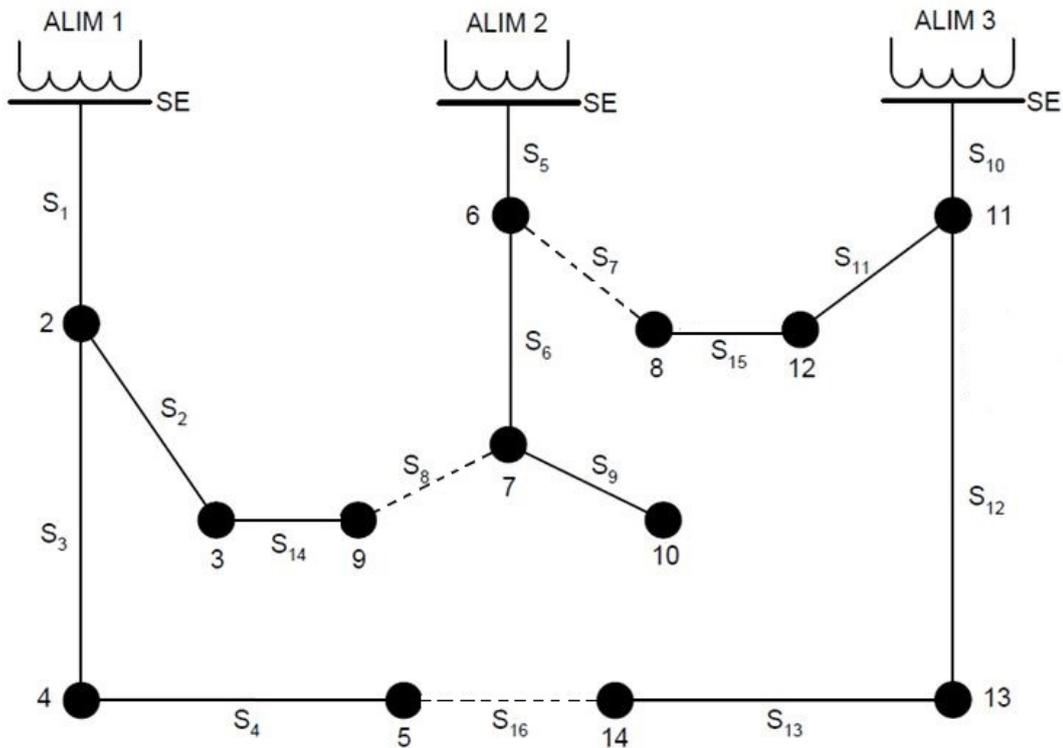


Figura 11 – Topologia Final do Sistema 16 barras.

Após a análise feita utilizando somente o algoritmo por enxame de partículas, realizou-se um novo estudo utilizando o algoritmo híbrido EP-BBCC. O modelo EP-BBCC obteve a mesma solução ótima com menor número de iterações, como apresentado na Tabela 3, o que demonstra a vantagem de se utilizar a hibridização entre as técnicas EP e BBCC, conforme esperado na motivação da proposta desta monografia. As Figuras 13 e 12 apresentam o comportamento da função objetivo (FOB) durante o processo iterativo de cada um dos métodos, EP e EP-BBCC.

Tabela 3 – Resultados Obtidos para a Reconfiguração do Sistema 16 barras.

Algoritmo	Interações
EP	5
EP-BBBC	3

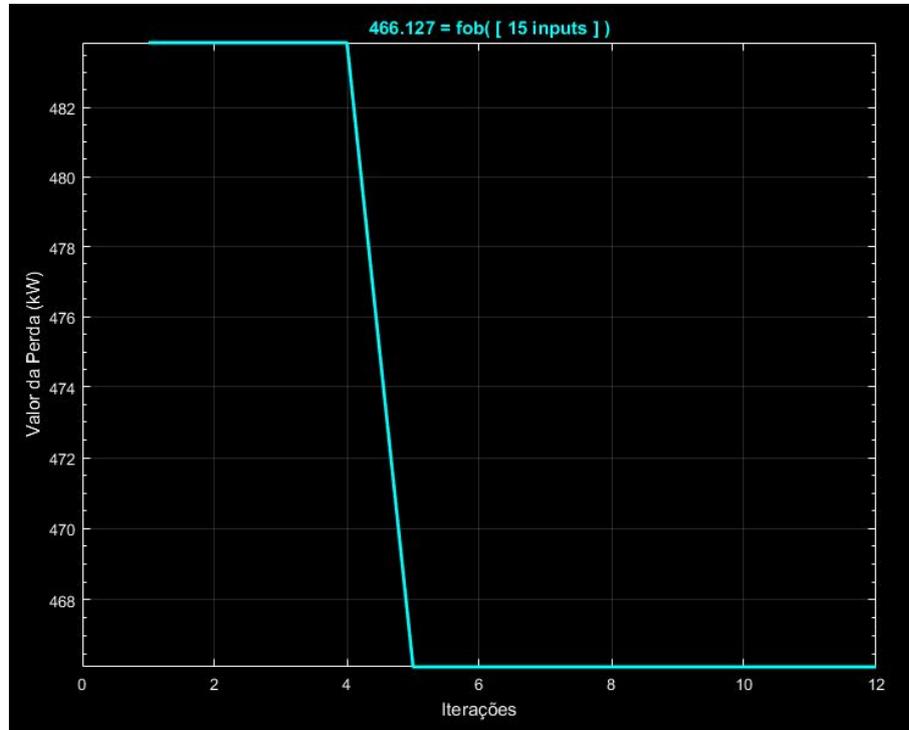


Figura 12 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP.

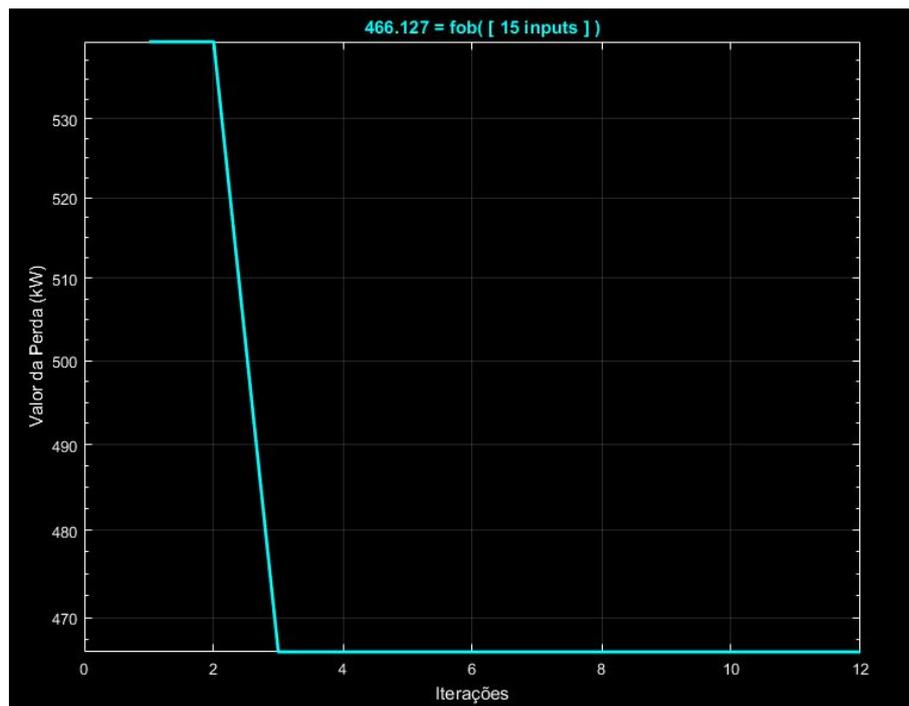


Figura 13 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP-BBBC.

4.3 SISTEMA 33 BARRAS

Os dados do sistema de 33 barras são obtidos de [24]. A carga total deste sistema é de $3.715,0 \text{ kW}$ e sua tensão é de $12,66 \text{ kV}$. Com a configuração base de [24], o sistema apresenta uma perda técnica de $202,68 \text{ kW}$. O sistema é composto por 37 trechos, incluindo 5 trechos com chaves NA, e sua topologia inicial é mostrada na Figura 14. Neste sistema, a chave S_1 não é manobrável, visto que sua abertura desconecta o sistema da subestação (SE). Neste sistema a chave S_1 não é manobrável, visto que sua abertura desconecta o

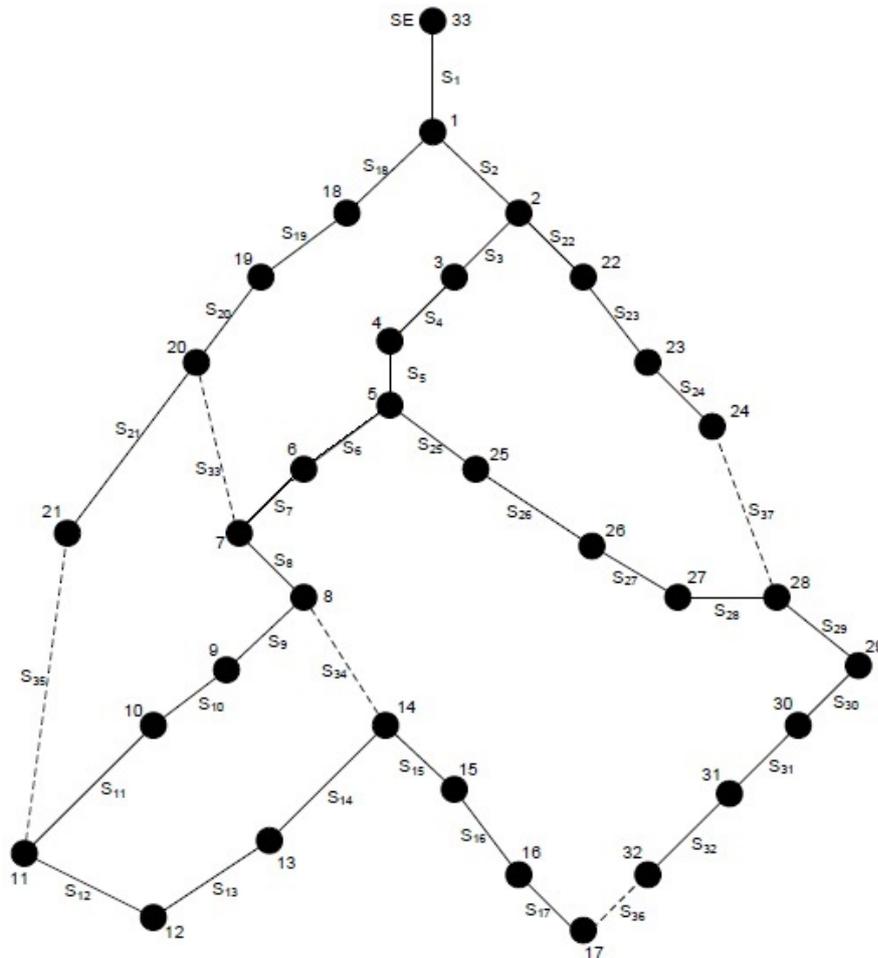


Figura 14 – Sistema 33 barras Figura 14 - Topologia Inicial.

sistema da subestação (SE).

Para os estudos de reconfiguração desta rede, procede-se como no sistema anterior de 16 barras, ou seja, primeiramente efetua-se a reconfiguração usando somente o algoritmo EP e em seguida via algoritmo híbrido EP-BBBC. O resultado obtido por ambos consiste na solução ótima global, codificada na Figura 15 e ilustrada Figura 16. A perda na topologia reconfigurada é $139,55 \text{ kW}$.

A diferença na obtenção da solução ótima está relacionada com o número de iterações requeridas por cada algoritmo. Na Tabela 4, observa-se que o método híbrido obteve a

7	9	14	32	37
---	---	----	----	----

Figura 15 – Solução Ótima do Sistema 33 barras.

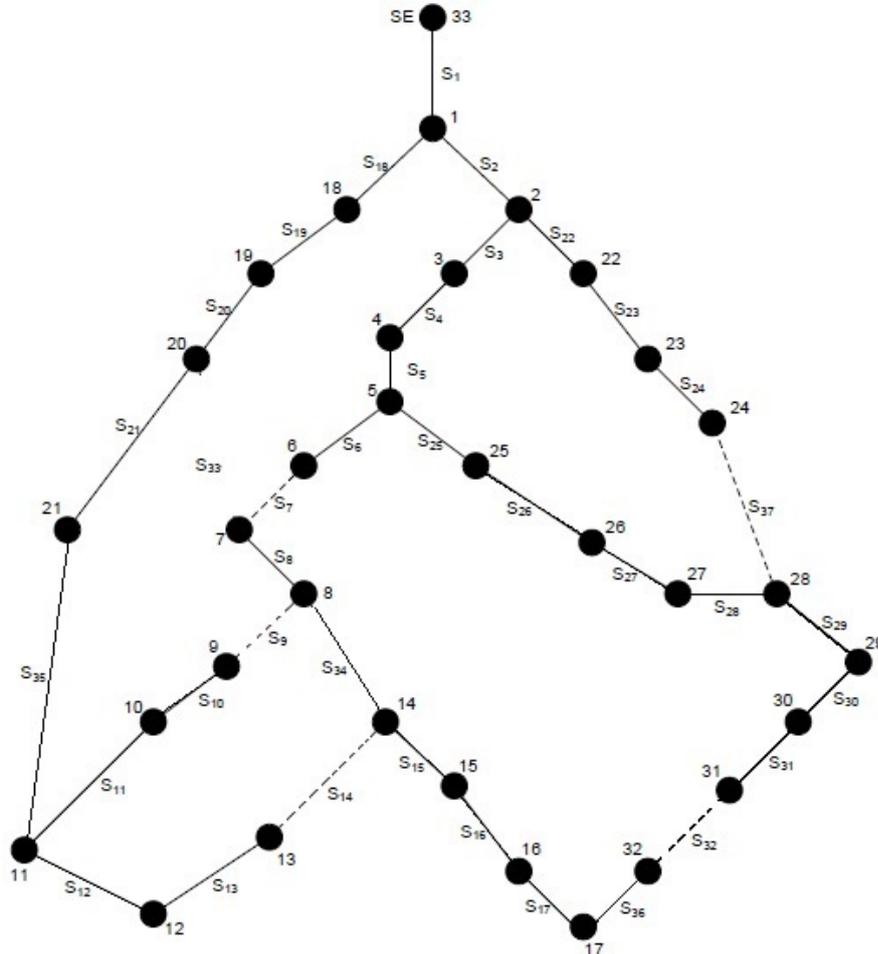


Figura 16 – Topologia do Final do Sistema 33 barras.

resposta mais rapidamente, conforme esperado e motivação da presente monografia.

Tabela 4 – Resultados Obtidos para a Reconfiguração do Sistema 33 barras.

Algoritmo	Interações
EP	61
EP-BBBC	23

Observa-se que para o sistema de 33 barras, a diferença entre o número de iterações é maior se comparada com a diferença de iterações do sistema de 16 barras. As Figuras 17 e 18 apresentam o comportamento da função objetivo durante os processos iterativos dos métodos EP e EP-BBBC, respectivamente.

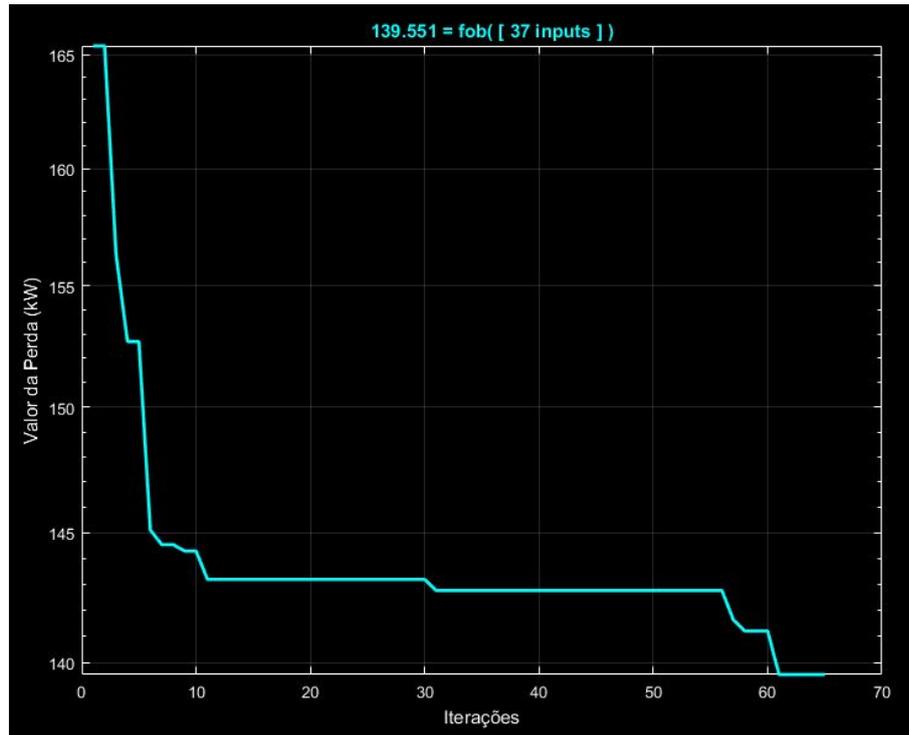


Figura 17 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP.

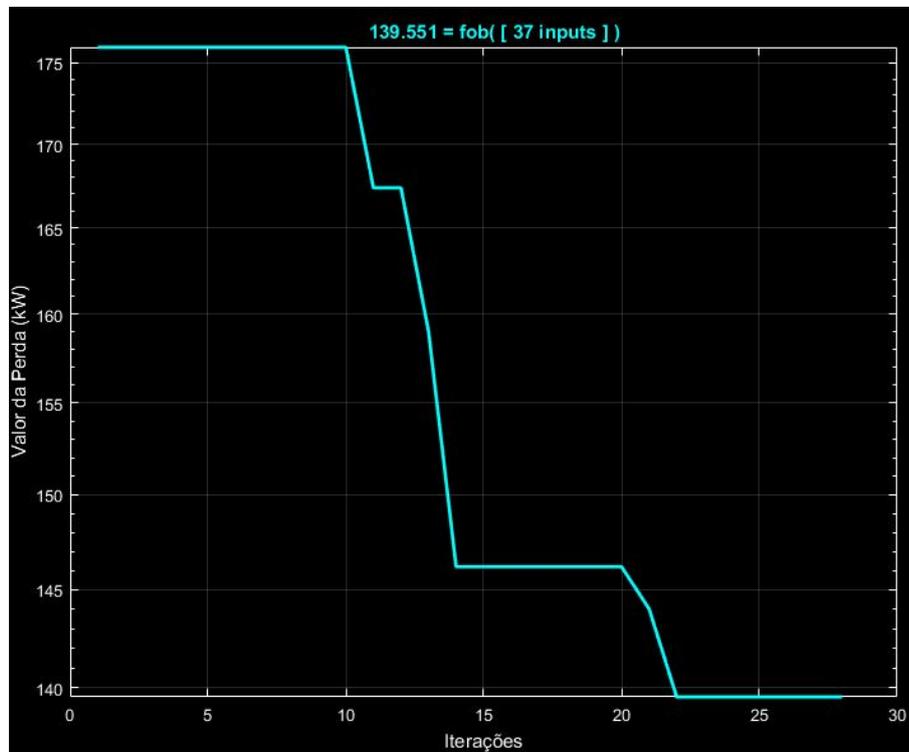


Figura 18 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP-BBBC.

4.4 SISTEMA 69 BARRAS

No último estudo de caso realizado para testar o algoritmo híbrido, utilizou-se o sistema de 69 barras de [27]. Este sistema tem tensão de $12,66\text{ kV}$, carga total de $3.802,2\text{ kW}$ e $2.694,6\text{ kVAr}$. A topologia inicial desse sistema está representada na Figura 19, onde se observa que o trecho '1' não é manobrável, pois sua abertura resultaria no desligamento de todo o sistema. As linhas pontilhadas correspondem às chaves de interconexão desta rede.

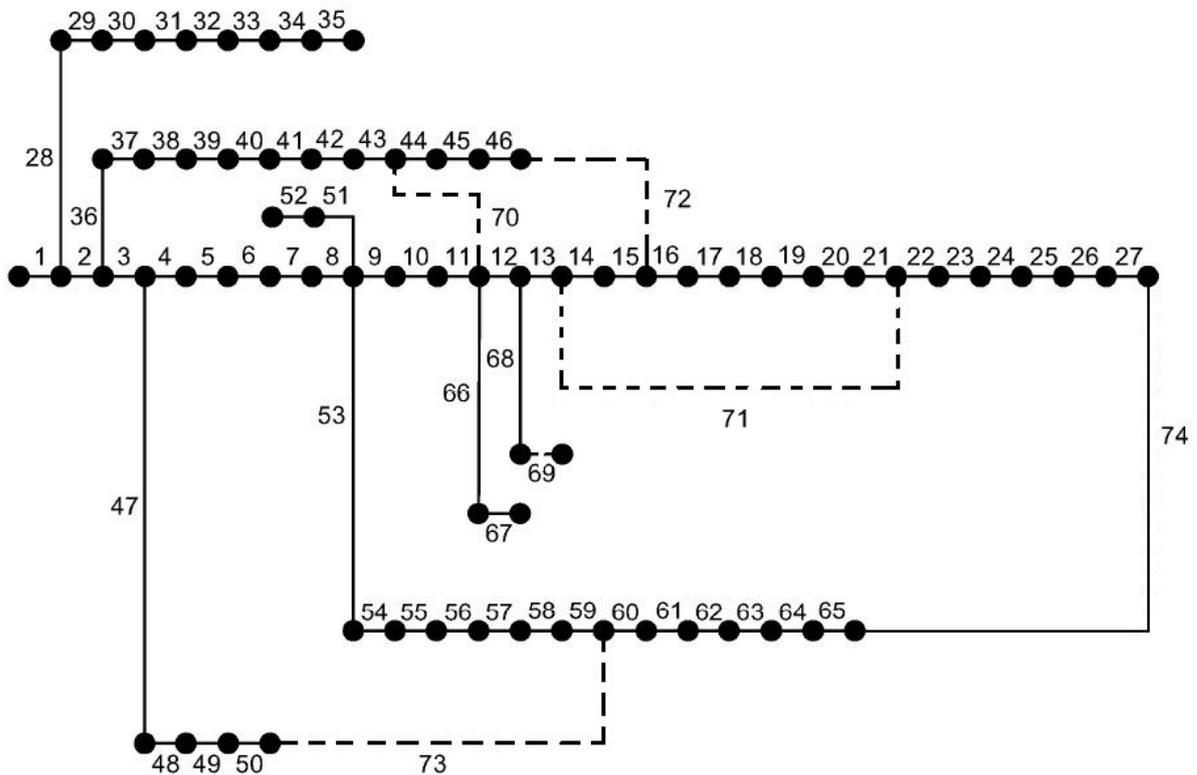


Figura 19 – Topologia Inicial do Sistema 69 barras.

Na topologia reconfigurada do sistema de 69 barras, a perda técnica diminuiu para $99,6204\text{ kW}$, correspondendo a uma redução de $44,27\%$. A diferença na obtenção da solução ótima pelos métodos EP e EP-BBBC está relacionada com o número de iterações requeridas por cada um, menor no híbrido EP-BBBC, conforme esperado, vide Tabela 5.

14	56	61	69	70
----	----	----	----	----

Figura 20 – Solução Ótima do Sistema 69 barras.

As Figuras 22 e 23 apresentam o comportamento da função objetiva em cada algoritmo utilizado para a solução do problema proposto.

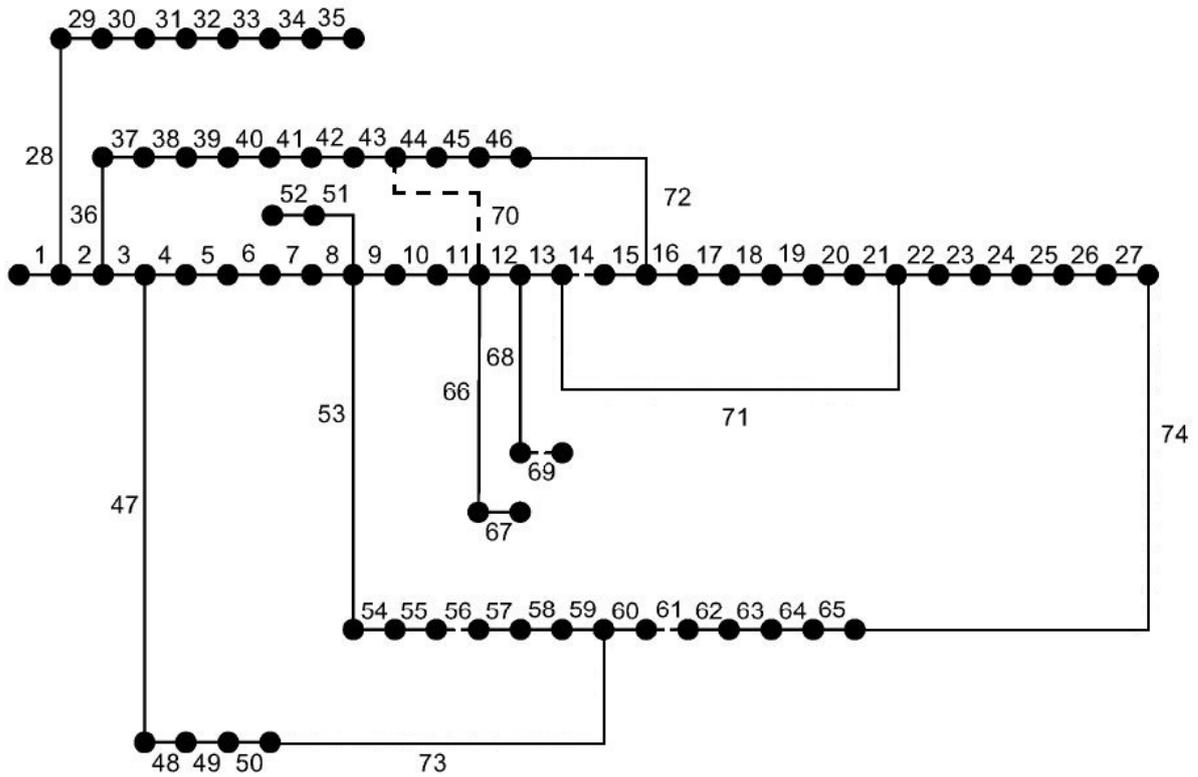


Figura 21 – Topologia Final do Sistema 69 barras.

Tabela 5 – Resultados Obtidos para a Reconfiguração do Sistema 69 barras.

Algoritmo	Interações
EP	41
EP-BBBC	32

4.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Este capítulo apresentou os resultados obtidos através da aplicação da técnica meta-heurística híbrida EP-BBBC ao problema de reconfiguração, utilizando-se dados de três sistemas conhecidos e divulgados na literatura especializada, de 16, 33 e 69 barras. Concluiu-se que a estratégia de hibridização tende a conduzir a melhores resultados do que os métodos individualizados que a compõem, o que era esperado na motivação deste trabalho, permitindo alcançar, portanto, os resultados pretendidos.

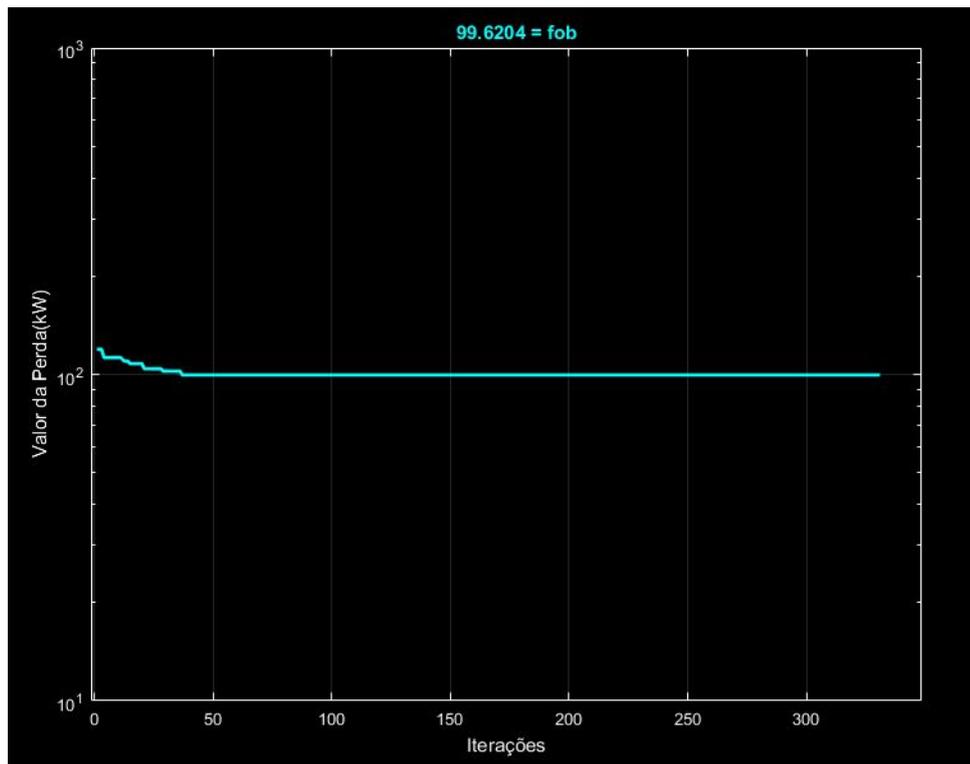


Figura 22 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP.

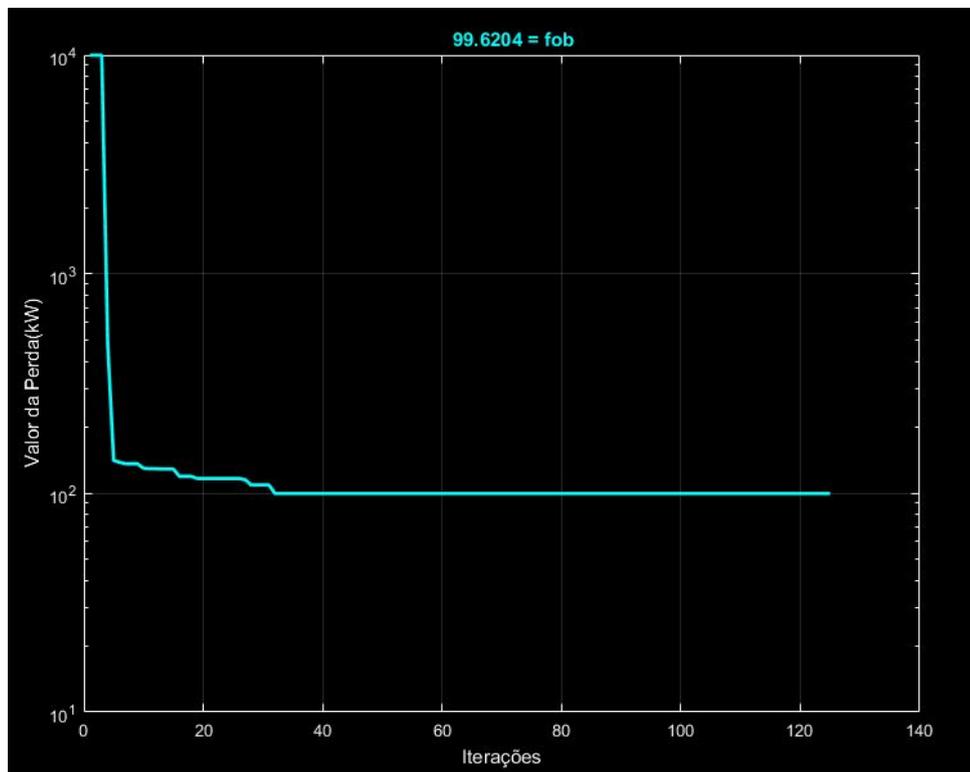


Figura 23 – Comportamento da FOB no Algoritmo EP-BBCC.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na presente monografia, apresentou-se uma metodologia de reconfiguração de redes radiais de distribuição via técnica de otimização meta-heurística híbrida, que combina os métodos por enxame de partículas e *Big Bang-Big Crunch*, a fim de conciliar as vantagens de cada um nos processos de busca local e global no espaço de soluções. O objetivo da reconfiguração é a redução de perdas técnicas, gerando benefícios para distribuidoras e consumidores finais do insumo energia elétrica.

A técnica por *Enxame de Partículas* inspira-se no comportamento de pássaros em rotas migratórias, na busca por rotas otimizadas, enquanto que o algoritmo *Big Bang-Big Crunch* é inspirado em uma das teorias de evolução do universo e requer número limitado de parâmetros, o que consiste em sua maior vantagem.

O método híbrido pode se resumir a um dos métodos individuais que o compõem se os processos de diversificação e intensificação são ajustados convenientemente. Também através do ajuste conveniente deste processos, obtém-se uma varredura eficiente do espaço de busca, tendendo a melhorar a qualidade das soluções obtidas e/ou as características de convergência do algoritmo de otimização.

As meta-heurísticas individualizadas de otimização, bem como o método hibridizado, utilizam-se de estratégias de atualização das variáveis de decisão como contínuas. Portanto, um procedimento de discretização associado com teoria de grafos é utilizado tanto para discretizar as variáveis de decisão do problema de reconfiguração, quanto para garantir a geração de topologias de rede radiais e conexas.

Os resultados obtidos demonstram que a hibridização conveniente de meta-heurísticas com adequação entre os mecanismos de diversificação e intensificação promove melhoria das características de convergência, acelerando a obtenção de soluções e aproximando a ferramenta computacional de aplicações no horizonte de operação. Nos estudos, embora a qualidade das soluções não tenha sido melhorada, pois em todos se obteve o ponto ótimo global, os números de iterações para a convergência foram reduzidos. Ainda, observou-se que quanto maior o porte do sistema, maior foi a redução do número de iterações com relação à meta-heurística individualizada, corroborando para a potencial aplicação em redes de médio e grande porte.

5.2 SUGESTÕES FUTURAS

Como sugestões para trabalhos futuros, listam-se.

- Formulação dos custos associados com a reconfiguração, como de chaveamento;

- Análise de balanceamento de cargas entre alimentadores;
- Formulação para a maximização de estabilidade de tensão;
- Melhoria de desempenho do método híbrido através de revisão da implementação e ajuste de parâmetros.

REFERÊNCIAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). *Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica*. Ano X, n. 115, Abril de 2017. Disponível em: www.epe.gov.br. Acessado em: 01 de maio 2017.
- [2] CEMIG. *Relatório Anual e de Sustentabilidade 2016*. Abril de 2017. Disponível em: relatorio2016.cemig.com.br. Acessado em: 30 de maio 2017.
- [3] ENERGISA. *Relatório Anual de Responsabilidade Socioambiental e Econômico-Financeiro 2016*. Abril de 2017. Disponível em: investidores.grupoenergisa.com.br. Acessado em: 30 de maio 2017.
- [4] EcoDebate. *Perdas na distribuição de energia elétrica no Brasil, artigo de Carol Salsa*. Março de 2009. Disponível em: www.ecodebate.com.br. Acessado em: 01 de maio 2017.
- [5] Jardim, M. A. S., 2011. *Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica usando algoritmo genético multiobjetivo*. Tese de M.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.
- [6] MANTOVANI, J. R. S., CASARI, F. e ROMERO, R. A., 2000. *Reconfiguração de Sistemas de Distribuição Radiais Utilizando o Critério de Queda de Tensão SBA* Controle e Automação, v. 11, n.3 (Set).
- [7] GÓMEZ, J. F., KHODR, H. M., OLIVEIRA, P. M., et al., 2004. *Ant Colony System Algorithm for the Planning of Primary Distribution Circuits*, IEEE Transactions on Power Systems, v. 19, n. 2 (May), pp. 996-1004.
- [8] de Oliveira, L. W., 2009. *Reconfiguração e Alocação de Capacitores em Sistemas de Distribuição*. Tese de D.Sc., UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [9] Net, M. P. S. 2014. *Reconfiguração de sistemas Elétricos de Distribuição Utilizando Algoritmo Híbrido*. Tese de M. Sc., UFBA, BA, Brasil.
- [10] Medeiros, G. F.; Kripka, M. 2012. *Algumas Aplicações de Métodos Heurísticos na Otimização de Estruturas*. Revista CIATEC-UPF, v. 4, pp. 19-32.
- [11] Pereira, F. S. 2010. *Reconfiguração Ótima de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Baseado no Comportamento de Colônia de Formigas*. Tese de D. Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil.
- [12] Saramago, S. P. e Steffen jr., V. 2016. *Introdução as Técnicas de Otimização em Engenharia*. Horizonte Científico, v. 10.
- [13] Horn, J.; Nafpliotis, N.; Goldberg, D. E. 1994. *A niched Pareto genetic algorithm for multiobjective optimization*. IEEE Evolutionary Computation.
- [14] Artioli, V. R. e Nery, R. S. 2007. *Métodos híbridos para resolução numérica de problemas de programação não linear*. Disponível em: www.bv.fapesp.br/pt/bolsas. Acessado em: 11 de maio de 2017.

- [15] Zandi, Z., Afjel, E. e Sedighizadeh, M. 2013.). *Hybrid Big Bang-Big Crunch optimization based optimal reactive power dispatch for voltage stability enhancement*. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, v. 47(2), pp 537-546.
- [16] Sedighizadeh, M. e Bakhtiary, R. 2016. *Optimal multi-objective reconfiguration and capacitor placement of distribution systems with the Hybrid Big Bang–Big Crunch algorithm in the fuzzy framework*. Ain Shams Engineering Journal, v. 7, pp. 113-129.
- [17] Erol, O. K. e Eksin, I. 2006. *A new optimization method: Big Bang–Big Crunch*. Advances in Engineering Software, v.37, pp. 106-111.
- [18] J. Kennedy e R. Eberhart 1995. *Particle Swarm Optimization*. IEEE International Conference on Neural Networks, v.4, pp. 1942-1948.
- [19] Artificial Intelligence in Motion. 2009. *Introdução à Inteligência de Enxame - Otimização por Enxame de Partículas (PSO)*. Disponível em: <http://aimotion.blogspot.com.br>. Acessado em: 31 de maio de 2017.
- [20] Lee, C., Liu, C., Mehrotra, S. e Bie, Z. (2015). *Robust Distribution Network Reconfiguration*. IEEE Transactions on Smart Grid, v. 6, no. 2.
- [21] Jabr, R. A., Singh, R. and Pal, B. C. (2012). *Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming*. IEEE Transactions on Power Systems, v. 27, no. 2.
- [22] Di, B., Li, L. and Hui, Y. (2012). *Distribution Reconstruction Based on Bender's Decomposition Including Distributed Generation*. China International Conference on Electricity Distribution.
- [23] Civanlar, Mesut E.; WU, Felix F. (1989) *Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction*. IEEE Transactions Power Delivery, United States, v. 3, n. 3.
- [24] Baran, S., et al. (1988). *Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems*. IEEE Transactions Power Delivery, United States, v. 4, n. 1, pp. 725-734.
- [25] Ahuja, R. K., Magnati T. L. e Orlin J.B. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms and Applications*. Prentice-Hall.
- [26] Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J. e Sherali, H. F. (2011). *Linear Programming and Network Flows*. John Wiley and Sons.
- [27] Baran, M. E., WU, F. F., (1989b). *Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems*. IEEE Transactions Power Delivery, v. 4, n. 1 (Jan), pp. 725-734.