

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DIOGO RUPOLO

RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DE UM ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA

Ilha Solteira
2013

DIOGO RUPOLO

Orientado

**RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
ATRAVÉS DE UM ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica
Área de Conhecimento: Automação

JOSÉ ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Orientador

Ilha Solteira

2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

R945r Rupolo, Diogo .
Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de um
algoritmo de busca dispersa / Diogo Rupolo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013
108 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: José Roberto Sanches Mantovani
Inclui bibliografia

1. Reconfiguração de redes de distribuição. 2. Busca dispersa.
3. Representação nó profundidade.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de um algoritmo de busca dispersa

AUTOR: DIOGO RUPOLO

ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica ,
Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSE ROBERTO SANCHES MANTOVANI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. LUIS GUSTAVO WESZ DA SILVA
Departamento de Áreas Acadêmicas / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Data da realização: 30 de agosto de 2013.

DEDICO

A Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todo o conhecimento e bênçãos recebidas em minha vida.

Ao professor Dr. José Roberto Sanches Mantovani pelo apoio, dedicação, confiança em todo o período de orientação deste trabalho. Ao professor Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro pelo apoio concedido. Aos professores Fabio Bertequini Leão e Marcos Julio Rider Flores pelas sugestões, correções e críticas construtivas na banca de qualificação com vistas a melhorar este trabalho. Agradecimentos aos professores Luis Gustavo Wesz da Silva e professor Fabio Bertequini Leão pelas sugestões e correções deste trabalho na banca de defesa.

Aos meus pais Maria Edite Lopes Rupolo e Leonir Pasqual Rupolo. Ao meu irmão Donizete Rupolo e aos meus primos Weverton Pereira Rupolo e Dainara Coelho Ferraz.

À minha namorada Thais Lozano Olivério, pelo amor, dedicação, companheirismo durante os momentos de realização deste trabalho e outros momentos da minha vida.

Aos professores da Universidade do Estado de Mato Grosso - UNEMAT- Campus Universitário de Sinop, entre eles, Rogério dos Reis Gonçalves, Milton Luiz Neri Pereira, Silvio Cesar Garcia Granja e Vera Lúcia Vieira de Camargo, pelos ensinamentos, companheirismo, amizade e confiança.

Aos amigos do LaPSEE, Marlon Borges Correia de Oliveira, Marcel Chuma Cerbantes, Jeferson Back Vanderlinde, Rodrigo Romais, Donizete Ritter, Carlos Antonio Dornellas, Mahdi Poukbari, Darwin Quijano, Carlos Sabillón Antúnez, Eduardo Souza, Jorge Hans Alayo Gamarra, Suzan Grazielli Benetti de Pádua, Inédio Arcari, Joel David Melo Trujillo e Waldemar Mathias Pereira Neto. Aos amigos de outros laboratórios, Henrique Carlos Diniz, Julio Cesar Uzinski e Luis de Oro Arenas.

A CAPES pelo apoio financeiro.

“Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito debaixo do céu. Há tempo de nascer e tempo de morrer; tempo de plantar e tempo de arrancar o que se plantou; tempo de matar e tempo de curar; tempo de derubar e tempo de edificar; tempo de chorar e tempo de rir; tempo de prantejar e tempo de dançar; tempo de espalhar pedras e tempo de ajuntar pedras; tempo de abraçar e tempo de afastar-se de abraçar; tempo de buscar e tempo de perder; tempo de guardar e tempo de lançar fora; tempo de rasgar e tempo de coser; tempo de estar calado e tempo de falar; tempo de amar e tempo de odiar; tempo de guerra e tempo de paz.

Eclesiastes 3:1-8.”

RESUMO

Neste trabalho propõe-se um algoritmo baseado na meta-heurística busca dispersa para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais, considerando como sistema de codificação uma estrutura denominada representação nó profundidade (RNP). O problema é modelado como não linear inteiro misto e considera como objetivo principal minimizar as perdas de potência ativa nos alimentadores do sistema de distribuição. Utiliza-se neste trabalho o modelo de cargas com potência constante, como também o modelo exponencial de cargas. O algoritmo proposto é implementado em linguagem de programação C++ e testado em quatro sistemas conhecidos na literatura, 14, 84, 136 e 202 barras. A partir dos resultados obtidos, verifica-se o bom desempenho do algoritmo, pois é capaz de gerar soluções de boa qualidade atendendo a todas as restrições físicas e operacionais do problema.

Palavras Chave – Reconfiguração de redes de distribuição. Busca dispersa. Representação nó profundidade.

ABSTRACT

This work proposes a scatter search algorithm to solve the electric power distribution system reconfiguration problem, considering the encoding system node depth representation. The problem is a mixed-integer nonlinear programming and the objective is to minimize the real power losses in the distribution system. It is used in the work load model with constant power, but also exponential model load. The proposed algorithm is implemented in C + +. The validity of the methodology is verified through four commonly case studies such as 14, 84, 136 and 202 bus system. Results show the effectiveness and good performance of the proposed algorithm, where it obtains the good quality solution satisfying the operational and physics constraints of problem.

Keywords - Distribution network reconfiguration. Scatter search. Node depth representation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de um grafo	26
Figura 2 - Ilustração do sistema de distribuição de energia elétrica de 14 barras	28
Figura 3 - Proposta original da meta-heurística busca dispersa	34
Figura 4 - Ilustração de um SDR com 3 alimentadores	44
Figura 5 - Ilustração dos nós de poda do operador PAO para o SDR da Figura 4	46
Figura 6 - Ilustração da matriz temporária do operador PAO	47
Figura 7 - Ilustração das matrizes finais do operador PAO	47
Figura 8 - Ilustração dos nós de poda do operador CAO	48
Figura 9 - Ilustração da matriz temporária do operador CAO	49
Figura 10 - Ilustração das matrizes finais do operador CAO	49
Figura 11 - Ilustração do sistema de distribuição radial	52
Figura 12 - Ilustração da aplicação do operador PAO	52
Figura 13 - Ilustração da aplicação do operador CAO	53
Figura 14 - Novo indivíduo gerado pelo operador EHR	53
Figura 15 - Ilustração das somas das correntes	55
Figura 16 - Diagrama de blocos do fluxo de potência de Shirmohammad	56
Figura 17 – Algoritmo de busca dispersa dedicado ao problema de reconfiguração	57
Figura 18 – Indivíduo 1: SDR da Figura 4 codificado pela RNP	60
Figura 19 – Indivíduo 2: SDR após a aplicação do operador CAO da RNP	60
Figura 20 – Dispersão dos conjuntos iniciais gerados	63
Figura 21 - Topologia inicial do sistema de 14 barras	64
Figura 22 - Níveis de tensão do sistema de 14 barras: modelo de potência constante	65
Figura 23 - Topologia inicial do sistema de 84 barras	66
Figura 24 – Iterações: sistema de 84 barras com modelo de potência constante	67
Figura 25 - Níveis de tensão do sistema de 84 barras: modelo de potência constante	68
Figura 26 - Topologia inicial do sistema de 136 barras	69
Figura 27 - Iterações: sistema de 136 barras com modelo de potência constante	70
Figura 28 - Níveis de tensão do sistema de 136 barras: modelo de potência constante	71
Figura 29 - Topologia inicial do sistema de 202 barras	73
Figura 30 – Iterações: sistema de 202 barras com modelo de cargas com potência constante	74
Figura 31 - Níveis de tensão do sistema de 202 barras: modelo de potência constante	75
Figura 32 - Níveis de tensão do sistema de 14 barras: modelo exponencial de cargas	77

Figura 33 – Iterações: sistema de 84 barras com modelo exponencial de cargas	78
Figura 34 – Níveis de tensão do sistema de 84 barras: modelo exponencial de cargas	79
Figura 35 – Iterações: sistema de 136 barras com modelo exponencial de cargas	81
Figura 36 – Níveis de tensão do sistema de 136 barras: modelo exponencial de cargas	82
Figura 37 – Iterações: sistema de 202 barras com modelo exponencial de cargas	83
Figura 38 – Níveis de tensão do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Graus do nó do grafo	26
Tabela 2 - Tipos de cargas e seus índices de sensibilidade	30
Tabela 3 – Lista de adjacências do grafo da Figura 4	45
Tabela 4 - Reconfiguração do sistema de 14 barras: modelo de potência constante	64
Tabela 5 – Custos anuais do sistema de 14 barras: modelo de potência constante	65
Tabela 6 - Reconfiguração do sistema de 84 barras: modelo de potência constante	67
Tabela 7 – Custos anuais do sistema de 84 barras: modelo de potência constante	68
Tabela 8 – Reconfiguração do sistema de 136 barras: modelo de potência constante	70
Tabela 9 – Custos anuais do sistema de 136 barras: modelo de potência constante	71
Tabela 10 - Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo de potência constante	72
Tabela 11 – Custos anuais do sistema de 202 barras: modelo potência constante	74
Tabela 12 - Reconfiguração do sistema de 14 barras: modelo exponencial de cargas	76
Tabela 13 – Custos anuais do sistema de 14 barras: modelo exponencial de cargas	76
Tabela 14 – Reconfiguração do sistema de 84 barras: modelo exponencial de cargas	78
Tabela 15 – Custos anuais do sistema de 84 barras: modelo exponencial de cargas	79
Tabela 16 - Reconfiguração do sistema de 136 barras: modelo exponencial de cargas	80
Tabela 17 – Custos anuais do sistema de 136 barras: modelo exponencial de cargas	81
Tabela 18 - Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas	83
Tabela 19 – Custos anuais do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas	84
Tabela 20 – Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo de potência constante	85
Tabela 21 – Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas	85
Tabela 22 – Reconfiguração do sistema de 202 barras com geração distribuída	86
Tabela 23 – Reconfiguração do sistema de 202 barras com geração distribuída	86
Tabela 24 - Dados do sistema teste de 14 barras	94
Tabela 25 - Dados do sistema teste de 84 barras	95
Tabela 26 - Dados do sistema teste de 136 barras	98
Tabela 27 - Dados do sistema teste de 202 barras	103

LISTA DE ABREVIATURAS

AG	Algoritmo Genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BD	Busca Dispersa
BT	Busca Tabu
CAO	<i>Change Ancestor Operator</i>
CI	Configuração inicial
CO	Configuração ótima
EHR	<i>Evolutionary History Recombination</i>
GRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
MPF	Modelo Pai-Filho
PAO	<i>Preserve Ancestor Operator</i>
RNP	Representação Nó Profundidade
SA	Simulated Annealing
SI	Sistema inicial
SR	Sistema Reconfigurado
SDR	Sistema de Distribuição Radial
VND	<i>Variable Neighborhood Descent</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Nó de adjacência dos operadores da RNP
A_{de}	Matriz inicial dos operadores da representação nó profundidade
A_i	Alimentador qualquer do SDR
α	Índice de sensibilidade dos modelos de cargas
A_{para}	Matriz resultante dos operadores da representação nó profundidade
A_{tmp}	Matriz temporária do operador PAO
A_{tmp1}	Matriz temporária do operador CAO
b	Dimensão do conjunto de referência
β	Índice de sensibilidade dos modelos de cargas
b_1	Soluções de qualidade do conjunto de referência
b_2	Soluções de diversidade do conjunto de referência
$d(x, y)$	Distância entre duas soluções x e y
$d_{min}(x, y)$	Distância mínima entre duas soluções x e y
$E(G)$	Conjunto de arestas de um grafo
G	Grafo qualquer
i_a	Índice do nó a
i_l	Índice do último nó do setor de barras que contém o nó p como raiz
i_p	Índice do nó p
I_{ij}	Corrente do i -ésimo ramo da configuração k
J_L^k	Injeção de corrente na linha L na iteração k
$N(G)$	Conjunto de nós de um grafo
nb	Número de barras do sistema de distribuição ($n_b = \Omega_b $)
n_x	Nó de índice x do sistema de distribuição radial
<i>NovosSubconjuntos</i>	Subconjuntos gerados através da etapa de combinação
N_r	Número de ramos da configuração k
p	Nó de poda dos operadores da RNP
P	Conjunto inicial da meta-heurística busca dispersa
P_{S_i}	Potência ativa fornecida pela subestação na barra i
P_{d_i}	Demanda de potência reativa na barra i
P_{ij}	Fluxo de potência ativa que sai da barra i para a barra j

P_i	Potência ativa na barra i
$Pool$	Conjunto que guarda as soluções após a etapa de melhoria local
P_k	Perdas ativas em todos os ramos da configuração k
$Psize$	Dimensão do conjunto P
p_x	Profundidade do nó de um grafo
Q_{S_i}	Potência reativa fornecida pela subestação na barra i
Q_{d_i}	Demanda de potência reativa na barra i
Q_i	Potência reativa na barra i
Q_{i_j}	Fluxo de potência reativa que sai da barra i para a barra j
r	Nó raiz do operador CAO
$RefSet$	Conjunto de Referência da meta-heurística busca dispersa
R_{ij}	Resistência do i -ésimo ramo da configuração k
s	Subconjunto qualquer do conjunto <i>NovosSubconjuntos</i>
S_i	Injeção de corrente complexa especificada na barra i
T	Topologia qualquer de um sistema de distribuição
V_{min}	Tensão mínima na i -ésima barra do sistema
V_{max}	Tensão máxima na i -ésima barra do sistema
V_i^0	Tensão na barra i na iteração 0
V_{ref}	Tensão na barra de referência
x^*	Soluções melhoradas na etapa de busca dispersa
x_{ij}	Variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está aberto ou fechado
Y_i^{sh}	Soma de todos os elementos shunt na barra i
Z_L	Impedância série na linha l
ΔP_i^k	Variação de potência ativa na barra i na iteração k
ΔQ_i^k	Variação de potência reativa na barra i na iteração k
pi	Vetor que guarda a ancestralidade de cada codificação gerada
II_x	Matriz que guarda a posição de cada vértice na RNP
Ω_b	Conjunto de barras do sistema
Ω_l	Conjunto de circuitos do sistema
Ω_{b_i}	Conjunto de barras do sistema conectadas na barra i

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	REVISÃO DA LITERATURA	19
1.1.1	MÉTODOS HEURÍSTICOS	20
1.1.2	META-HEURÍSTICAS	21
1.1.3	REDES NEURAIS E LÓGICA NEBULOSA	22
1.1.4	OTIMIZAÇÃO CLÁSSICA	22
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	23
2	OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	25
2.1	INTRODUÇÃO	25
2.2	RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	25
2.3	REPRESENTAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE GRAFOS	26
2.4	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS	28
2.5	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES BASEADO EM PLANEJAMENTO ANUAL	31
2.6	MODELO EXPONENCIAL DE CARGAS	31
2.7	CONCLUSÕES	32
3	A META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA	33
3.1	INTRODUÇÃO	33
3.2	ESTRUTURA BÁSICA DA META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA	34
3.2.1	ETAPA 1: GERAÇÃO DE SOLUÇÕES COM DIVERSIDADE	35
3.2.2	ETAPA 2: MELHORIA LOCAL	35
3.2.3	ETAPA 3: ATUALIZAÇÃO DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA	35
3.2.4	ETAPA 4: GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS	36
3.2.5	ETAPA 5: COMBINAÇÃO	36
3.2.6	ALGORITMO BÁSICO DE BUSCA DISPERSA	37
3.3	ESTRUTURAS AVANÇADAS DA META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA	38
3.3.1	USO DE MEMÓRIA	38
3.3.2	ATUALIZAÇÃO DINÂMICA DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA	38
3.3.3	RECONSTRUÇÃO E ATUALIZAÇÃO MULTICAMADAS	39
3.3.4	CONTROLE DE DIVERSIDADE	40
3.3.5	MÉTODO DE GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS	41
3.3.6	O USO DE BUSCA DISPERSA COM PATH RELINKING	41
3.4	CONCLUSÕES	42
4	REPRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS	43
4.1	INTRODUÇÃO	43

4.2	REPRESENTAÇÃO NÓ PROFUNDIDADE	43
4.2.1	OPERADOR PAO	46
4.2.2	OPERADOR CAO	48
4.2.3	DETERMINAÇÃO DE UM VÉRTICE NA REPRESENTAÇÃO NÓ PROFUNDIDADE	50
4.2.4	DETERMINAÇÃO DA TRIPLA DE VÉRTICES NA REPRESENTAÇÃO NÓ PROFUNDIDADE	51
4.2.5	OPERADOR EHR	51
4.3	FLUXO DE CARGA	53
4.4	CONCLUSÕES	56
5	ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA DEDICADO AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS	57
5.1	ETAPA 1: GERAÇÃO DE SOLUÇÕES COM DIVERSIDADE	58
5.2	ETAPA 2: MELHORIA LOCAL	59
5.3	ETAPA 3: CONSTRUÇÃO E ATUALIZAÇÃO DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA	59
5.4	ETAPA 4: GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS	61
5.5	ETAPA 5: COMBINAÇÃO	61
5.6	CONCLUSÕES	61
6	RESULTADOS	62
6.1	MODELO DE CARGAS COM POTÊNCIA CONSTANTE	62
6.1.1	SISTEMA DE 14 BARRAS	63
6.1.2	SISTEMA DE 84 BARRAS	66
6.1.3	SISTEMA DE 136 BARRAS	69
6.1.4	SISTEMA DE 202 BARRAS	72
6.2	MODELO EXPONENCIAL DE CARGAS	75
6.2.1	SISTEMA DE 14 BARRAS	75
6.2.2	SISTEMA DE 84 BARRAS	77
6.2.3	SISTEMA DE 136 BARRAS	80
6.2.4	SISTEMA DE 202 BARRAS	82
6.3	RECONFIGURAÇÕES BASEADAS NO AUMENTO DA DEMANDA DE CARGAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	85
6.4	RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAL COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	86
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	87
7.1	TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS	89
	ANEXO A - TRABALHO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO PELO AUTOR	93
	ANEXO B – DADOS DOS SISTEMAS TESTES	94

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência podem ser subdivididos em três sistemas principais: geração, transmissão e distribuição. Atualmente muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas nestes setores, visando a sua modernização, redução de custos, confiabilidade, qualidade, com especial atenção aos sistemas de distribuição de energia elétrica (SOUZA, 2013).

Os sistemas de distribuição de energia elétrica têm a função de transportar energia elétrica desde a subestação até os consumidores, através de seus alimentadores. Estes sistemas apresentam estruturas fracamente malhadas, mas operam de forma radial com o objetivo de fornecer baixas correntes de curto circuito e reduzir os custos com equipamentos de controle e proteção. Esta configuração fracamente malhada permite reconfigurações da rede para redução das perdas, isolamento de faltas em caso de contingências (processo de restauração da rede de distribuição), como também para a realização de manutenções preventivas (AMASIFEN, 2003).

A reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica consiste em alterar a topologia da rede através da abertura e fechamento de chaves de manobras, que operam nos estados normalmente aberto (A) e normalmente (F) e se localizam em pontos estratégicos da rede. Esta alteração da topologia para fins de reconfiguração com o objetivo de reduzir perdas e melhorar o perfil de tensão pode ocorrer em horários de pico, semanalmente, de acordo com a sazonalidade ou devido à natureza das várias cargas que compõem os alimentadores, sejam elas, comerciais, industriais e/ou residenciais.

O problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica é um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM) de natureza combinatória em que o espaço de busca de soluções é praticamente infinito para sistemas de distribuição reais. Para um sistema de distribuição de energia elétrica com x chaves de manobras, existem 2^x configurações possíveis, sendo que o estado aberto (A) / fechado (F) de muitas destas não correspondem às configurações (topologias) que satisfazem as restrições físicas e operacionais do sistema, desta forma tornando a solução do problema de reconfiguração de difícil tratamento.

As restrições que devem ser consideradas no problema são de caráter físicas e operacionais, entre elas, radialidade (considerada pela literatura de difícil tratamento), confiabilidade, níveis de tensão nos pontos de carga dentro dos limites especificados pelas normas reguladoras dos sistemas elétricos, fluxo de corrente máxima nos ramos e máximo fluxo de potência ativa nos alimentadores.

O problema de reconfiguração tem sido intensamente pesquisado e diversas metodologias são propostas na literatura para encontrar soluções de qualidade. Contudo, ainda surge a necessidade de melhorar o tempo de processamento dos algoritmos, como também modelos matemáticos mais realistas que possam obter resultados mais satisfatórios e precisos quando comparados com as condições reais de operação dos sistemas de distribuição.

Neste trabalho propõe-se um algoritmo baseado na meta-heurística busca dispersa (BD) dedicado ao problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais. Com o intuito de contornar a restrição de radialidade é utilizada como codificação uma estrutura denominada representação nó profundidade (RNP) (DELBEM, et al., 2004). Através desta codificação são utilizados os operadores PAO (do inglês, *Preserve Ancestor Operator*), CAO (do inglês, *Change Ancestor Operator*) (DELBEM, et al., 2004) e EHR (do inglês, *Evolutionary History Recombination*), (SANCHES, 2013) que permitem gerar soluções sempre radiais do ponto de vista dos sistemas elétricos. Estes operadores são utilizados no processo de busca da meta-heurística BD para encontrar soluções de boa qualidade para o problema.

Utiliza-se neste trabalho o modelo de cargas com potência constante, como também o modelo exponencial de cargas. O modelo exponencial de cargas permite modelar o sistema de distribuição de forma mais realista, obtendo-se assim valores mais precisos, haja vista que os elementos que compõe o sistema podem operar com corrente constante, impedância constante ou potência constante. Realiza-se também um estudo sobre os custos anuais das perdas dos sistemas de distribuição utilizando os modelos supracitados.

Para validar a metodologia proposta e verificar a eficiência computacional e robustez do algoritmo, são realizados testes em quatro sistemas conhecidos na literatura, 14 barras (CINVALAR et al., 1988), 84 barras (CHIOU; CHANG; SU; 2005), 136 barras (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000) e 202 barras Castro (1985). Na seção 1.1 apresenta-se uma breve revisão dos principais trabalhos da literatura envolvendo reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica.

1.1 REVISÃO DA LITERATURA

Diversos trabalhos foram publicados com diferentes técnicas para minimizar perdas através da reconfiguração de sistemas de distribuição radiais (SDRs), entre eles, métodos heurísticos, meta-heurísticas, otimização clássica, redes neurais e lógica nebulosa.

1.1.1 MÉTODOS HEURÍSTICOS

Primeiramente Merlin e Back (1975) conduziram pesquisas no ramo de minimização de perdas através da reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica. Os autores utilizaram um algoritmo heurístico construtivo em que todas as chaves do sistema estão inicialmente fechadas, formando uma rede malhada. O processo de busca de soluções realiza-se com a abertura das chaves que possuem os menores valores de perdas nos ramos, após serem avaliadas através de um fluxo de carga. O processo construtivo se repete até obter uma topologia radial para o sistema.

Cinvalar, et al. (1988), propuseram um método baseado em troca de chaveamentos mais conhecido como “troca de ramos” (do inglês, *branch exchange*). O método de busca inicia a partir de uma solução radial do sistema utilizando uma expressão matemática que permite encontrar as topologias com menores perdas através da abertura de uma chave normalmente fechada e o fechamento de uma chave normalmente aberta. Com essa troca de chaves, o sistema sempre é mantido de forma radial.

Baseado nos trabalhos de Merlin e Back (1975), Shirmohammad e Hong (1989) propuseram a busca de soluções para reduzir perdas através da reconfiguração dos sistemas de distribuição inserindo limites de tensão nos barramentos e limite máximo de fluxo de corrente nas linhas. Neste trabalho os autores também apresentaram um método para o cálculo de fluxo de carga de redes radiais que também pode ser adaptado para rede fracamente malhadas.

Baran e Wu (1989) utilizaram as ideias do trabalho de Cinvalar et al. (1988). Através de um processo heurístico, os autores introduzem dois métodos de cálculo de fluxo de potência após a transferência de cargas entre os alimentadores. No processo heurístico, a ideia central é a mesma utilizada por Cinvalar et al. (1988), ou seja, a troca de ramos. Contudo, buscam-se sempre configurações que produza as menores perdas ativas para o sistema.

Borozan et al. (1995), baseado nas ideias de Merlin e Back (1975), propuseram um algoritmo específico para o cálculo de fluxo de carga de redes fracamente malhadas. Foram realizados testes nos sistemas de 16, 33 e 69 barras para validar a metodologia proposta e verificar a sua eficiência computacional. Os resultados mostram soluções de boa qualidade na minimização de perdas quando comparadas com outras soluções da literatura.

Casari (1998) utilizou o critério de limite máximo de queda de tensão e busca em árvores do tipo *Branch and Bound* para encontrar as topologias que tivessem as menores perdas nos alimentadores do sistema de distribuição. Foram realizados testes nos sistema de 14, 32 e

69 barras e 136 barras. No processo heurístico foi utilizado um método rápido e aproximado para o fluxo de carga de redes radiais.

1.1.2 META-HEURÍSTICAS

Diversas metodologias foram propostas para minimizar perdas através da reconfiguração de redes de distribuição utilizando meta-heurísticas, entre elas, Algoritmo Genético (AG) (AMASIFEN, 2003; NARA et al., 1992; ROMERO, 2001), GRASP (do inglês, *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) (OLIVEIRA, 2011; SOUZA, 2013), Busca em Vizinhança Variável (ZVIETCOVICH, 2006), Busca Tabu (BT) (GUIMARÃES, 2005), Simulated Annealing (SA) (NARA; KITAGAWA, 1991) e otimização por Colônia de Formigas (PEREIRA, 2010).

A meta-heurística SA foi utilizada por Nara e Kitagawa (1991). A técnica se baseia no critério de solidificação de metais a alta temperatura. O processo de busca se inicia a partir de uma configuração radial do sistema. As configurações candidatas são geradas aleatoriamente através de um critério de vizinhança especificado e sua aceitação é avaliada através de um critério de probabilidade. O objetivo principal do trabalho é encontrar as configurações que minimizem as perdas do sistema.

A meta-heurística BT foi utilizada por (GUIMARÃES, 2005), juntamente com um método heurístico construtivo para realizar transições entre o espaço de busca. No algoritmo utilizou-se uma lista proibitiva (lista tabu) com a finalidade de evitar a ciclagem de soluções. O trabalho tem como principal objetivo a maximização da margem de segurança com relação à estabilidade da tensão e a redução de perdas. Foram realizados testes nos sistemas de 14, 33, 69, 84, 136 e 202 barras mostrando a robustez e a eficiência computacional do algoritmo.

Nara et al. (1992), utilizaram o AG na busca de minimização de perdas para o problema de reconfiguração. Através de critérios baseados na genética e seleção natural gera-se um conjunto de soluções iniciais, as quais são denominadas de pais e posteriormente criam-se cópias idênticas com menores perdas. Através do método de recombinação são geradas outras novas soluções, as quais são denominadas de filhos. Por fim aplica-se o processo de mutação com objetivo de eliminar as soluções malhadas.

Oliveira (2011) propõe um algoritmo baseado na meta-heurística GRASP para minimizar perdas de energia através da reconfiguração de redes de distribuição. O processo de busca de soluções inicia com todas as chaves do sistema fechadas e através da fase construtiva da meta-heurística, abrem-se as chaves que produzem topologias com menores perdas. No

algoritmo também é utilizada uma sub-rotina para verificar a formação de laços e as soluções encontradas são avaliadas através do fluxo de carga de Shirmohammad.

A Busca em Vizinhança Variável (ZVIETCOVICH, 2006) utiliza critérios heurísticos de busca em vizinhança para reduzir perdas através da reconfiguração. Nesse trabalho são utilizados dois algoritmos, VNS (do inglês, *Variable Neighborhood Search*) e VND (do inglês, *Variable Neighborhood Descendent*). A metodologia inicia o processo de busca a partir de uma solução radial e através da abertura /fechamento de chaves percorre-se a vizinhança das soluções.

1.1.3 REDES NEURAIS E LÓGICA NEBULOSA

As redes neurais também foram utilizadas no problema de reconfiguração para redução de perdas (BOUCHARD, 1993). São realizados treinamentos nas redes de Hopfield através de fatores de pesos de interconexão dos neurônios para encontrar as melhores configurações do sistema de 14 barras. Outra metodologia empregada por Lin (1998) foi a técnica de lógica nebulosa. Essa técnica foi implementada juntamente com a utilização de métodos heurísticos, sendo consideradas topologias malhadas durante o processo de busca. Contudo o objetivo do trabalho visa encontrar configurações que minimizem as perdas ativas nos alimentadores do sistema de distribuição.

1.1.4 OTIMIZAÇÃO CLÁSSICA

No ramo da otimização clássica, Merlin e Back (1975) conduziram pesquisas utilizando um algoritmo do tipo *branch and bound* para encontrar as melhores topologias que minimizassem as perdas ativas dos alimentadores através da reconfiguração. Glamocanin (1990) utilizou um problema de transportes do tipo quadrático com o uso do método *Simplex* para encontrar boas soluções com o objetivo de minimizar as perdas do sistema. Abur (1996b) desenvolveu uma modificação do método Simplex com o intuito de minimizar as perdas de energia. Contudo, as diferentes técnicas de otimização clássica só foram utilizadas para sistemas de pequeno porte, tornando-se muito complexas ao trabalhar com sistemas de médio e principalmente de grande porte.

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Esta dissertação tem os seguintes objetivos e contribuições:

- Revisão bibliográfica das diferentes metodologias utilizadas para resolver o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais, com vistas a reduzir as perdas do sistema.
- Implementação computacional de um algoritmo baseado na meta-heurística busca dispersa para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais.
- Implementação do modelo de carga exponencial, além do modelo de potência constante, de forma que possa obter resultados mais precisos quando comparados com a forma de operação dos equipamentos em um sistema de distribuição.
- Comparação dos resultados encontrados entre o modelo de cargas com potência constante e o modelo exponencial de cargas para o problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais.
- Comparação, análise e discussão dos resultados obtidos com outras metodologias utilizadas para resolver o problema de reconfiguração.

1.3 ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho está organizado em 7 capítulos. Este primeiro capítulo é introdutório, em que se apresenta uma breve introdução do problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica e uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos publicados nesta linha de pesquisa.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve descrição da teoria de grafos e o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição, abordando seus conceitos, modelo matemático, suas restrições e sua representação ilustrativa através de grafos.

No capítulo 3 são abordados os conceitos da meta-heurística BD detalhando suas cinco etapas fundamentais. Esta meta-heurística é utilizada para encontrar soluções de boa qualidade através do processo de busca.

No capítulo 4 apresenta-se a estrutura de dados denominada representação nó profundidade (RNP), utilizada como codificação para os sistemas de distribuição de energia elétrica

radiais. Juntamente com a RNP apresentam-se os operadores que fazem uso desta codificação, PAO, CAO e EHR que permitem gerar topologias sempre radiais quando aplicados a SDR. Neste capítulo também é descrito o método de fluxo de carga do tipo varredura utilizado para avaliar as topologias radiais geradas pelo algoritmo de busca dispersa.

No capítulo 5 apresenta-se o algoritmo de BD dedicado ao problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica. Apresentam-se também o uso dos operadores da RNP nas suas etapas fundamentais.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados do algoritmo de BD proposto. São realizados testes nos sistemas de 14, 84, 136 e 202 barras da literatura para validar a metodologia proposta, como também verificar a sua eficiência computacional. Considera-se o modelo de cargas com potência constante, como também o modelo exponencial de cargas.

No capítulo 7 apresentam-se as conclusões finais deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Nos anexos encontra-se o trabalho aceito para publicação pelo autor e os dados dos sistemas testes de 14, 84, 136 e 202 barras utilizados no algoritmo de busca dispersa proposto.

2 OS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo fornece uma breve descrição da teoria dos grafos que é utilizada como representação dos sistemas de distribuição de energia elétrica radiais. Também é abordado o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição e sua modelagem matemática. Por fim, apresenta-se o modelo exponencial de cargas.

2.2 RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica é modelado como um problema de programação não linear inteiro misto (PNLIM). A reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica consiste em alterar a topologia da rede através dos estados aberto e fechado das chaves de manobras do sistema, que se localizam em pontos estratégicos da rede, de modo a minimizar as perdas ativas nos alimentadores, melhorar o perfil de tensão para os consumidores e aumentar os níveis de confiabilidade (AMASIFEN, 2003).

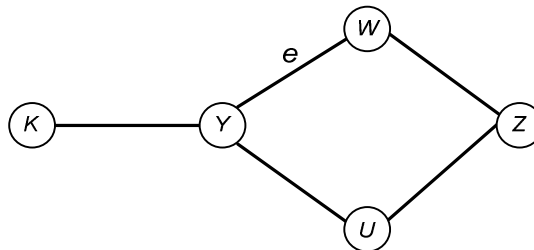
As chaves de manobras possuem os seguintes objetivos em um sistema de distribuição: proteção (isolamento de faltas), reconfiguração (gerenciamento da configuração) como também possibilita o isolamento de setores em caso de realização de manutenções preventivas. A alteração de topologia da rede pode ocorrer em horários de pico e semanalmente, de acordo com a sazonalidade, ou devido à natureza das várias cargas que estão presentes nestes alimentadores (comerciais, industriais e residenciais), pois o remanejamento de cargas permite melhorar o perfil de tensão da rede de distribuição, efetuar o balanceamento de cargas entre os alimentadores e conseqüentemente reduzir as perdas globais do sistema.

2.3 REPRESENTAÇÃO DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE GRAFOS

Muitos problemas podem ser representados por diagramas de pontos e linhas que se interconectam, em especial as redes elétricas, as quais são constituídas por barras e circuitos. Neste contexto, utiliza-se o conceito de grafo para representá-las.

Um grafo G consiste em um conjunto de nós $N(G)$ e um conjunto de arestas $E(G)$, sendo representado simbolicamente por $G = (N, E)$. Se Y e W são dois nós de um grafo e uma aresta e liga esses dois nós, diz-se que a aresta e é incidente aos nós Y e W . A ordem de um grafo G é dada respectivamente pelo número de nós $N(G)$ do grafo. A dimensão de um grafo G é dado pelo número de arestas $E(G)$ que contém esse grafo. O grau de um nó $N(G)$ é dado pelo número incidente de arestas $E(G)$ a esse nó. Na Figura 1 ilustra-se um grafo de dimensão 5 (5 arestas), de ordem 5 (5 nós) com os respectivos graus de cada nó (SANCHES, 2013).

Figura 1 - Ilustração de um grafo



Fonte: Sanches (2013)

Tabela 1 – Graus do nó do grafo

Nó	Grau
K	1
Y	3
W	2
Z	2
U	2

Fonte: Sanches (2013)

Dado um grafo G , a sequência $\{s_0, s_1\}, \{s_1, s_2\}, \dots, \{s_{m-1}, s_m\}$, em que todas as arestas são distintas é chamada de caminho. Portanto um caminho é uma sequência de nós em que

existe apenas uma aresta distinta para o nó seguinte. Se os nós s_0 e s_m são iguais, este caminho é chamado de ciclo.

Exemplo de um caminho: $\{K, Y\}, \{Y, W\}, \{W, Z\}$ e $\{Z, U\}$.

Exemplo de um ciclo: $\{Y, W\}, \{W, Z\}, \{Z, U\}$ e $\{U, Y\}$.

Um grafo G é conexo se existir caminho entre todos os seus nós. Um grafo acíclico G é um grafo sem ciclos. Uma árvore é um grafo acíclico conexo. Uma floresta é um grafo formado por um conjunto de árvores. Uma sub-árvore corresponde a um conjunto específico de nós de uma árvore sendo esta acíclica e conexa. Em cada árvore, denomina-se um de seus nós como nó raiz, o qual sempre é tomado como referência em relação aos outros. Nós terminais são os nós que possuem grau igual a 1, exceto o nó raiz.

Os sistemas de distribuição de energia elétrica podem ser representados através de grafos, sendo que cada topologia radial do sistema de distribuição pode ser codificada por uma floresta, cada alimentador com topologia radial pode ser representado por uma árvore, as barras podem ser representadas pelos nós do grafo e as chaves do sistema podem ser representadas por suas arestas. Esta representação é utilizada com a finalidade de facilitar a implementação e manipulação das estruturas de dados do algoritmo dedicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais (SANCHES, 2013).

Em uma configuração do sistema de distribuição (topologia), do ponto de vista da teoria dos grafos, têm-se os ramos que estão energizados, os quais formam a configuração radial do sistema, chamados de ramos de árvore e os ramos que não estão energizados, denominados ramos de ligação. Considera-se que em cada ramo exista uma chave, tal que nos ramos energizados as chaves estão normalmente fechadas e nos ramos de ligações as chaves estão normalmente abertas. Uma troca adequada de uma chave normalmente fechada (chave 3) por uma chave normalmente aberta (chave 16), ou seja, uma operação de chaveamento gera outra topologia radial do sistema, isto é, uma reconfiguração do sistema de distribuição (AMASIFEN, 2003).

Na Figura 2 apresenta-se a ilustração do sistema de distribuição radial de 14 barras, com 3 alimentadores, 13 chaves normalmente fechadas e 3 chaves normalmente abertas, representado por um grafo, sendo que cada nó representa as barras do sistema, enquanto que as linhas contínuas representam as chaves fechadas e as linhas pontilhadas representam as chaves abertas.

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall ij \in \Omega_l \quad (6)$$

$$\sum_{(ij) \in \Omega_l} x_{ij} = n_b - 1 \quad (7)$$

$$P_{di} = P_{d_{oi}} \cdot |\overline{V}_i|^\alpha \quad (8)$$

$$Q_{di} = Q_{d_{oi}} \cdot |\overline{V}_i|^\beta \quad (9)$$

em que:

P_k : perdas ativas em todos os ramos da configuração k ;

R_{ij} : resistência no ramo entre as barras i e j ;

I_{ij} : corrente no ramo entre as barras i e j ;

I_{max} : corrente máxima entre as barras i e j ;

N_R : número de ramos da configuração k ;

P_{S_i} : potência ativa fornecida pela subestação da barra i ;

P_{d_i} : demanda de potência ativa na barra i ;

$P_{d_{oi}}$: demanda de potência ativa na barra i na tensão nominal;

Q_{S_i} : potência reativa fornecida pela subestação da barra i ;

Q_{d_i} : demanda de potência reativa na barra i ;

$Q_{d_{oi}}$: demanda de potência reativa na barra i na tensão nominal;

P_{ij} : fluxo de potência ativa que sai da barra i para a barra j ;

Q_{ij} : fluxo de potência reativa que sai a barra i para barra j ;

x_{ij} : variável binária que determina se o circuito entre as barras i e j está aberto ou fechado;

Ω_b : conjunto de barras do sistema;

Ω_{bi} : conjunto de barras conectadas na barra i ;

Ω_l : conjunto de circuitos;

n_b : número de barras do sistema ($n_b = |\Omega_b|$);

V_{min} : tensão mínima na barra i ;

V_{max} : tensão máxima na barra i ;

V_i : tensão na barra i ;

$|V|_i$: tensão na barra i em pu;

A equação (1) representa a função objetivo do problema que é a minimização das perdas ativas nos alimentadores do sistema de distribuição. As restrições (2) a (9) do modelo são de naturezas físicas e operacionais. As restrições físicas estão relacionadas com a capacidade dos equipamentos da rede elétrica, entre elas, o fluxo máximo de corrente nos circuitos. As restrições operacionais estão relacionadas com as condições de operação do sistema, como por exemplo, radialidade, níveis de tensão nos pontos de carga, leis de Kirchoff, etc.

As equações (2) e (3) são baseadas na primeira e segunda lei de Kirchoff que devem ser mantidas com vistas a atender as demandas de potências ativa e reativa do sistema. A equação (4) representa a restrição do nível de tensão permitido pelas normas reguladoras dos sistemas elétricos, sendo que a subestação é responsável por determinar o nível de tensão fornecida ao consumidor. A equação (5) representa o fluxo máximo de corrente nos circuitos. Essa restrição está relacionada com a máxima intensidade de corrente que pode circular pelo condutor elétrico. A equação (6) representa a variável de decisão binária do problema, na qual pode assumir os estados aberto ou fechado. A equação (7) juntamente com as restrições (2) e (3) garantem a restrição de radialidade do sistema. As equações (8) e (9) representam o modelo de cargas utilizado, sendo que $\alpha = 0$ e $\beta = 0$ representa o modelo de cargas com potência constante. No modelo exponencial de cargas têm-se os valores estatísticos especificados na Tabela 2 que diferenciam entre si para os diferentes tipos de cargas utilizados, sejam elas industriais, residenciais ou comerciais. Estes valores permitem modelar de forma mais adequada os equipamentos da rede de distribuição (CASPER, 1995).

Tabela 2 - Tipos de cargas e seus índices de sensibilidade

Tipo de carga	α	β
Industrial	0,18	6
Comercial	1,04	4,19
Residencial	1,50	3,15

Fonte: Casper (1995)

2.5 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES BASEADO EM PLANEJAMENTO ANUAL

O planejamento anual de reconfigurações pode ser modelado matematicamente como:

$$\text{Min } C_k = \sum_{p=1}^P (\sum_{ij=1}^{N_R} (R_{ij} \cdot I_{ij}^2)) \cdot T_p \cdot C_p \quad (10)$$

Sujeito às restrições representadas pelas equações (2) a (9), em que C_k representa os custos de uma determinada configuração k em US\$, T_p representa o número de horas de um determinado tipo de carregamento p (leve, nominal ou pesado) e C_p representa os custos do carregamento p em US\$/kWh. Esta função objetivo busca obter uma única configuração ótima que pode ser utilizada em todo período anual e consequentemente fornecer os menores custos de operação do sistema.

2.6 MODELO EXPONENCIAL DE CARGAS

As cargas podem ser classificadas em três tipos principais em relação ao seu consumo em um sistema de distribuição de energia elétrica (AMASIFEN, 2003).

- Residenciais: as cargas residenciais dependem muito do tamanho da população, da sua posição econômico-financeira e das possibilidades de expansão do sistema.
- Comerciais: as cargas comerciais dependem da energia utilizada por lojas, shopping, escritórios, etc. Geralmente são utilizados grandes quantidades de equipamentos de computação, iluminação e refrigeração que demandam uma quantidade significativa de energia. Devido a sazonalidade, as cargas relacionadas à refrigeração de ambientes são bastante variáveis.
- Industriais: as cargas industriais são formadas pelos grandes consumidores que utilizam grandes quantidades de energia elétrica. Estas cargas não se relacionam diretamente com a sazonalidade.

A modelagem da carga é um dos fatores mais complexos em um sistema de distribuição. Mesmo que se conheçam todos os elementos individuais da carga e como eles se comportam individualmente, torna-se extremamente complicado conhecer a soma de todos estes elementos quando operados em conjunto em um sistema de distribuição (ARCANJO et al., 2010).

A maioria dos trabalhos de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais utiliza o modelo de cargas de potências ativa e reativa constante. Porém este modelo, nem sempre condiz com o modo de operação dos equipamentos presentes em um sistema de distribuição, que operam com modelo de potência constante, corrente constante ou impedância constante. Portanto não permitem quantificar de forma precisa as demandas de cargas do sistema. Com vistas a atender aos variados modelos de carga e obter resultados mais satisfatórios e precisos, voltados para as condições reais de operação do sistema, utiliza-se o modelo exponencial de cargas para melhor adequá-lo (ARCANJO et al., 2010).

2.7 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma breve introdução sobre a teoria de grafos que são utilizados abstrativamente para representar os sistemas de distribuição de energia elétrica. Apresentou-se também a modelagem matemática do problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais. Também foi apresentado o modelo exponencial de cargas que permite modelar de forma mais precisa os componentes de um sistema de distribuição de energia elétrica, quanto ao seu modo de operação, sejam eles, impedância constante, corrente constante ou potência constante.

3 A META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os conceitos gerais e de implementação da meta-heurística busca dispersa (BD). Destacam-se suas cinco etapas fundamentais abordando suas estratégias básicas e avançadas. Esta meta-heurística é utilizada como metodologia no processo de busca de soluções para o problema de reconfiguração.

A meta-heurística BD é um método de busca evolucionário proposto na década de 70, com extensão das teorias formuladas na década de 60 que utiliza estratégias de intensificação e diversificação, mostrando-se eficaz para diversos tipos de problemas de otimização (LAGUNA; MARTÍ, 2003). Esta meta-heurística utiliza uma sucessão de soluções iniciais coordenadas para gerar outras soluções. A proposta original da BD foi introduzida por Fred Glover em 1977 como uma heurística para resolver problemas de programação inteira. Nesta proposta Glover propõe que as soluções sejam geradas levando em consideração as características de várias partes do espaço de busca. A metodologia de BD é muito flexível permitindo vários níveis de complexidade e sofisticação em suas etapas (MARTÍ; LAGUNA; GLOVER, 2003).

A meta-heurística BD apesar de ser um método evolutivo, difere em algumas características do algoritmo genético, pois se baseia principalmente em características determinísticas (embora possa ser utilizada randomização controlada), enquanto o Algoritmo Genético (AG) baseia-se em características aleatórias. Outra diferença fundamental é que a BD trabalha com um conjunto com poucas soluções para aplicar o método de combinação e melhoria local, enquanto nos algoritmos genéticos trabalha-se com a dimensão do conjunto da população inicial relativamente grande.

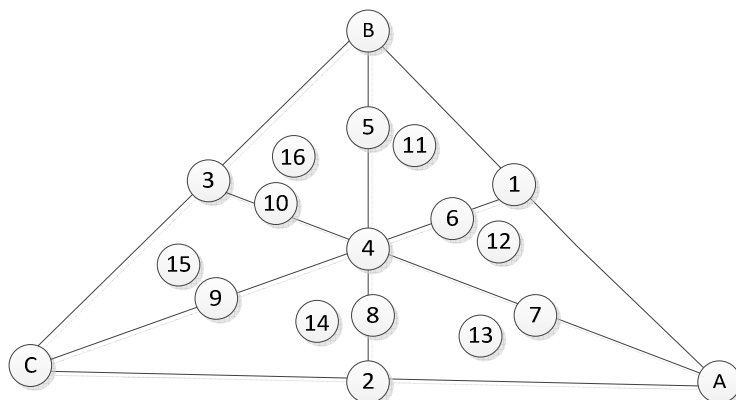
A meta-heurística BD opera com um conjunto de referência, denominado *RefSet*, o qual combina suas soluções para gerar outras. A combinação destas soluções tem como objetivo gerar melhores direções de busca, consequentemente soluções de melhor qualidade em relação à função objetivo. Geralmente realizam-se combinações convexas entre essas soluções pertencentes a *RefSet*, mas combinações não convexas também podem ser realizadas.

3.2 ESTRUTURA BÁSICA DA META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA

A filosofia da primeira versão da BD pode ser visualizada no conjunto de referência da Figura 3, em que se baseia a ideia central do algoritmo. As soluções A, B e C são as soluções que possuem características de diferentes partes do espaço de busca e que compõem o *RefSet*.

De maneira sistemática, através do *RefSet* são formados os subconjuntos $\{A, B\}$, $\{A, C\}$, $\{C, B\}$ e $\{A, B, C\}$ e são realizadas combinações convexas entre esses subconjuntos formando as soluções 1, 2, 3 e 4 respectivamente. Essas novas soluções coordenadas geradas, juntamente com os subconjuntos criados, são utilizadas para criar as novas soluções, 5, 6, 7, 8, 9 e 10. Por fim um método de melhoria local é aplicado nestas soluções geradas, criando as soluções 11, 12, 13, 14, 15 e 16 (LAGUNA; MARTÍ, 2003).

Figura 3 - Proposta original da meta-heurística busca dispersa



Fonte: Laguna (2002)

As implementações de BD são formadas por cinco etapas fundamentais: etapa de geração de soluções com diversidade, etapa de melhoria local, etapa de construção/atualização do conjunto de referência, etapa de geração de subconjuntos e etapa de combinação, sendo o que difere de uma implementação simples de uma avançada são as modificações feitas nestas etapas.

3.2.1 ETAPA 1: GERAÇÃO DE SOLUÇÕES COM DIVERSIDADE

Esta etapa é a base inicial do algoritmo. Empregam-se randomização controlada e frequência baseada em memória para gerar um conjunto P de soluções diversas. Este conjunto de dimensão $Psize$ possui soluções que atendem aos critérios de qualidade e diversidade. Para a geração de soluções com diversidade, pode ser utilizado o método encontrado em (LAGUNA; MARTÍ, 2003), baseado em critérios de probabilidade com frequência baseada em memória. Do conjunto P é extraído o conjunto $RefSet$ de maneira determinística de dimensão b .

3.2.2 ETAPA 2: MELHORIA LOCAL

Nesta etapa visa-se melhorar a qualidade da função objetivo da solução, ou tornar uma solução infactível em uma solução factível, através de um método de busca local. Geralmente realiza-se uma busca na vizinhança da solução, convergindo quando nenhuma melhoria pode ser detectada.

3.2.3 ETAPA 3: ATUALIZAÇÃO DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA

Esta etapa é responsável pela construção/atualização do conjunto de referência, denominado $RefSet$. O $RefSet$ é o conjunto que armazena soluções de qualidade e diversidade que são utilizadas para gerar novas soluções no método de combinação. O $RefSet$ é extraído do conjunto P criado na etapa de geração de soluções com diversidade.

A dimensão do $RefSet$ é denotada por $b = b_1 + b_2$, onde b_1 são as soluções escolhidas pelo critério de qualidade e b_2 são as soluções escolhidas pelo critério de diversidade. A atualização do $RefSet$ é realizada através de um processo iterativo, compreendendo o método de geração de subconjuntos, combinação e melhoria local.

Para a construção do $RefSet$ realiza-se a ordenação do conjunto P em relação ao valor da função objetivo $P = \{x_1, x_2, \dots, x_{Psize}\}$, em que $f(x_1) < f(x_2), \dots, < f(x_{Psize})$, sendo a primeira solução x_1 de melhor qualidade que as outras soluções do conjunto, e x_{Psize} a pior solução do conjunto P , considerando um problema de minimização, de forma que as soluções

de melhor qualidade b_1 são retiradas do conjunto P e incorporadas no *RefSet*. Dessa forma o conjunto *RefSet* atende ao critério de qualidade.

Após inserir qualidade no *RefSet*, deve-se incorporar diversidade, ou seja, incluir as soluções mais diversas do conjunto $(P - \text{RefSet})$. Assim o *RefSet* é formado pelas soluções de qualidade e diversidade, isto é, $b = b_1 + b_2$. Para calcular a diversidade pode ser utilizado o critério da distância euclidiana (LAGUNA; MARTÍ, 2003), ou qualquer outra técnica especializada capaz de encontrar diversidade entre as soluções, em função das características físicas do problema sob estudo.

3.2.4 ETAPA 4: GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS

Esta etapa consiste em gerar subconjuntos através do *RefSet* para serem submetidos à etapa de combinação. Tipicamente utilizam-se duas soluções do *RefSet* para gerar subconjuntos. Contudo, estes subconjuntos podem ser gerados utilizando mais que duas soluções, o que, geralmente, é aplicado nas estruturas avançadas de BD. Nesta etapa também é criado o conjunto *NovosSubconjuntos* que armazena todos os subconjuntos s formados com pelo menos uma nova solução do *RefSet*.

3.2.5 ETAPA 5: COMBINAÇÃO

Esta etapa utiliza os subconjuntos gerados na etapa de geração de subconjuntos para criar novas soluções denominadas soluções testes. Depois de combinadas, essas soluções testes passam pelo método de melhoria local e são armazenadas no conjunto *Pool*. Esta etapa termina quando todos os subconjuntos foram combinados e o *RefSet* foi atualizado.

O *RefSet* é atualizado com as b melhores soluções pertencentes a união dos conjuntos *RefSet* e *Pool*. O critério de convergência da meta-heurística BD ocorre quando o *RefSet* não é mais atualizado, ou seja, quando não existem novas soluções para compô-lo.

3.2.6 ALGORITMO BÁSICO DE BUSCA DISPERSA

O algoritmo básico da meta-heurística BD consiste dos seguintes passos:

- i. Iniciar com $P = \emptyset$. Use a etapa de geração de soluções com diversidade para construir uma solução x . Aplique a etapa de melhoria local em x para obter a solução melhorada x^* . Se x^* pertence a P , descarte x^* , caso contrário adicione x^* a P . Repita o passo até $|P| = Psize$, sendo $Psize$ a dimensão do conjunto P .
- ii. Ordenar as soluções do conjunto P de acordo com o valor da função objetivo (onde a solução de melhor qualidade é a primeira da lista). Adicione as primeiras b_1 soluções em $RefSet$ e as exclua do conjunto P .
- iii. Para cada solução x em $(P - RefSet)$ e y em $RefSet$, calcule a distância $d(x, y)$. Selecione a solução x' que maximize $d_{min}(x)$, onde $d_{min}(x) = \min_{y \in RefSet} d\{x, y\}$. Adicione x' no $RefSet$ e exclua-a do conjunto P . Repetir esse passo b_2 vezes. Faça (*SolucaoNova* = verdadeiro).

Enquanto (*SolucaoNova* = verdadeiro), faça:

- iv. Gere *NovoSubconjuntos* pela etapa de geração de subconjuntos, contendo todos os subconjuntos com duas soluções que não foram combinadas em iterações anteriores. Faça *SolucaoNova* = Falso.

Enquanto (*NovosSubconjuntos* $\neq \emptyset$):

- v. Selecione o próximo subconjunto s em *NovosSubconjuntos*.
- vi. Aplique a etapa de combinação em s para obter três soluções testes em x .
- vii. Aplique o método de melhoria local nas soluções testes x para obter as soluções melhoradas x^* .
- viii. Adicione as soluções melhoradas x^* no conjunto *Pool* e exclua s de *NovosSubconjuntos*.

Fim enquanto

- ix. Aplique a etapa de atualização do conjunto de referência selecionando as b melhores soluções dos conjuntos *RefSet* e *Pool*.

Se (*RefSet* atualizado possui alguma solução nova) então:

- x. Faça (*SolucaoNova* = Verdadeiro), ou seja, volte ao passo iv.

Fim se

Fim enquanto

3.3 ESTRUTURAS AVANÇADAS DA META-HEURÍSTICA BUSCA DISPERSA

Apresentam-se a seguir algumas estruturas avançadas da meta-heurística BD. A diferença fundamental entre uma implementação simples e avançada desta meta-heurística são as modificações realizadas nas suas cinco etapas fundamentais.

3.3.1 USO DE MEMÓRIA

Busca dispersa considera o uso de memória implícita em seu processo iterativo através da atualização do conjunto de referência, do método de combinação de soluções e do método de geração de subconjuntos. O conjunto de referência é responsável por armazenar as melhores soluções encontradas durante todo o processo de busca, fornecendo a base para encontrar as melhores soluções através do método de combinação e melhoria local.

Esse tipo de memória é chamado de memória de herança. O uso de memória adaptativa, usada em busca tabu, ao ser utilizada na BD pode melhorar significativamente o desempenho da metodologia quando aplicada a problemas mais complexos. No caso a memória adaptativa pode ser tanto explícita, quanto atributiva. No tipo de memória explícita as soluções de elite são armazenadas durante o processo de busca e no tipo de memória atributiva realiza-se o registro de atributos utilizados ao realizar transições entre as soluções.

3.3.2 ATUALIZAÇÃO DINÂMICA DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA

A forma de construir e atualizar o *RefSet* é a etapa mais importante da meta-heurística BD. Mesmo que se tenha um método poderoso de combinação, o *RefSet* deve ser construído adequadamente para que se obtenha um bom conjunto de soluções (LAGUNA; MARTÍ, 2003). Na estratégia básica, as atualizações do *RefSet* são realizadas de maneira estática, ou seja, todas as soluções passam pela etapa de combinação e melhoria local para depois serem analisadas se podem ou não ser incluídas no *RefSet*.

Na atualização dinâmica, gera-se uma solução com as etapas de combinação e melhoria local e, sequencialmente, avalia se a mesma pode ser incorporada no *RefSet*. Portanto, o *RefSet* pode ser atualizado de três formas distintas: dinâmico por qualidade, dinâmico por qualidade e diversidade, ou de maneira estática por qualidade e diversidade (estratégia básica

de BD). A vantagem da atualização dinâmica é que se o *RefSet* tem soluções com qualidade inferior, essas soluções são rapidamente substituídas e as soluções futuras são geradas com melhores soluções no método de combinação. A desvantagem é que soluções promissoras podem ser descartadas no início do processo, pois caso não sejam incluídas no conjunto referência, não são combinadas futuramente.

3.3.3 RECONSTRUÇÃO E ATUALIZAÇÃO MULTICAMADAS

A estrutura multicamadas sugere que o *RefSet* seja atualizado dinamicamente por qualidade e diversidade, sendo a estrutura de BD de duas ou três camadas. Na estrutura de duas camadas o *RefSet* é composto por dois subconjuntos, $RefSet_1 = \{x_1, x_2, \dots, x_{b_1}\}$ que armazena as soluções de qualidade ordenadas pelo valor da função objetivo $f(x_1) \leq f(x_2), \dots, f(x_{b_1})$, sendo $f(x_1)$ o melhor valor da função objetivo e $f(x_{b_1})$ o pior valor da função objetivo, considerando um problema de minimização e $RefSet_2 = \{x_{b_1+1}, x_{b_1+2}, \dots, x_{b_1+b_2}\}$, que armazena as soluções de diversidade, sendo x_{b_1+1} a solução mais diversa e $x_{b_1+b_2}$ a solução menos diversa.

Ao gerar uma solução teste x^* , avalia-se primeiramente se esta solução pode ser incluída no conjunto $RefSet_1$ pelo critério de qualidade, ou seja, a solução teste deve ser melhor que a pior solução do $RefSet_1$, isto é, $f(x^*) < f(x_{b_1})$. Caso não atenda esse requisito verifica-se se a solução pode ser incorporada no conjunto $RefSet_2$ pelo critério de diversidade. Caso x^* seja mais diversa que a pior solução do $RefSet_2$, ou seja, x^* mais diversa que $x_{b_1+b_2}$, incorpora-se x^* no conjunto $RefSet_2$ substituindo $x_{b_1+b_2}$. Caso não atenda aos requisitos de qualidade e diversidade, a solução teste x^* é descartada e gera-se uma nova solução teste. Quando uma solução é incorporada em algum dos dois conjuntos, deve-se reordenar novamente o conjunto *RefSet*. Neste caso o *RefSet* é formado por $RefSet = RefSet_1 + RefSet_2$.

A atualização em três camadas é realizada com a inserção de um terceiro conjunto $RefSet_3 = \{x_{b_1+b_2+1}, x_{b_1+b_2+2}, \dots, x_b\}$ que armazena os melhores geradores, que são as soluções que não são excelentes em relação ao valor da função objetivo, mas geram descendentes de excelente qualidade.

3.3.4 CONTROLE DE DIVERSIDADE

Busca dispersa não permite que existam soluções duplicadas no *RefSet*. Para que não haja essas duplicações em todas as soluções que são incorporadas no *RefSet* gerando grande esforço computacional, pode ser utilizada a função *hash* representada por (LAGUNA; MARTÍ, 2002):

$$hash = \sum_{i=1}^m (i.p(i^2)) \quad (11)$$

em que:

p : quantidade de permutações possíveis de um conjunto;

m : quantidade de elementos de um conjunto;

Primeiramente verificam-se se duas soluções possuem a mesma função objetivo. Caso isso ocorra então é analisada a função *hash*. Caso duas soluções possuam o mesmo valor para a função *hash*, um comparativo de elemento a elemento das duas soluções deve ser efetuado.

Embora as estratégias básicas de BD verifiquem se o *RefSet* possui duplicações, elas não monitoram o controle de diversidade nas soluções b_1 , sendo elas somente analisadas pelo critério de qualidade. Nas estratégias avançadas considera-se um controle de diversidade nas b_1 melhores soluções em relação à função objetivo que são incorporadas no *RefSet* da seguinte forma: primeiramente retira-se a solução x com melhor função objetivo do conjunto P e incorpora-a no conjunto *RefSet*. Novamente escolhe-se a melhor solução do conjunto P , mas essa solução somente fará parte do *RefSet* se possuir diversidade em relação às soluções que já compõem este conjunto, ou seja:

$$d_{min}(x) < MinDist \quad (12)$$

em que *MinDist* é um valor pré-definido de diversidade. Todas as b_1 soluções são escolhidas repetindo este mesmo processo, ou seja, atendendo ao critério de diversidade e qualidade instantaneamente.

3.3.5 MÉTODO DE GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS

Essa etapa não está limitada em gerar apenas duas soluções, portanto em geral, podem-se criar subconjuntos de diferentes dimensões. O método de geração de subconjuntos através do conjunto de referência procura gerar subconjuntos de dimensões variadas proporcionando que se criem subconjuntos com duas, três, até b dimensões, sendo b a dimensão do *RefSet*. Assim o método de geração de subconjuntos poderá ser classificado como:

- Subconjunto tipo 1: todos os subconjuntos contendo 2 soluções.
- Subconjunto tipo 2: subconjuntos de 3 soluções derivados de subconjuntos de 2 soluções incluindo a melhor solução do *RefSet* que ainda não faz parte deste subconjunto.
- Subconjunto tipo 3: subconjuntos de 4 soluções derivados de subconjuntos de 3 soluções incluindo a melhor solução do *RefSet* que ainda não faz parte deste subconjunto.
- Subconjunto tipo 4: subconjuntos contendo as melhores i soluções de qualidade do *RefSet* para $i = 5$ até b , sendo b a quantidade total de soluções do *RefSet*.

3.3.6 O USO DE BUSCA DISPERSA COM PATH RELINKING

Path Relinking pode ser incorporado com a meta-heurística BD no método de combinação de soluções. Este método foi inicialmente sugerido para integrar critérios de intensificação e diversificação no contexto de busca tabu (MARTÍ; LAGUNA; GLOVER, 2003). Esta técnica integra uma busca através da trajetória de soluções de alta qualidade, partindo inicialmente de uma das soluções, chamada de solução inicial, percorrendo um espaço de busca até que se encontre outra solução de alta qualidade, chamada de solução guia. Tal caminho é construído com movimentos que contém informações da solução guia. O caminho inverso também pode ser realizado, ou seja, transforma-se a solução guia em solução inicial e a solução inicial em solução guia. Também pode-se fazer que as soluções movimentem-se uma em direção à outra.

Como essa metodologia é utilizada na etapa de combinação, as melhores soluções encontradas passam pelo método de melhoria local e são armazenadas no conjunto *Pool* que juntamente com as soluções do conjunto de referência, produzem o novo conjunto de referência atualizado com as melhores soluções encontradas neste processo.

3.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se a meta-heurística BD juntamente com as suas cinco etapas fundamentais com vistas a ser aplicada no problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais. Foram apresentadas estratégias básicas, quanto avançadas da meta-heurística BD.

4 REPRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a representação nó profundidade (RNP), (DELBEM, et al., 2004) que é o sistema utilizado neste trabalho como codificação de sistemas de distribuição radiais de energia elétrica. Juntamente com este tipo de codificação apresentam-se os operadores PAO (do inglês, *Preserve Ancestor Operator*) e CAO (do inglês, *Change Ancestor Operator*) (DELBEM, et al., 2004), utilizados para realizar a transferência de barras entre os alimentadores de um sistema de distribuição e o operador EHR, responsável pela combinação de duas topologias radiais. Descreve-se também um algoritmo para determinar um vértice na RNP. Por fim é descrito o método de fluxo de carga do tipo varredura, utilizado para avaliar as topologias radiais geradas.

4.2 REPRESENTAÇÃO NÓ PROFUNDIDADE

O tipo de codificação utilizada é de fundamental importância para qualquer tipo de problema que envolva meta-heurísticas. Neste trabalho utiliza-se uma codificação denominada representação nó profundidade, que permite a codificação dos sistemas de distribuição de redes de energia elétrica radiais. Através desta codificação utilizam-se os operadores PAO e CAO que permitem gerar topologias sempre radiais e conexas para os alimentadores, quando aplicados ao sistema de distribuição. Também apresenta-se o operador EHR (do inglês, *Evolutionary History Recombination*) (SANCHES, 2013) que permite criar soluções sempre radiais através da combinação de duas soluções. Algumas vantagens da RNP e seus operadores são:

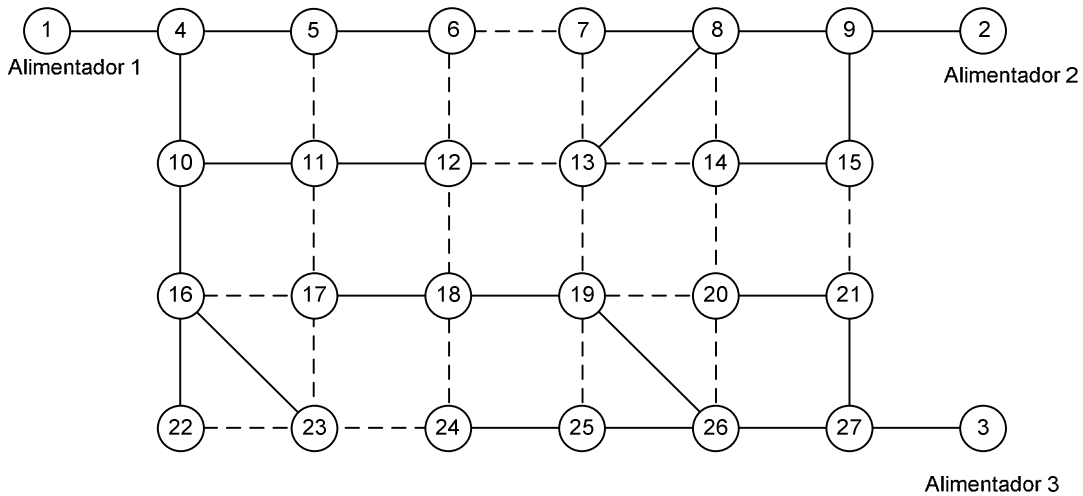
- Produzem exclusivamente configurações radiais do ponto de vista dos sistemas elétricos.
- Comparados com outras estruturas a RNP pode gerar mais configurações radiais em um mesmo período de tempo.

- Apresenta complexidade computacional de ordem $O\sqrt{nb}$, onde nb é o número de barras do sistema.

- As configurações geradas pela RNP são ordenadas de acordo com o Modelo Pai-Filho (MPF), possibilitando a execução de um algoritmo de fluxo de carga tipo varredura direta/inversa.

A RNP é baseada numa proposta de uma lista de dimensão, $2 \times nb$ onde nb é a quantidade de barras de um alimentador. A lista é formada por pares do tipo (n_x, p_x) , onde n_x representa a barra do alimentador e p_x sua respectiva profundidade. Na Figura 4 ilustra-se um sistema de distribuição radial com 3 alimentadores codificado pela RNP. Inicialmente é armazenada a profundidade em relação aos nós raízes dos alimentadores, ou seja, os nós 1, 2 e 3 relacionados, respectivamente, aos alimentadores 1, 2 e 3 sendo as demais profundidades calculadas em relação ao nó raiz de cada alimentador. Assim pode-se codificar qualquer sistema de distribuição radial utilizando a RNP.

Figura 4 - Ilustração de um SDR com 3 alimentadores



Alimentador 1: $\begin{matrix} \text{Nó} \\ \text{Prof} \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 6 & 10 & 11 & 12 & 16 & 22 & 23 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 3 & 4 & 4 \end{bmatrix}$

Alimentador 2: $\begin{matrix} \text{Nó} \\ \text{Prof} \end{matrix} \begin{bmatrix} 2 & 9 & 15 & 14 & 8 & 7 & 13 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix}$

Alimentador 3: $\begin{matrix} \text{Nó} \\ \text{Prof} \end{matrix} \begin{bmatrix} 3 & 27 & 21 & 20 & 26 & 19 & 18 & 17 & 25 & 24 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & 3 & 4 \end{bmatrix}$

Fonte: Santos (2009)

A ordem em que nó e profundidade são considerados na lista é de grande importância. Para uso dos operadores da RNP faz-se também necessária uma lista de adjacências, a qual

contém todos os nós adjacentes de um determinado nó em um sistema de distribuição radial. A lista de adjacências do sistema de distribuição da Figura 4 é mostrada na Tabela 3:

Tabela 3 – Lista de adjacências do grafo da Figura 4

Nó	Nós adjacentes	Nó	Nós adjacentes	Nó	Nós adjacentes
1	4	10	4-11-16	19	13-18-20-25-26
2	9	11	5-10-12-17	20	14-19-21-26
3	27	12	6-11-13-18	21	15-20-27
4	1-5-10	13	7-8-12-14-19	22	16-23
5	4-6-11	14	8-13-20-15	23	16-17-22-24
6	5-7-12	15	9-14-21	24	18-23-25
7	6-8-13	16	10-17-22-23	25	19-24-26
8	7-9-13-14	17	11-16-18-23	26	19-20-25-27
9	2-8-15	18	12-17-19-24	27	3-21-26

Fonte: Santos (2009)

A lista de adjacências mostra as possíveis conexões entre os alimentadores do sistema de distribuição, isto é, representa as possíveis conexões de barras através das chaves de manobras, como também representa as possíveis ligações entre as chaves de manobras após a aplicação dos operadores da RNP. A lista de adjacências não muda durante a aplicação dos operadores da RNP enquanto as topologias estão sendo geradas.

Para a geração de soluções sempre radiais, utilizam-se os operadores PAO e CAO, que são descritos nas seções seguintes. Esses operadores realizam a transferência de barras entre os alimentadores do sistema de distribuição.

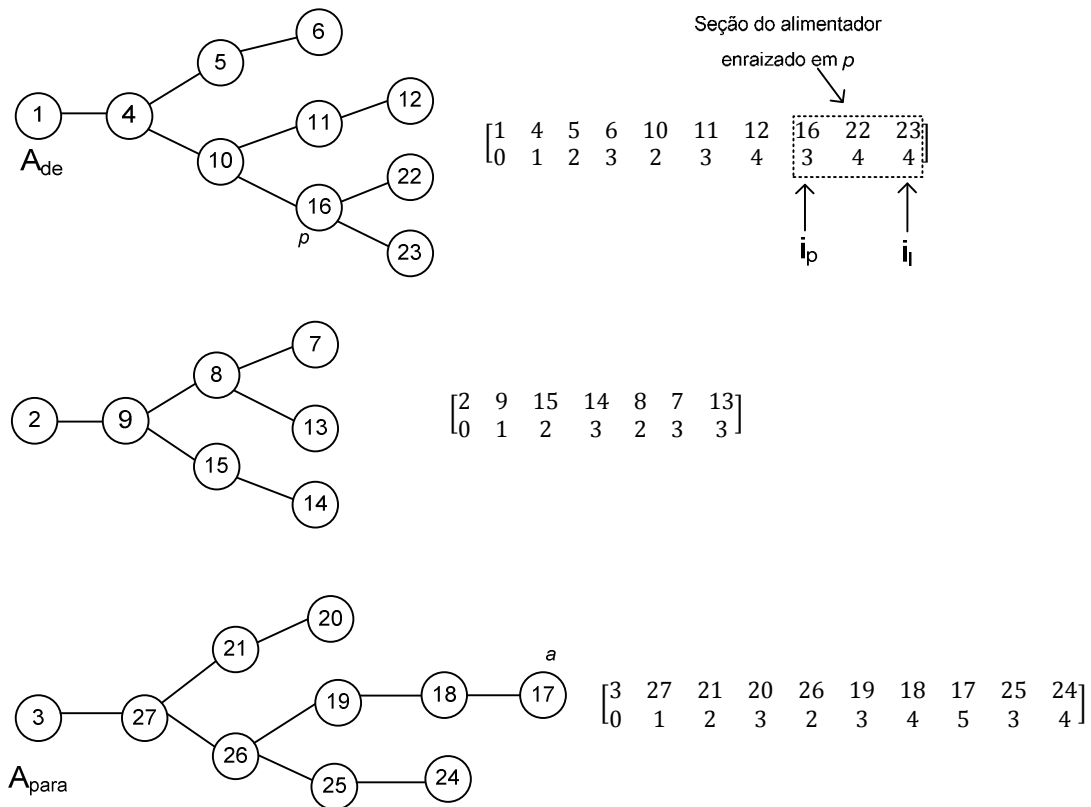
A diferença fundamental entre os operadores PAO e CAO da RNP é que o operador PAO produz mudanças mais simples, pois o nó de poda é o nó raiz no próximo alimentador do setor a ser transferido, enquanto que no operador CAO as mudanças são mais complexas, pois qualquer nó do alimentador podado poderá ser o nó raiz, desde que tenha elementos adjacentes em outro alimentador que permita realizar a transferência de barras (SANTOS, 2009).

4.2.1 OPERADOR PAO

O operador PAO requer a definição de duas matrizes denominadas de A_{para} (alimentador de origem) e A_{de} (alimentador de destino) e dois nós de um sistema de distribuição previamente definidos como a e p , sendo o nó a adjacente do nó p e seus índices denotados por i_a e i_p respectivamente. O operador PAO segue os seguintes passos para realizar a transferência de nós de um sistema de distribuição entre seus alimentadores:

- i. Determine a posição dos índices (i_p, i_l) , entre as linhas tracejadas da Figura 5, que corresponde a matriz A_{de} , sendo i_l o índice do último nó da seção do alimentador correspondente ao alimentador de origem que contém o nó p como raiz.

Figura 5 - Ilustração dos nós de poda do operador PAO para o SDR da Figura 4

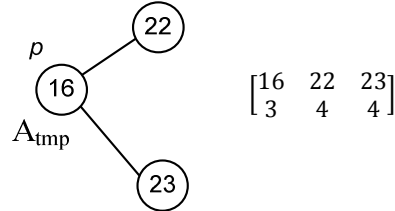


Fonte: do próprio autor

- ii. Armazene as posições com a respectiva profundidade (i_p, i_l) da matriz A_{de} em uma matriz temporária chamada A_{tmp} (Figura 6). A profundidade de cada nó dessa matriz temporária é atualizada segundo a equação: $p_x = p_x - p_p + p_a + 1$, onde p_x , p_p e p_a são as profundidades dos nós x , p e a respectivamente, sendo que os nós x

são formados pelo nó p e os nós consecutivos da matriz A_{de} entre o conjunto (i_p, i_l) com profundidade maior que p_p .

Figura 6 - Ilustração da matriz temporária do operador PAO



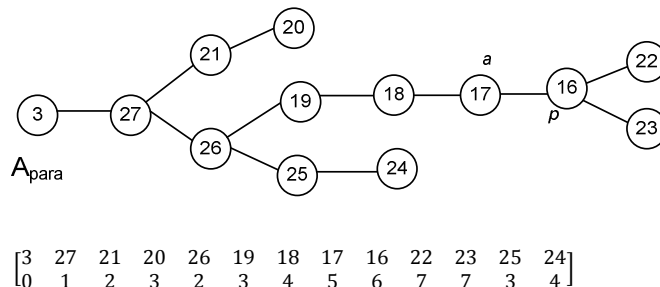
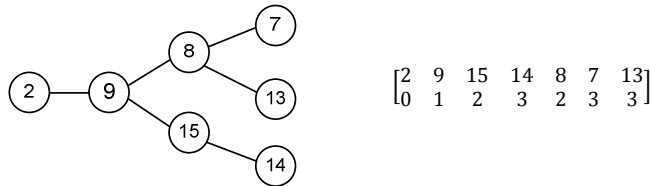
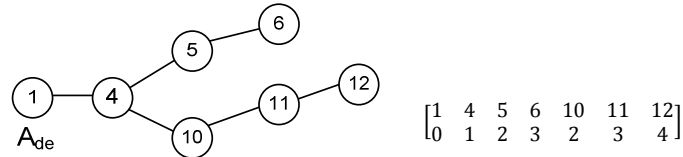
Fonte: do próprio autor

iii. Construa a matriz A_{para} , contendo os nós de A_{para} mais a matriz temporária A_{tmp} que é incorporada na posição $i_a + 1$ dessa matriz.

iv. Construa a matriz A_{de} que possua os nós de A_{de} sem os nós da matriz temporária A_{tmp} .

v. Atualizam-se os dados dos alimentadores de origem e destino, de modo que o sistema correspondente após a aplicação do operador PAO é mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Ilustração das matrizes finais do operador PAO



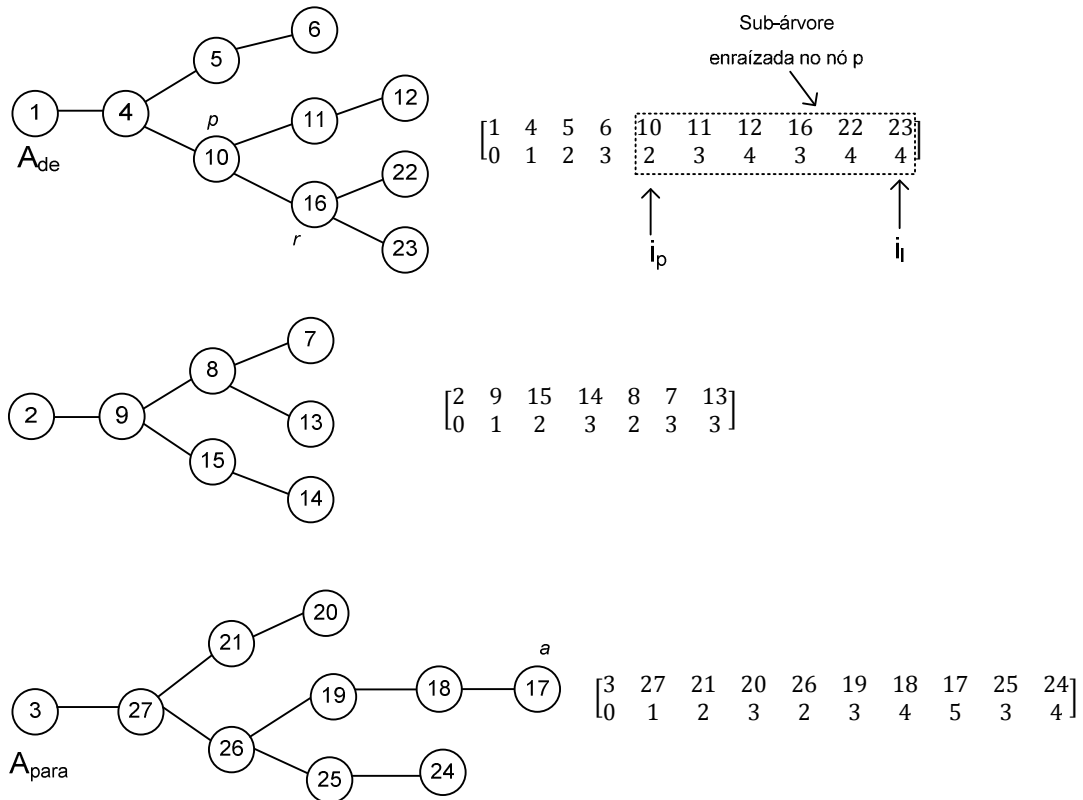
Fonte: do próprio autor

4.2.2 OPERADOR CAO

O operador CAO é bem similar ao operador PAO apresentado anteriormente. O operador trabalha com o nó de poda p e o nó raiz r pertencente à matriz A_{de} e o nó adjacente a pertencente à matriz A_{para} , sendo estes nós previamente definidos.

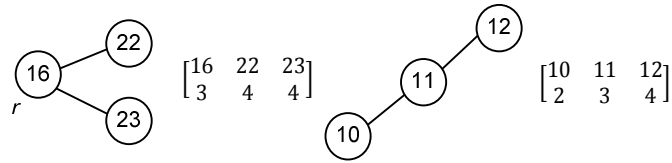
O procedimento do operador CAO é diferente do operador PAO nos passos 2 e 3, ou seja, na formação da matriz correspondente à seção do alimentador a ser podada e no armazenamento da matriz temporária. No primeiro passo deve-se trocar o índice i_p por i_r , do operador PAO. No próximo passo consideram-se os nós de r até p da matriz A_{de} (Figura 8), sendo $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$, onde $r_0 = r$ e $r_n = p$.

Figura 8 - Ilustração dos nós de poda do operador CAO



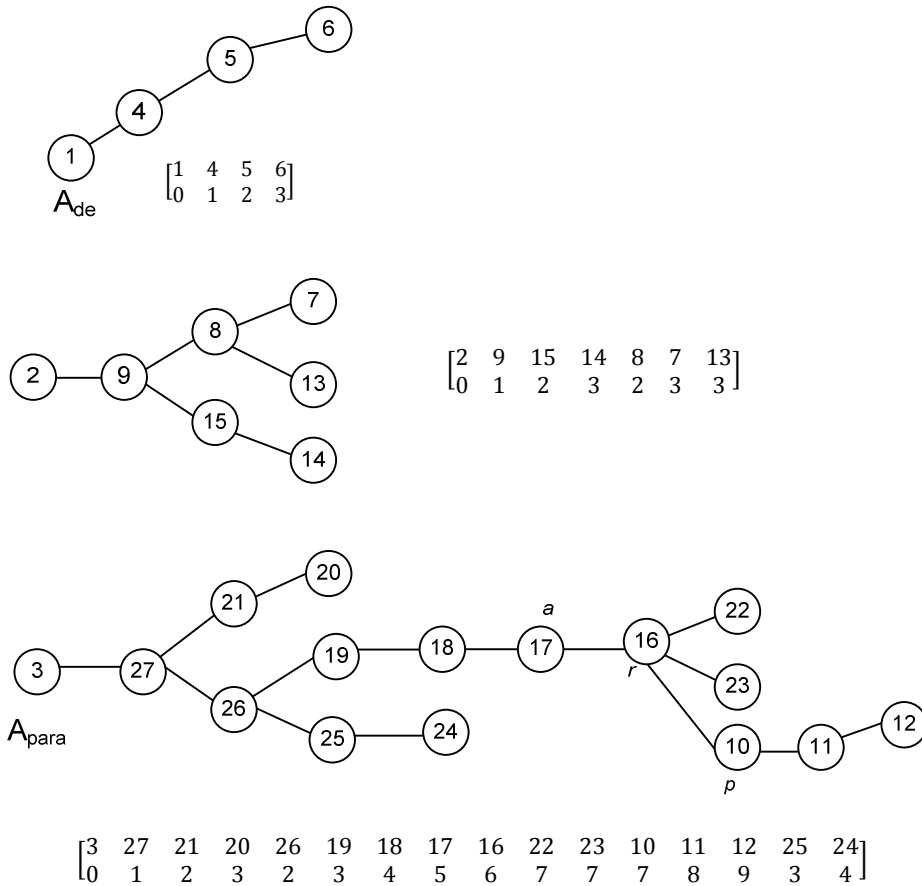
Fonte: do próprio autor

A matriz temporária A_{tmp1} (Figura 9) é formada pela seção do alimentador enraizada em $r_i = 1, 2, \dots, n$ sem a seção do alimentador enraizada em r_{i-1} .

Figura 9 - Ilustração da matriz temporária do operador CAO

Fonte: do próprio autor

O próximo passo consiste em criar a matriz A_{para}' , a qual contém os nós de A_{para} . Insere-se a matriz temporária A_{tmp1} na posição $i_a + 1$. Portanto, tem-se um novo sistema de distribuição radial após a atualização das matrizes A_{de}' e A_{para}' (Figura 10).

Figura 10 - Ilustração das matrizes finais do operador CAO

Fonte: do próprio autor

4.2.3 DETERMINAÇÃO DE UM VÉRTICE NA REPRESENTAÇÃO NÓ PROFUNDIDADE

A determinação de um nó na RNP utiliza duas estruturas: a matriz II_x que contém a identificação do vértice na RNP e o vetor pi que armazena em cada posição o ancestral da codificação gerada (SANCHES, 2013). Seja T_0 a topologia inicial do sistema de distribuição radial dado pela RNP.

Para a codificação inicial, a matriz II_x possui a seguinte estrutura.

$$II_x = \begin{bmatrix} 0 \\ i_0 \\ j_0 \\ k_0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

em que a primeira linha da matriz II_x representa o número da codificação gerada, i_0 é o índice do alimentador que contém o nó x , sendo que x representa as barras de um sistema de distribuição radial, j_0 é o índice correspondente a x no alimentador A_{i_0} e k_0 é a profundidade de x no alimentador A_{i_0} .

Se uma topologia posterior $T_{posterior}$ é obtida de uma topologia anterior $T_{anterior}$, então x tem uma posição diferente na nova topologia do sistema de distribuição. Para armazenar essa mudança, inserem-se na matriz II_x as posições conforme as topologias estão sendo geradas.

$$II_x = \begin{bmatrix} 0 & \dots & anterior & \dots & posterior \\ i_0 & \dots & i_{anterior} & \dots & i_{posterior} \\ j_0 & \dots & j_{anterior} & \dots & j_{posterior} \\ k_0 & \dots & k_{anterior} & \dots & k_{posterior} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A cada vez que uma seção do alimentador é podada de um alimentador e gerada uma nova topologia, os vértices desta seção devem ser atualizados. O último predecessor $T_{anterior}$ de $T_{posterior}$ pode ser determinado a partir do vetor pi . Assim, para localizar a posição de um vértice x em uma dada topologia do sistema de distribuição, primeiro busca-se em II_x , caso contrário localiza-se no vetor pi (DELBEM et al., 2004).

Portanto para localizar a posição de um nó x em T_i , primeiro busca-se na matriz II_x . Caso T_i não exista, busca-se no vetor pi o predecessor de T_i chamado de T_k com $k < i$. Contudo procura-se encontrar T_k na matriz II_x . Caso não seja possível, busca-se o predecessor de T_k até encontrar uma coluna para x .

4.2.4 DETERMINAÇÃO DA TRIPLA DE VÉRTICES NA REPRESENTAÇÃO NÓ PROFUNDIDADE

Para determinar a tripla de vértices p, r e a na RNP devem-se considerar as duas estruturas citadas anteriormente, a matriz II_x e o vetor pi . O algoritmo para determinação desses nós segue os seguintes passos:

- i. Escolha aleatoriamente um índice de A diferente da raiz e chame esse vértice de p ;
- ii. Se for o operador CAO, escolha aleatoriamente um índice no intervalo de (i_p, i_l) , e chame o nó da posição de r ;
- iii. Escolha aleatoriamente um nó da lista de adjacências de p , no caso do operador PAO, ou da lista de adjacências de r , no caso do operador CAO, e chame de a ;
- iv. Se a não pertence à matriz A_{de} , determine a posição de a utilizando a matriz II_a e o vetor pi ; caso contrário, selecione aleatoriamente outro a ou retorne ao passo i;

4.2.5 OPERADOR EHR

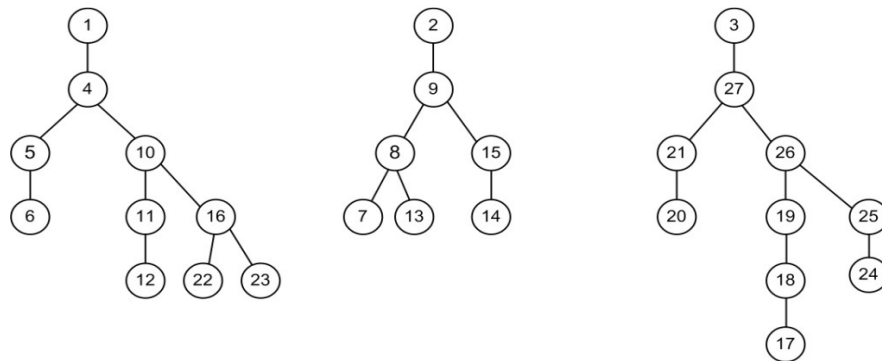
O operador de recombinação EHR utiliza o histórico evolutivo dos operadores PAO e CAO para realizar uma combinação convexa de grafos. Uma modificação no vetor pi é proposta, sendo que além de armazenar o índice do ancestral, também armazena as trincas de vértices p, r e a usadas nestes operadores. O pseudocódigo do operador de combinação é descrito a seguir:

- i. Selecione dois indivíduos P_1 e P_2 como pais;
- ii. Determine o ancestral comum C entre P_1 e P_2 utilizando o vetor pi , caso não exista um ancestral retorne ao passo i;
- iii. Determine as sequências s_1 e s_2 das triplas p, r e a armazenadas no vetor pi que geram P_1 e P_2 a partir do ancestral comum C , respectivamente;

- iv. Selecione aleatoriamente de s_1 e s_2 um subconjunto s_s de triplas p , r e a para serem aplicadas a C , tal que $|s_s| \leq k$, onde $|s_s|$ é a dimensão de s_s e k é uma constante positiva;
- v. Se o valor de r é nulo, aplicar s_s em C usando o operador PAO, gerando T' . Caso contrário, usar o operador CAO.

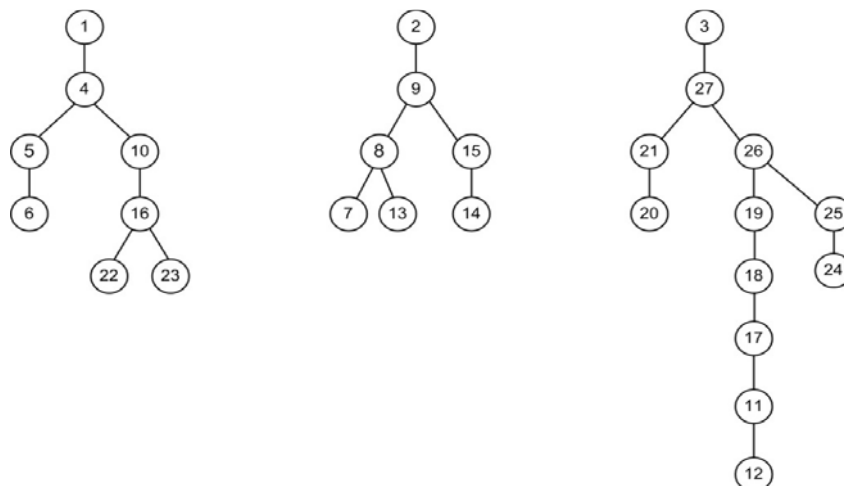
Um exemplo ilustrativo do operador EHR apresenta-se na Figura 11, o qual mostra a RNP do sistema de distribuição com 3 alimentadores apresentado na Figura 4. Aplicam-se os operadores PAO e CAO gerando respectivamente as topologias ilustradas nas Figuras 12 e 13. Os dois indivíduos gerados possuem um ancestral em comum, ou seja, a codificação da Figura 11. Com a finalidade de gerar o primeiro indivíduo do operador PAO (Figura 12) é necessária a modificação nos vértices $p = 11$ e $a = 17$ e para a geração da codificação da Figura 13 pelo operador CAO é utilizada a tripla de vértices $p = 21$, $r = 20$ e $a = 14$. Portanto com a combinação destes dois indivíduos gerados com os operadores PAO e CAO, gera-se o novo indivíduo através do operador EHR (Figura 14).

Figura 11 - Ilustração do sistema de distribuição radial

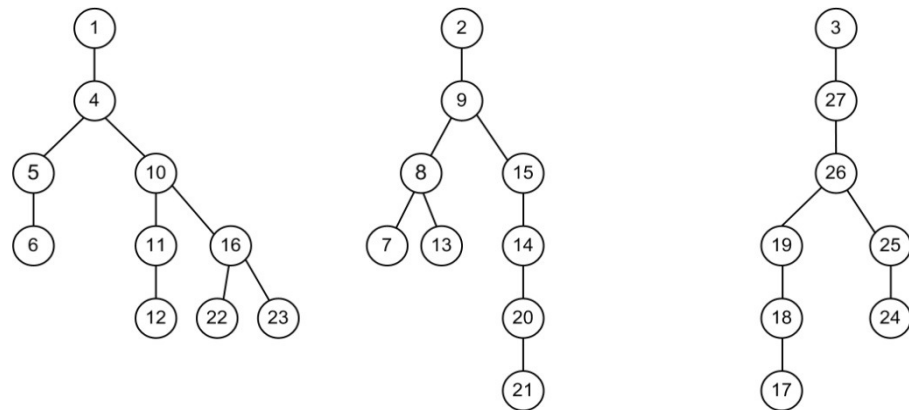


Fonte: Sanches (2013)

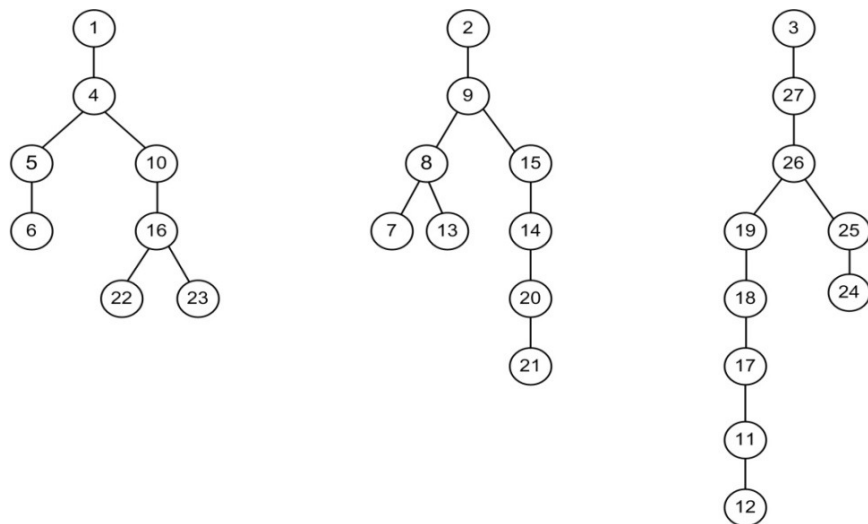
Figura 12 - Ilustração da aplicação do operador PAO



Fonte: Sanches (2013)

Figura 13 - Ilustração da aplicação do operador CAO

Fonte: Sanches (2013)

Figura 14 - Novo indivíduo gerado pelo operador EHR

Fonte: Sanches (2013)

4.3 FLUXO DE CARGA

O fluxo de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica permite a obtenção do estado das redes em relação ao fluxo de corrente nos circuitos, variação máxima de tensão nos pontos de carga, atendimento das demandas, ou seja, as condições de operação de todo o sistema. Na literatura existem diferentes métodos para fluxo de carga, entre eles, Gauss, Gauss-Seidel, Método de Newton e suas versões desacopladas (MONTICELLI, 1983). Como os sistemas de distribuição possuem características específicas, entre elas, alta relação resistência/reatância, diferentemente dos sistemas de transmissão, opta-se por utilizar o método de varredura direta/inversa de Shirmohammad, por ser mais adequado para este tipo de sistema. Outra característica importante é que a RNP, sistema utilizado como codificação dos sistemas

de distribuição, está ordenada de acordo com o modelo pai-filho, facilitando o uso dos métodos de varredura direta/reversa que necessitam dessa técnica para o cálculo do fluxo de carga.

O fluxo de carga de Shirmohammad consiste em um processo iterativo do tipo varredura direta e reversa, de modo que os cálculos são efetuados das barras terminais em direção à subestação e vice-versa. Os passos deste algoritmo estão descritos a seguir:

i. Partindo-se de uma codificação inicial dada pela RNP, atribui-se uma estimativa inicial das tensões nodais a todas as barras do sistema, sendo igual à tensão da subestação já conhecida.

$$V_i^0 = V_{ref} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (15)$$

em que:

V_i^0 : tensão na barra i na iteração 0;

V_{ref} : tensão na barra de referência;

nb : número de barras do sistema;

ii. Baseado nas leis de Kirchhoff calcula-se a corrente nodal injetada em cada barra i na iteração k definida como:

$$I_i^k = \left(\frac{S_i}{V_i^{(k-1)}} \right)^* - Y_i^{sh} \cdot V_i^{k-1} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (16)$$

em que:

$*$: operador conjugado complexo;

I_i^k : injeção de corrente complexa especificada na barra i ;

$V_i^{(k-1)}$: tensão na barra i na iteração $(k - 1)$;

Y_i^{sh} : soma de todos os elementos shunt da barra i ;

S_i : injeção de potência complexa na barra i ;

iii. Processo *backward*: através da varredura reversa, ou seja, iniciando das barras terminais (barras com maiores profundidades) e movendo-se em direção à subestação (profundidade zero), calcula-se a injeção de corrente em cada linha do sistema (Figura 15).

$$J_L^k = -I_{L2}^k + \sum \text{correntes das linhas que saem do nó } L_2 \quad (17)$$

em que:

$L = p, p-1, \dots, 1$;

I_{L2}^k : injeção de corrente no nó L_2 (nós terminais do SDR);

p : número de linhas que o sistema possui;

iv. Processo *forward*: iniciando das barras que estão conectadas a subestação, procede-se à varredura direta e calcula-se o valor da tensão de todas as barras do sistema até às barras terminais:

$$V_{L2}^k = V_{L1-1}^k - Z_L \cdot J_L^k \quad L = 1, 2, \dots, p \quad (18)$$

em que:

Z_L : impedância série da linha L ;

v. Para o critério de convergência é utilizado o valor máximo da variação de potência ativa e reativa ΔS_i . Se ΔS_i for menor que uma tolerância preestabelecida ϵ , para todas as barras do sistema, o algoritmo converge, caso contrário volte ao passo ii.

A variação de potência ativa e reativa na barra i na iteração k é calculada da seguinte forma:

$$\Delta P_i^k = \text{Re}[S_i^k - S_i] \quad (19)$$

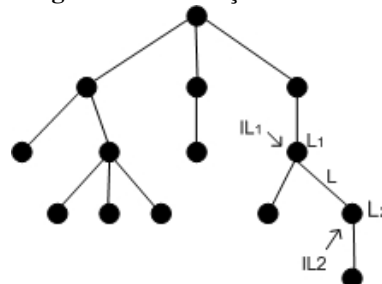
$$\Delta Q_i^k = \text{Im}[S_i^k - S_i] \quad (20)$$

em que: $i = 1, 2, \dots, nb$.

De modo que a potência complexa injetada na barra i na iteração k é calculada como:

$$S_i^k = V_i^k \cdot (I_i^k)^* - Y_i |V_i^k|^2 \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (21)$$

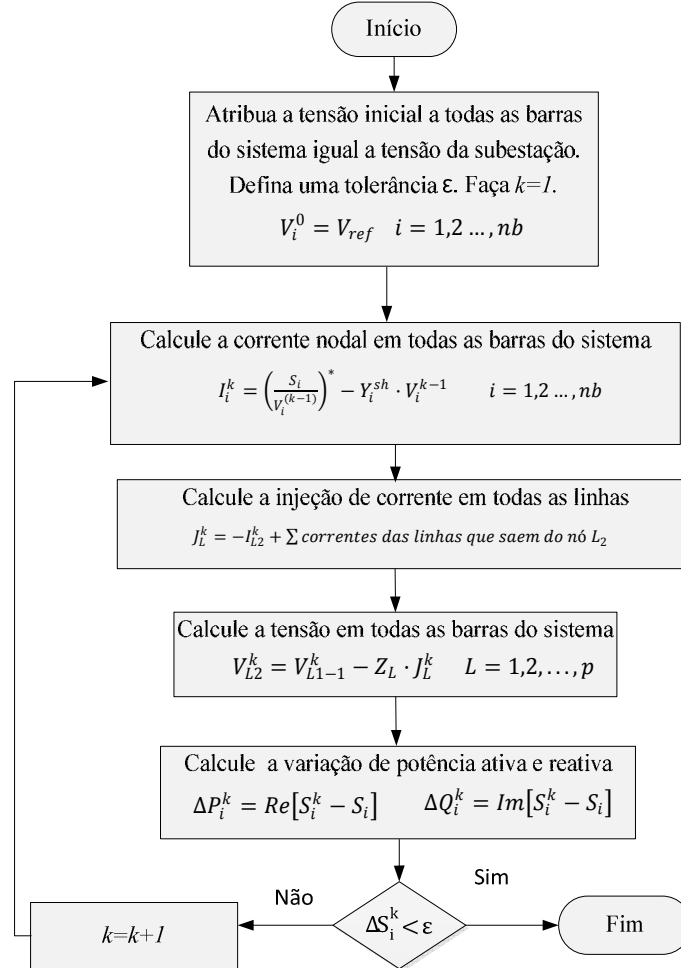
Figura 15 - Ilustração das somas das correntes



Fonte: do próprio autor

O diagrama de blocos da Figura 16 ilustra o processo do fluxo de carga monofásico de Shirmohammad para redes de distribuição radiais.

Figura 16 - Diagrama de blocos do fluxo de potência de Shirmohammad



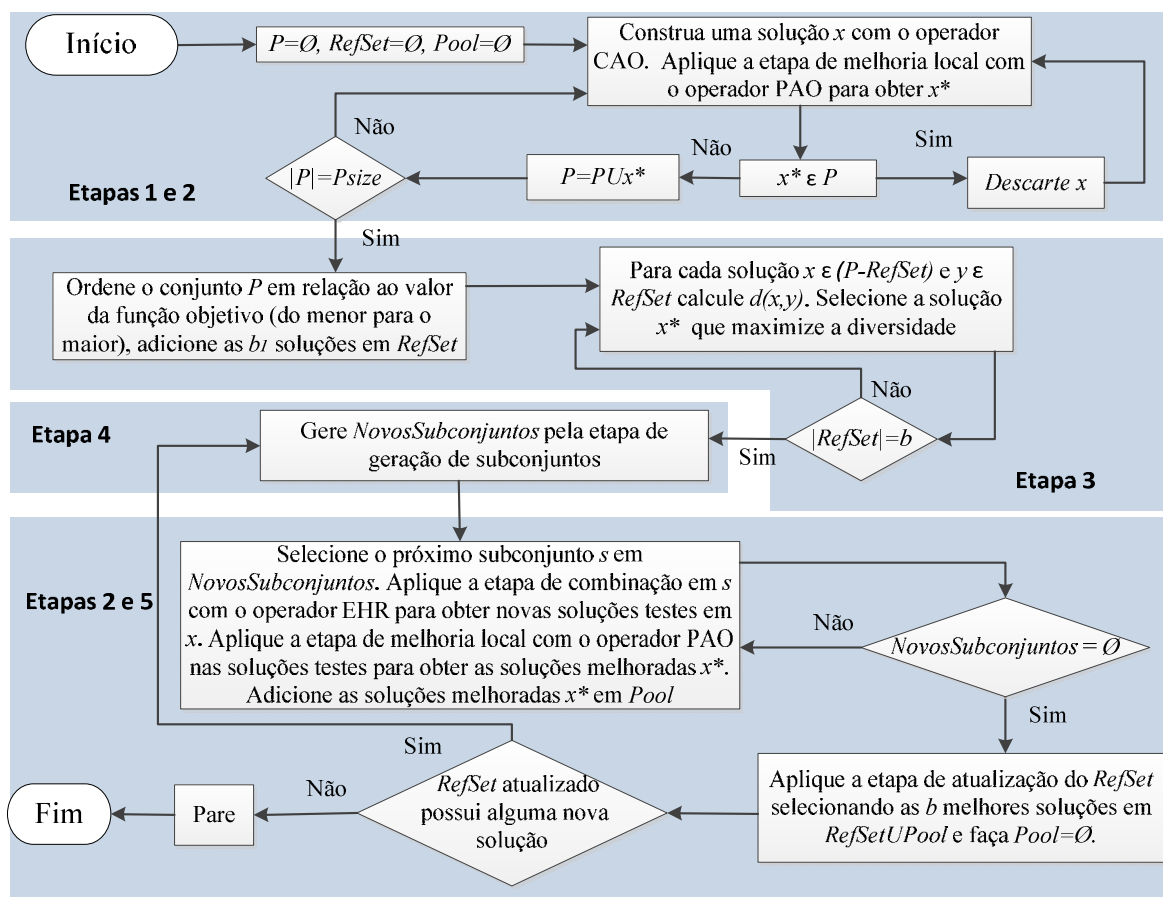
4.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se o sistema de codificação utilizado para os sistemas de distribuição radiais de energia elétrica. Juntamente com este tipo de codificação foram apresentados os operadores PAO e CAO que realizam a transferência de barras entre os alimentadores de um sistema de distribuição para gerar outras topologias radiais. Apresentou-se também o operador EHR responsável pela combinação de duas topologias radiais. Estes três operadores são aplicados no processo de busca da meta-heurística BD com a finalidade de encontrar soluções de boa qualidade para o problema. No fim do capítulo é apresentado o fluxo de carga tipo varredura de Shirmohammad que possibilita avaliar as topologias radiais geradas e encontrar soluções que minimizem as perdas em um sistema de distribuição.

5 ALGORITMO DE BUSCA DISPERSA DEDICADO AO PROBLEMA DE RECONFIGURAÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAIS

O algoritmo de busca dispersa dedicado ao problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais é composto por cinco etapas fundamentais: etapa de geração de soluções com diversidade, etapa de melhoria local, etapa de construção/atualização do conjunto de referência, etapa de geração de subconjuntos e etapa de combinação. Este capítulo descreve estas cinco etapas fundamentais com a utilização dos operadores PAO, CAO e EHR da RNP. Na Figura 17 ilustra-se o diagrama de blocos do algoritmo proposto destacando as etapas envolvidas no processo.

Figura 17 – Algoritmo de busca dispersa dedicado ao problema de reconfiguração



Fonte: do próprio autor

5.1 ETAPA 1: GERAÇÃO DE SOLUÇÕES COM DIVERSIDADE

A etapa de geração de soluções com diversidade é a base inicial do algoritmo de BD, na qual gera-se um conjunto P de dimensão $PSize$, que corresponde à população inicial do processo de busca da meta-heurística. Emprega-se randomização controlada e frequência baseada em memória para gerar um conjunto P com soluções que atendam aos critérios de qualidade e diversidade.

A partir da topologia inicial radial do sistema de distribuição, utiliza-se o operador CAO, com a finalidade de gerar configurações sempre radiais até que a dimensão do conjunto $P = PSize$. A finalidade de utilizar o operador CAO, em vez do operador PAO, deve-se ao fato de que este operador produz mudanças mais complexas, conseqüentemente soluções mais diversas, quando comparadas com as outras topologias geradas com a aplicação do operador PAO. Isto acontece porque o operador CAO muda o nó raiz da seção do alimentador podada ao realizar a transferência de barras entre os alimentadores (SANTOS, 2009). Contudo, não se garante que o operador CAO produza soluções totalmente diversas, pois o mesmo utiliza critérios aleatórios para determinação do nó de poda que é utilizado na transferência de barras entre os alimentadores de um sistema de distribuição.

Com a finalidade de contornar este problema, isto é, encontrar soluções que atendam melhor ao critério de diversidade, escolhem-se os alimentadores do sistema de distribuição para sorteio do nó de poda p através de critérios probabilísticos. Para isso, divide-se o número de barras do sistema em k intervalos, em que k representa a quantidade de alimentadores do sistema de distribuição, de forma que o alimentador para sorteio do vértice p seja escolhido com probabilidade inversamente proporcional aos alimentadores já selecionados. Sendo assim, no início do processo todos os alimentadores têm a mesma probabilidade de serem escolhidos.

A aplicação do operador CAO da RNP, utilizando uma aleatoriedade controlada, garante que se está percorrendo um espaço de busca mais disperso para gerar o conjunto P de soluções iniciais, gerando uma relação de diversidade entre as soluções e garantindo uma das propriedades fundamentais da meta-heurística BD.

Após todas as soluções do conjunto P inicial serem geradas, aplica-se a etapa de melhoria local (etapa 2) nas $PSize$ soluções, visando encontrar uma solução de melhor qualidade em relação ao valor da função objetivo na vizinhança da solução base.

Para avaliar a qualidade das soluções, utiliza-se o fluxo de carga baseado no método de varredura direta e reversa de Shirmohammad, et al. (1988). A solução que possuir o melhor valor da função objetivo, ou seja, aquela que possuir perdas mínimas de potência na vizinhança da solução base é utilizada para substituir a solução inicial do conjunto P . Do conjunto P é extraído o conjunto *RefSet* de maneira determinística.

5.2 ETAPA 2: MELHORIA LOCAL

A etapa de melhoria local é utilizada na construção do conjunto inicial P e após o método de combinação para encontrar soluções de qualidade. O método de melhoria local consiste em fazer uma pequena perturbação na codificação existente, procurando na vizinhança da solução uma topologia que possa melhorar o valor da função objetivo. Esse processo provoca a intensificação da busca por melhores soluções em uma determinada região.

Com esse objetivo é utilizado o operador PAO da RNP, pois o mesmo produz transferências relativamente simples de barras entre os alimentadores, quando aplicado (SANTOS, 2009). Determina-se sempre uma quantidade de soluções a serem geradas na vizinhança da solução base. Por fim verifica-se a melhor solução encontrada para fins de minimizar o valor da função objetivo.

5.3 ETAPA 3: CONSTRUÇÃO E ATUALIZAÇÃO DO CONJUNTO DE REFERÊNCIA

Para construir o conjunto de referência escolhem-se as b_1 soluções de qualidade através do fluxo de carga de Shirmohammad. Para incluir as b_2 soluções no conjunto de referência através do critério de diversidade, é utilizada a quantidade de barras que trocam de alimentador de uma determinada topologia para outra do sistema de distribuição, quando aplicado o operador CAO da RNP. As Figuras 18 e 19 ilustram essa relação de diversidade. Seja a Figura 18 um SDR denominado de indivíduo 1 codificado pela RNP, e A_k os alimentadores deste sistema.

Figura 18 – Indivíduo 1: SDR da Figura 4 codificado pela RNP

$$\begin{aligned}
A_1: & \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 6 & 10 & 11 & 12 & 16 & 22 & 23 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 3 & 4 & 4 \end{bmatrix} \\
A_2: & \begin{bmatrix} 2 & 9 & 15 & 14 & 8 & 7 & 13 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix} \\
A_3: & \begin{bmatrix} 3 & 27 & 21 & 20 & 26 & 19 & 18 & 17 & 25 & 24 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & 3 & 4 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Fonte: do próprio autor

Aplica-se o operador CAO da RNP gerando outra topologia do SDR denominado de indivíduo 2 (Figura 19).

Figura 19 – Indivíduo 2: SDR após a aplicação do operador CAO da RNP

$$\begin{aligned}
A_1: & \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 6 & 10 & 16 & 22 & 23 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 4 \end{bmatrix} \\
A_2: & \begin{bmatrix} 2 & 9 & 15 & 14 & 8 & 7 & 13 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 3 \end{bmatrix} \\
A_3: & \begin{bmatrix} 3 & 27 & 21 & 20 & 26 & 19 & 18 & 17 & 11 & 12 & 25 & 24 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 3 & 4 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Fonte: do próprio autor

A distância de dissimilaridade é calculada proporcionalmente pelas barras que foram transferidas entre os alimentadores das duas codificações após a aplicação do operador CAO da RNP. Verifica-se que os nós 11 e 12 do alimentador A_1 do indivíduo 1, foram transferidos para o alimentador A_3 do indivíduo 2. Portanto o alimentador A_1 do indivíduo 1 possui 2 barras diferentes do alimentador A_1 do indivíduo 2 (nós 11 e 12). Da mesma forma o alimentador A_3 do indivíduo 2 possui 2 barras diferentes (nós 11 e 12) do alimentador A_3 do indivíduo 1. Enquanto isso o alimentador A_2 possui a mesma configuração nas duas topologias. Dessa forma, estima-se a relação de dissimilaridade entre as duas soluções utilizando essa relação, ou seja, a quantidade de barras diferentes entre os alimentadores de duas topologias. Sendo x a solução do indivíduo 1 e y a solução do indivíduo 2, define-se o critério de diversidade como a distância das duas codificações: $d(x, y) = 4$.

A atualização do *RefSet* é realizada através de um processo iterativo. Este processo compreende o conjunto de referência, o método de combinação, o método de geração de subconjuntos e o método de melhoria local, com o objetivo de encontrar soluções de melhor qualidade durante a fase de busca.

5.4 ETAPA 4: GERAÇÃO DE SUBCONJUNTOS

A etapa de geração de subconjuntos consiste em gerar subconjuntos através do *RefSet* que são utilizados na etapa de combinação. Geram-se todos os subconjuntos possíveis, utilizando duas soluções. Nesta etapa também é criado o conjunto *NovosSubconjuntos* que armazena todos os subconjuntos gerados. Esta etapa termina quando todas as soluções possíveis foram agrupadas, isto é, todas as topologias do sistema de distribuição foram selecionadas duas a duas formando subconjuntos para posteriormente serem submetidas à etapa de combinação.

5.5 ETAPA 5: COMBINAÇÃO

A etapa de combinação utiliza os subconjuntos gerados na etapa 4 para criar novas soluções denominadas soluções testes. Nesta etapa utiliza-se o operador EHR. Este operador realiza uma combinação convexa de duas soluções, na qual gera-se sempre outra solução com topologia radial para o sistema de distribuição, contendo características das duas soluções combinadas (SANCHES, 2013). Após serem combinadas, estas soluções testes passam pela etapa de melhoria local (etapa 2) e são armazenadas no conjunto *Pool*. Esta etapa termina quando todos os subconjuntos possíveis foram combinados e o *RefSet* foi atualizado. O *RefSet* é atualizado com as b melhores soluções dos conjuntos *RefSet* e *Pool*. Como critério de convergência do algoritmo, verifica-se se após a atualização do *RefSet* existem soluções que não foram combinadas em etapas anteriores.

5.6 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou o algoritmo de busca dispersa proposto dedicado ao problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais. Foram apresentadas as cinco etapas fundamentais da meta-heurística BD com a utilização dos operadores da RNP. O algoritmo proposto visa encontrar soluções de boa qualidade para o problema de reconfiguração quando aplicado aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

6 RESULTADOS

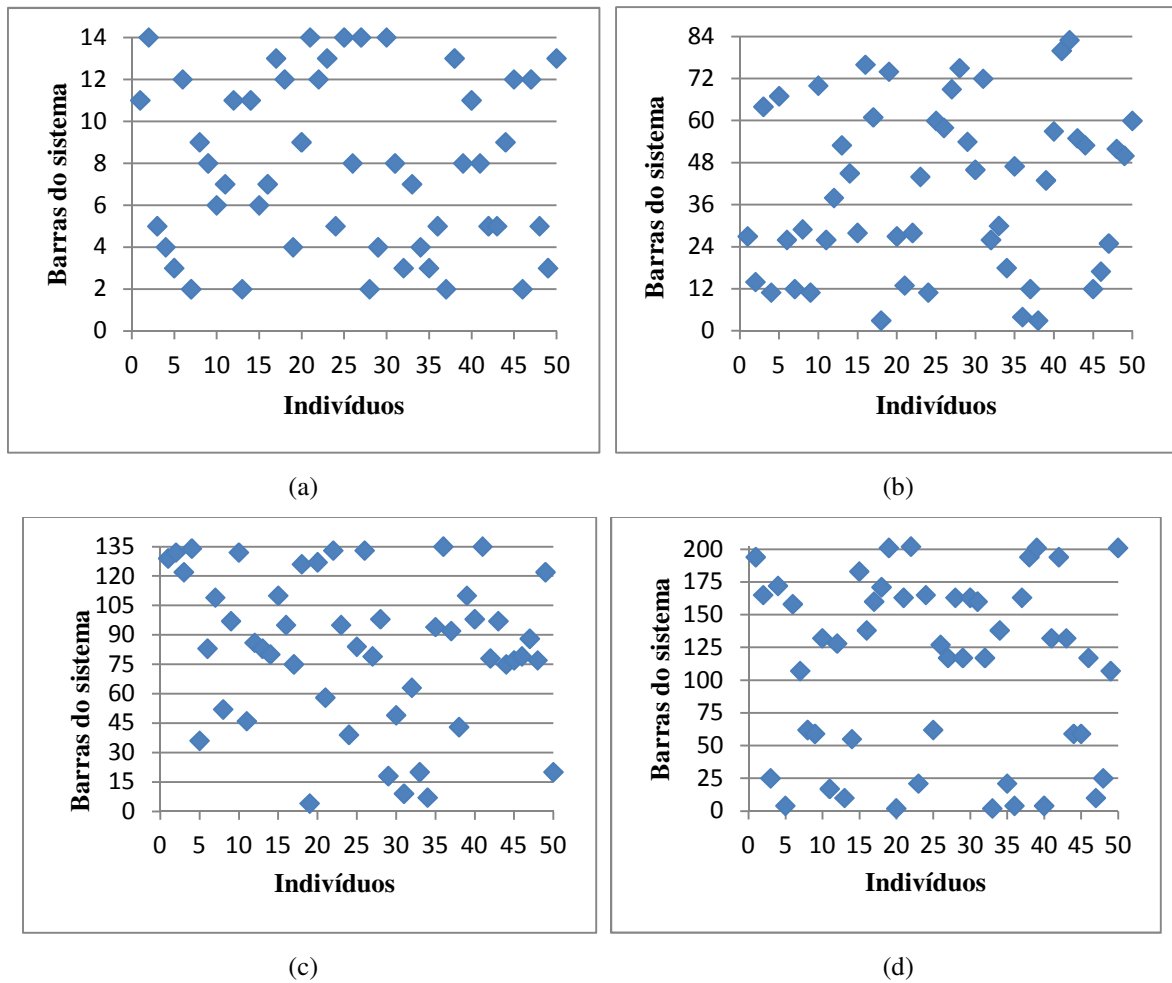
O algoritmo de Busca Dispersa (BD) dedicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais foi implementado em linguagem de programação C++ e simulado utilizando um microcomputador com processador Intel Core i7, 4 GB de memória RAM e 2,53 GHz. Foram realizados testes nos seguintes sistemas: 14 barras Cinvalar et al. (1988), 84 barras Chiou, Chang e Su (2005), 136 barras Mantovani, Casari e Romero (2000) e 202 barras Castro (1985) comumente usados na literatura.

Para determinar os parâmetros do algoritmo de BD, referente aos conjuntos P , b , b_1 e b_2 , foram realizados vários testes com diferentes dimensões. No conjunto P utilizou-se dimensões de 50, 100 e 200 soluções. No conjunto de referência utilizou-se $b = 10, 16$ e 20 soluções, sendo que foram utilizadas 50% de soluções de qualidade (b_1) e 50% de soluções de diversidade (b_2). Todos os parâmetros testados convergiram encontrando as melhores soluções. Com vistas a obter robustez e eficiência computacional do algoritmo optou-se por utilizar os seguintes parâmetros: dimensão do conjunto $P = 50$; dimensão do conjunto de referência $b = 10$, sendo composto por 5 soluções de qualidade (b_1) e 5 soluções de diversidade (b_2).

Para a geração de soluções com diversidade do conjunto inicial P do algoritmo de BD proposto, que contém soluções de qualidade e diversidade utiliza-se o operador CAO. Este operador utiliza o nó de poda p para podar e transferir barras entre os alimentadores do sistema de distribuição (SANTOS, 2009). Como foi utilizada uma aleatoriedade controlada para sortear o nó de poda p , os gráficos da Figura 20 ilustram este processo, isto é, mostra a dispersão de barras sorteadas em um sistema de distribuição para realizar a transferência de barras entre os alimentadores dos sistemas.

6.1 MODELO DE CARGAS COM POTÊNCIA CONSTANTE

Nesta seção apresentam-se os melhores resultados encontrados para o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica radiais utilizando o modelo de cargas com potência constante, para os sistemas de 14, 84, 136 e 202 barras, com vista a reduzir as perdas ativas dos alimentadores e minimizar os custos anuais de operação do sistema de distribuição.

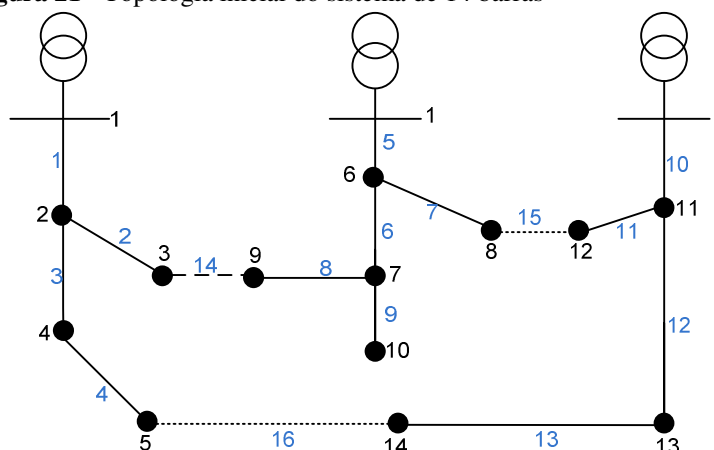
Figura 20 – Dispersão dos conjuntos iniciais gerados

Fonte: do próprio autor

6.1.1 SISTEMA DE 14 BARRAS

Sistema de 14 barras com 3 alimentadores, 13 chaves normalmente abertas, 3 chaves normalmente fechadas, tensão de 23 kV e potência base de 100 MVA. Na Figura 21 ilustra-se a topologia inicial do sistema de 14 barras a ser reconfigurado, sendo que as linhas contínuas representam as chaves que estão energizadas na rede elétrica, enquanto que as linhas pontilhadas representam as possíveis ligações entre as barras dos alimentadores, isto é, as chaves normalmente abertas.

Na Tabela 4 apresenta-se a configuração inicial (CI) e as 5 melhores topologias encontradas através da reconfiguração do sistema de 14 barras. Estes dados mostram a respectiva redução de perdas de cada configuração encontrada em valores numéricos e percentuais, como também mostram as chaves que devem estar abertas no sistema de distribuição para formar cada topologia.

Figura 21 - Topologia inicial do sistema de 14 barras

Fonte: Amasifen (2003)

Tabela 4 - Reconfiguração do sistema de 14 barras: modelo de potência constante

Nº	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de perdas
CI	14-15-16	511,43	
01	7-8-16	466,12	8,86%
02	4-7-8	479,29	6,28%
03	7-14-16	483,87	5,39%
04	7-8-13	492,93	3,62%
05	8-15-16	493,15	3,57%

Fonte: do próprio autor

A melhor solução encontrada apresenta perdas mínimas de potência de 466,12 kW, sendo a mesma solução encontrada como a melhor da literatura por Cinvalar et al. (1988). O tempo de processamento do algoritmo é de 0,201 segundos.

No algoritmo de BD existe um processo iterativo compreendendo o processo de construção/atualização do conjunto de referência, geração de subconjuntos, etapa de combinação e melhoria local. Esse processo iterativo termina quando todas as soluções já foram combinadas e não existem soluções diferenciadas para recompor o conjunto de referência. Salienta-se que foram necessárias apenas 2 iterações para encontrar o menor valor de perdas para o sistema de 14 barras.

Para calcular o custo das perdas em um período anual da melhor topologia encontrada, foram consideradas 8760 horas divididas em três tipos de carregamento; carregamento leve: 2000 horas, correspondendo a 50% da potência instalada do sistema; carregamento nominal: 5760 horas, correspondendo a 70% da potência instalada do sistema e carregamento pesado:

1000 horas, correspondendo a 100% da potência instalada no sistema. Foram considerados os seguintes preços para o custo do kWh de energia: US\$ 0,16 para o carregamento leve, US\$ 0,20 para o carregamento nominal e US\$ 0,25 para o carregamento pesado (MENESES, 2012). Na Tabela 5 apresentam-se os custos anuais das perdas de energia para o sistema de 14 barras da configuração inicial (CI) e da configuração ótima (CO) utilizando o modelo de cargas com potência constante.

Tabela 5 – Custos anuais do sistema de 14 barras: modelo de potência constante

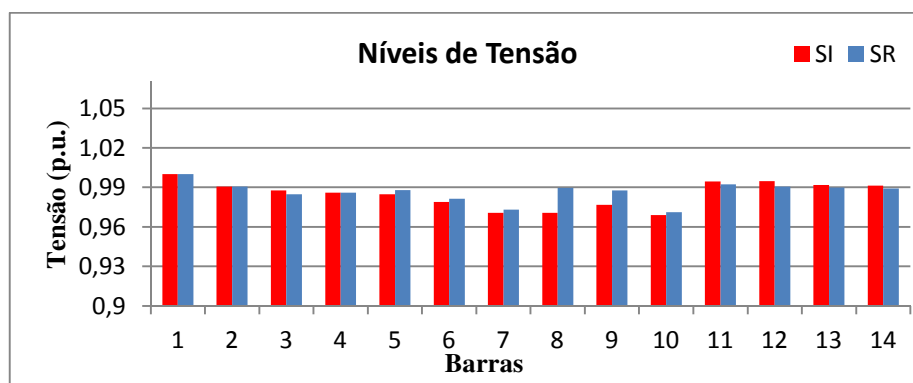
Configurações	Chaves abertas	Custo (US\$)
CI	14-15-16	451.798,60
CO	7-8-16	412.370,34

Fonte: do próprio autor

Os níveis de tensão, uma das restrições do problema de reconfiguração, devem sempre operar dentro dos limites especificados pelas normas reguladoras dos sistemas elétricos. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), recomenda que os níveis de tensão devem estar sempre entre os intervalos de 0,93 a 1,05 pu, considerado como adequado em um sistema de distribuição (ANEEL, 2012). No gráfico da Figura 22 comparam-se os níveis de tensão de todas as barras do sistema inicial (SI) e os níveis de tensão da melhor solução encontrada pelo algoritmo, depois da reconfiguração, isto é, o sistema reconfigurado (SR).

O limite da magnitude de tensão mínima encontrada é de 0,971 pu para o sistema reconfigurado, na barra 10 do sistema, enquanto que a configuração inicial do sistema de 14 barras possuía um limite de tensão mínimo de 0,968 pu, também na barra 10 do sistema. Portanto verifica-se que houve uma melhora nos valores de tensão após a reconfiguração.

Figura 22 - Níveis de tensão do sistema de 14 barras: modelo de potência constante



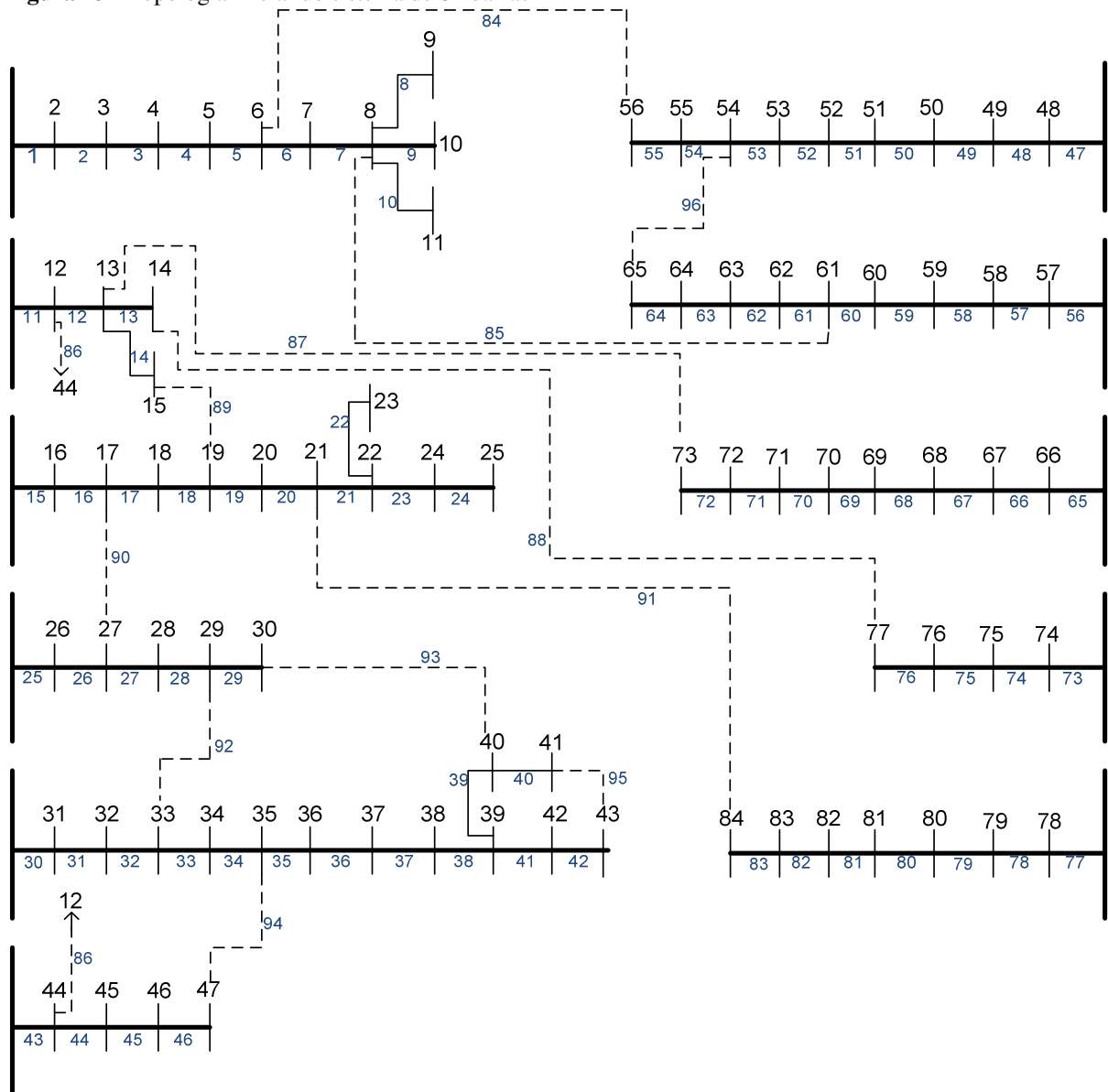
Fonte: do próprio autor

6.1.2 SISTEMA DE 84 BARRAS

Sistema de 84 barras com 11 alimentadores, 83 chaves normalmente fechadas, 13 chaves normalmente abertas, tensão de 11,4 kV e potência base de 100 MVA. Na Figura 23 apresenta-se a topologia inicial do sistema, em que as linhas contínuas representam as chaves normalmente fechadas e as linhas pontilhadas representam as chaves normalmente abertas.

Na Tabela 6 apresenta-se a configuração inicial (CI) e as 5 melhores configurações encontradas para o sistema de 84 barras, juntamente com a respectiva redução de perdas e as chaves que devem estar abertas para formar cada topologia.

Figura 23 - Topologia inicial do sistema de 84 barras



Fonte: do próprio autor

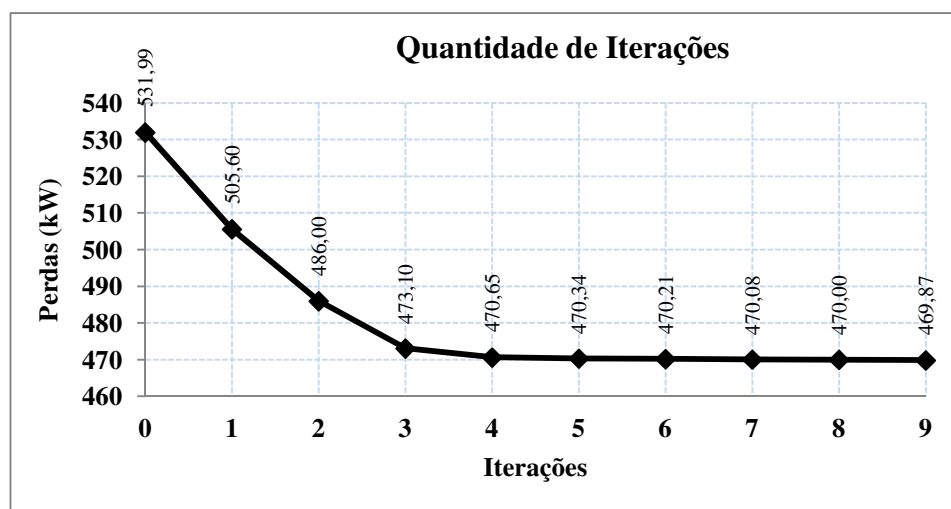
Tabela 6 - Reconfiguração do sistema de 84 barras: modelo de potência constante

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de Perdas
C.I	84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96	531,99	
01	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	469,87	11,68%
02	7-13-34-39-42-55-61-72-83-86-89-90-92	469,97	11,66%
03	7-13-34-39-55-61-72-83-86-89-90-92-95	470,00	11,65%
04	7-13-34-39-42-55-63-72-83-86-89-90-92	470,05	11,64%
05	13-34-39-42-55-62-72-83-85-86-89-90-92	470,08	11,63%

Fonte: do próprio autor

A melhor solução encontrada apresenta perdas mínimas de potência de 469,87 kW, sendo a mesma solução encontrada em Chiou, Chang e Su (2005) como a melhor da literatura. O tempo de processamento do algoritmo é de 2,984 segundos.

No gráfico da Figura 24 apresentam-se os valores de perdas encontradas em relação do número de iterações do algoritmo. Salienta-se que foram necessárias 9 iterações para encontrar o valor de perdas mínimas para o sistema.

Figura 24 – Iterações: sistema de 84 barras com modelo de potência constante

Fonte: do próprio autor

Na Tabela 7 apresentam-se os custos anuais relacionados às perdas do sistema de 84 barras considerando o modelo de cargas com potência constante.

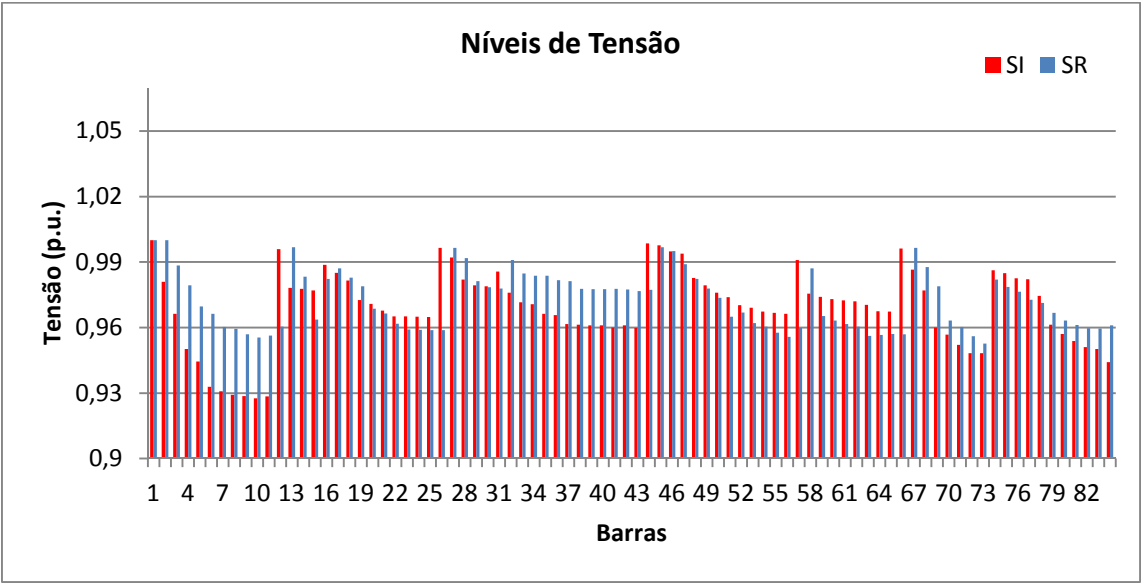
Tabela 7 – Custos anuais do sistema de 84 barras: modelo de potência constante

Configurações	Chaves abertas	Custo (US\$)
CI	84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96	465.938,60
CO	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	413.185,75

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 25 comparam-se os níveis de tensão de todas as barras do sistema inicial (SI) com os níveis de tensão da melhor solução encontrada pelo algoritmo após a reconfiguração (SR):

Figura 25 - Níveis de tensão do sistema de 84 barras: modelo de potência constante



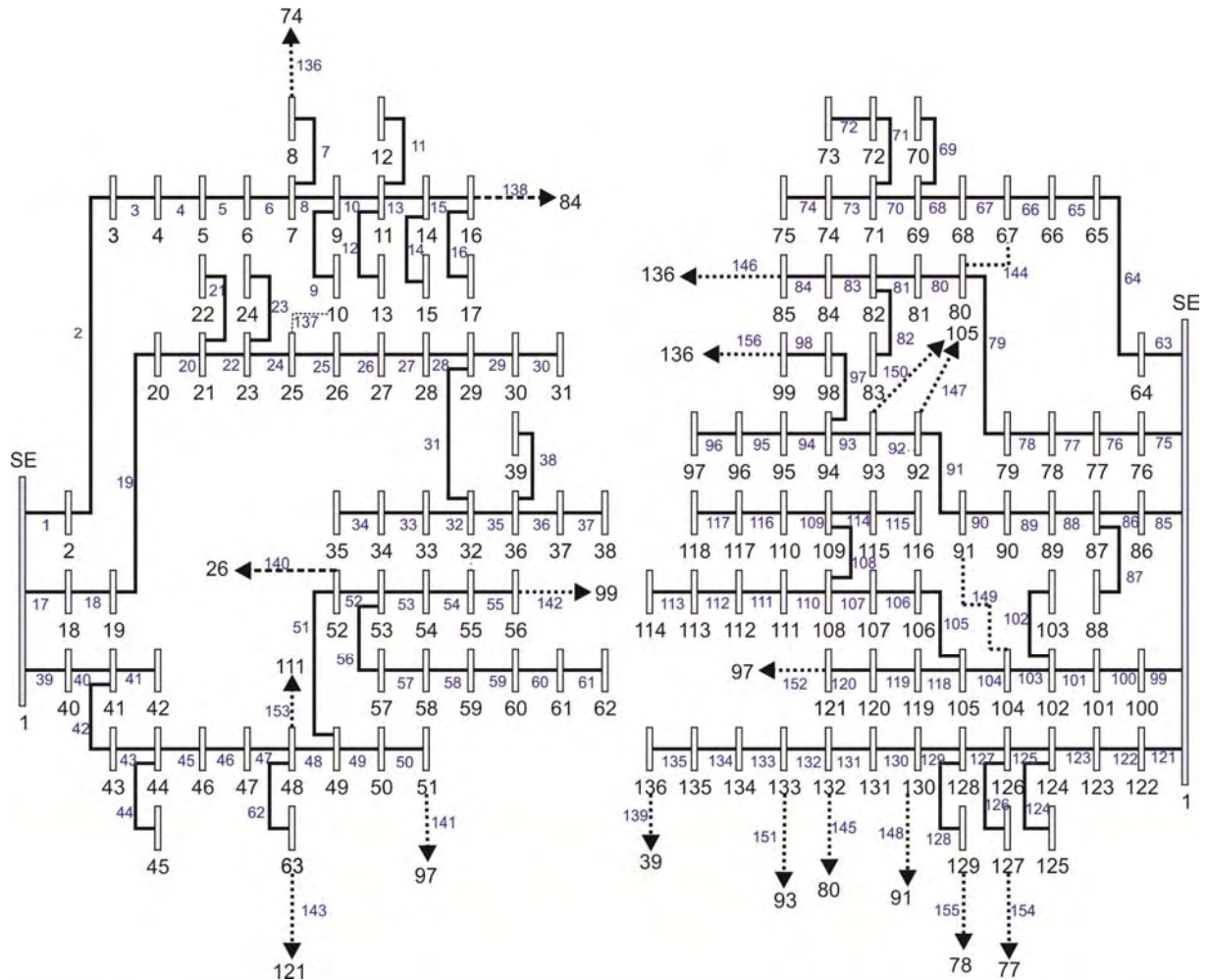
Fonte: do autor

O limite da magnitude de tensão mínima do sistema reconfigurado é de 0,955 pu, na barra 72 do sistema, enquanto que o limite de tensão mínima do sistema inicial é de 0,927 pu, na barra 10 do sistema. Portanto verifica-se que houve uma melhora significativa em relação ao nível de tensão do sistema inicial para o sistema reconfigurado, o qual estava fora dos níveis de tensão considerado como adequado pela ANEEL.

6.1.3 SISTEMA DE 136 BARRAS

Sistema de 136 barras com 8 alimentadores, 135 chaves normalmente fechadas, 21 chaves normalmente abertas, tensão de 13,8 kV e potência base de 100 MVA. Na Figura 26 é apresentada a topologia inicial do sistema de 136 barras.

Figura 26 - Topologia inicial do sistema de 136 barras



Fonte: do próprio autor

Na Tabela 8 apresentam-se os resultados das melhores configurações encontradas para o sistema de 136 barras, juntamente com a respectiva redução de perdas e as chaves que devem estar abertas para formar cada topologia.

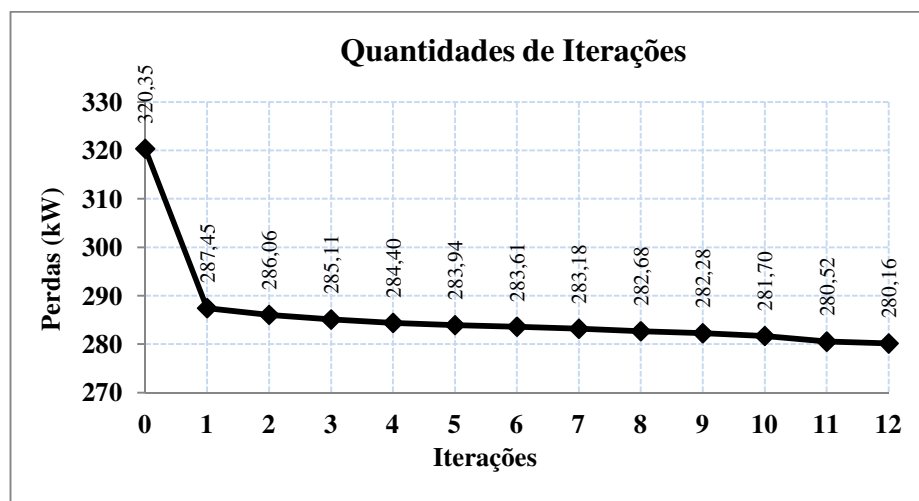
A melhor solução encontrada pelo algoritmo apresenta perdas mínimas de potência de 280,16 kW, a mesma solução encontrada em Carreño, Moreira e Romero (2007), conhecida atualmente como a melhor da literatura. O tempo de processamento do algoritmo é de 5,852 segundos.

Tabela 8 – Reconfiguração do sistema de 136 barras: modelo de potência constante

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de perdas
CI	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156	320,35	
01	7-35-51-90-96-106-118-126-135-137-138-141-142-144-145-146-147-148-150-151-155	280,16	12,54%
02	7-51-53-84-90-96-106-118-126-137-138-139-141-144-145-147-148-150-151-155-156	280,20	12,53%
03	7-35-51-55-90-96-106-118-126-135-137-138-141-144-145-146-147-148-150-151-155	280,28	12,51%
04	7-35-51-90-96-106-118-126-135-137-138-142-144-145-146-147-148-150-151-152-155	280,30	12,50%
05	7-38-51-53-84-90-96-106-118-126-128-137-138-141-144-145-156-147-148-150-151	280,32	12,49%

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 27 apresentam-se os valores das perdas encontradas em relação ao número de iterações do algoritmo. Salienta-se que foram necessárias 12 iterações para encontrar a melhor solução da literatura.

Figura 27 - Iterações: sistema de 136 barras com modelo de potência constante

Fonte: do próprio autor

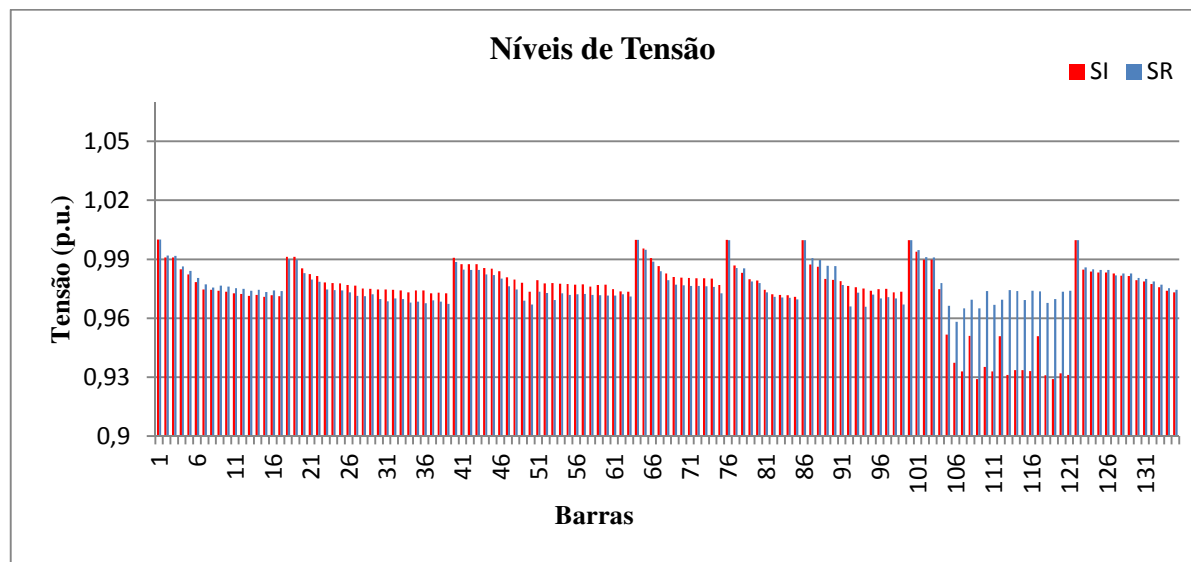
Na Tabela 9 apresentam-se os custos anuais relacionados às perdas do sistema de 136 barras considerando o modelo de cargas com potência constante.

Tabela 9 – Custos anuais do sistema de 136 barras: modelo de potência constante

Configurações	Chaves abertas	Custos (US\$)
CI	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-	281.255,10
	147-148-149-150-151-152-153-154-155-156	
CO	7-35-51-90-96-106-118-126-135-137-138-141-	247.240,64
	142-144-145-146-147-148-150-151-155	

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 28 comparam-se os níveis de tensão de todas as barras do sistema inicial (SI) com os níveis de tensão de todas as barras da melhor solução encontrada pelo algoritmo após o sistema ter sido reconfigurado (SR).

Figura 28 - Níveis de tensão do sistema de 136 barras: modelo de potência constante

Fonte: do próprio autor

O limite da magnitude de tensão mínima é de 0,958 pu, na barra 106 do sistema, após o processo de reconfiguração, enquanto que a configuração inicial possui um limite mínimo de 0,930 pu, na barra 118 do sistema.

6.1.4 SISTEMA DE 202 BARRAS

Sistema de 202 barras com 3 alimentadores, 201 chaves normalmente fechadas, 15 chaves normalmente abertas, tensão de 13,8 kV e potência base de 100 MVA. Na Figura 29 é mostrada a topologia inicial do sistema de 202 barras.

Na Tabela 10 apresenta-se a configuração inicial (CI) e as 5 melhores reconfigurações encontradas para o sistema de 202 barras, juntamente com a respectiva redução de perdas e as chaves que devem estar abertas para formar cada topologia encontrada.

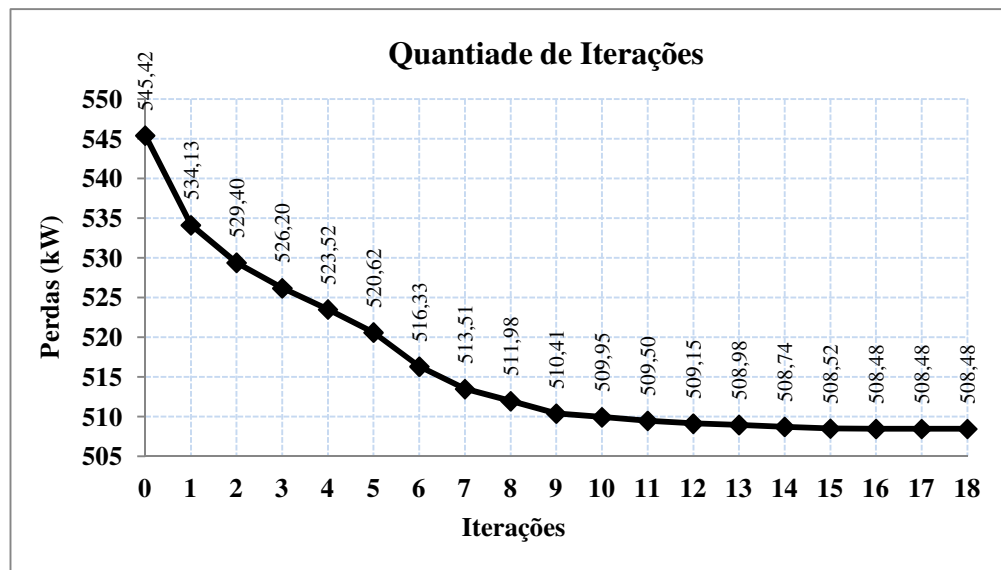
Tabela 10 - Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo de potência constante

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de perdas
CI	202-203-204-205-206-207-208-209-210-211-212-213-214-215-216	545,42	
01	29-54-106-114-122-127-158-171-182-193-199-200-202-208-211	508,47	6,77%
02	27-54-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-200-202-208	508,48	6,77%
03	27-53-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-200-202-208	508,63	6,74%
04	29-54-106-114-122-127-158-171-182-193-199-201-202-208-211	508,64	6,74%
05	27-54-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-201-202-208	508,65	6,74%

Fonte: do próprio autor

A melhor solução encontrada pelo algoritmo apresenta perdas mínimas de potência de 508,47 kW, a mesma solução encontrada em Zvietcovich (2006) conhecida atualmente como a melhor da literatura. O tempo de processamento do algoritmo é de 12,834 segundos.

No gráfico da Figura 30 apresentam-se os valores de perdas encontradas em relação ao número de iterações do algoritmo. Salienta-se que foram necessárias 18 iterações para encontrar a melhor solução conhecida pela literatura.

Figura 30 – Iterações: sistema de 202 barras com modelo de cargas com potência constante

Fonte: do próprio autor

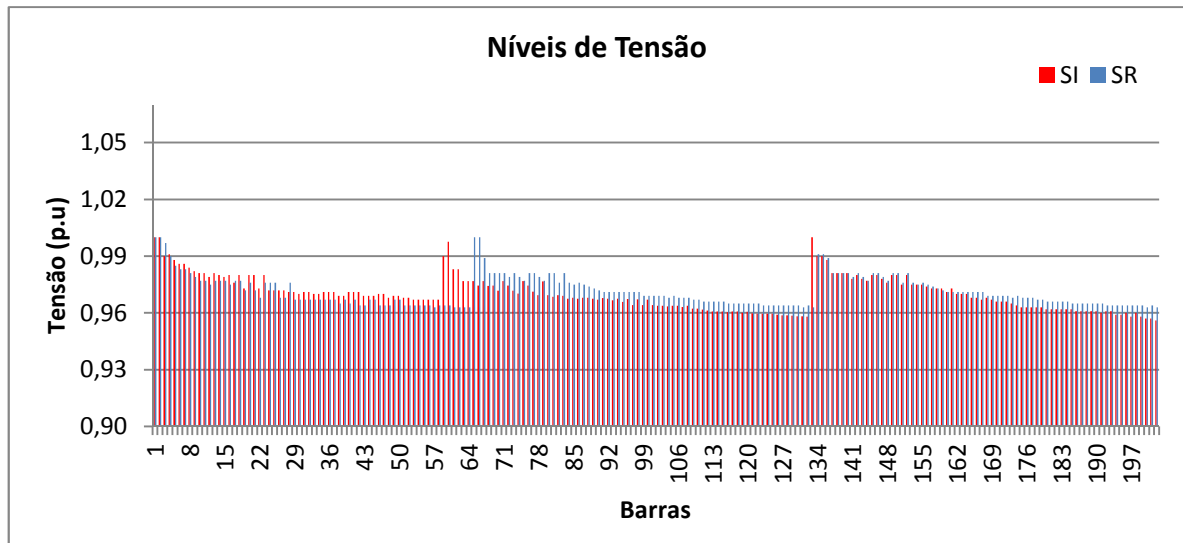
Na Tabela 11 apresentam-se os custos anuais relacionados com as perdas do sistema de 202 barras, utilizando o modelo de cargas com potência constante.

Tabela 11 – Custos anuais do sistema de 202 barras: modelo potência constante

Configurações	Chaves abertas	Custos (US\$)
CI	202-203-204-205-206-207-208-209-	481.081,50
	210-211-212-213-214-215-216	
CO	29-54-106-114-122-127-158-171-182-	452.921,12
	193-199-200-202-208-211	

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 31 comparam-se os níveis de tensão de todas as barras do sistema inicial (SI) com os níveis de tensão de todas as barras da melhor solução encontrada pelo algoritmo após o sistema ter sido reconfigurado (SR).

Figura 31 - Níveis de tensão do sistema de 202 barras: modelo de potência constante

Fonte: do próprio autor

O limite da magnitude de tensão mínima é de 0,963 pu, na barra 132 do sistema, para a melhor topologia encontrada pelo algoritmo, enquanto que a configuração inicial possui um limite mínimo de 0,956 pu, na barra 202 do sistema. Portanto, verifica-se uma melhoria na magnitude de tensão após o processo de reconfiguração do sistema.

6.2 MODELO EXPONENCIAL DE CARGAS

Apresentam-se nesta seção os resultados do problema de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica radiais, utilizando o modelo exponencial de cargas para os sistemas de 14, 84 136 e 202 barras, em que as potências ativas e reativas são variáveis em função da tensão. As cargas relacionadas a cada barra do sistema foram divididas em 70% de cargas residenciais, 20% de cargas comerciais e 10% de cargas industriais.

6.2.1 SISTEMA DE 14 BARRAS

Na Tabela 12 apresenta-se a configuração inicial (CI) do sistema de distribuição e as 5 melhores configurações encontradas utilizando o modelo exponencial de cargas após o processo de reconfiguração.

Tabela 12 - Reconfiguração do sistema de 14 barras: modelo exponencial de cargas

Nº	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução Perdas
CI	14-15-16	483,93	
01	7-8-16	443,95	8,26%
02	4-7-8	455,81	5,81%
03	7-14-16	460,41	4,86%
04	8-15-16	466,95	3,50%
05	7-8-13	469,25	2,89%

Fonte: do próprio autor

A melhor topologia encontrada apresenta valor de perdas de 443,95 kW. Verifica-se que houve uma redução de perdas no modelo exponencial de cargas em comparação com o modelo de potência constante. Salienta-se que foram necessárias 2 iterações para a convergência do algoritmo com um tempo computacional de 0,196 segundos.

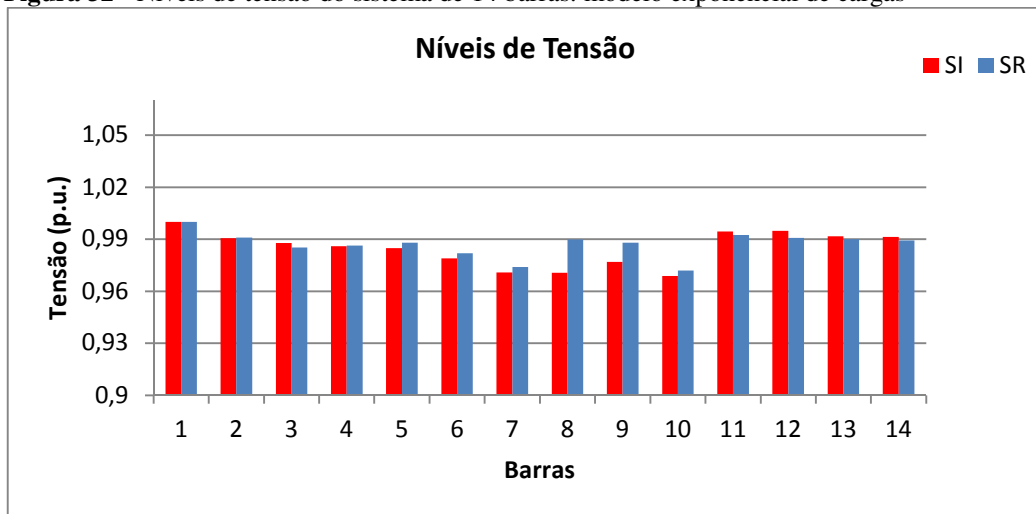
Na Tabela 13 apresentam-se os valores de custos anuais para o sistema de 14 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

Tabela 13 – Custos anuais do sistema de 14 barras: modelo exponencial de cargas

Configurações	Chaves abertas	Custos (US\$)
CI	13-14-15	433.283,90
CO	7-8-16	397.419,20

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 32 comparam-se os níveis de tensão da melhor topologia encontrada, com a configuração inicial do sistema de distribuição, utilizando modelo exponencial de cargas.

Figura 32 - Níveis de tensão do sistema de 14 barras: modelo exponencial de cargas

Fonte: do próprio autor

O limite de tensão mínima é de 0,971 pu para o sistema reconfigurado, na barra 10 do sistema, enquanto que o sistema inicial possui um limite inicial de 0,968 pu, também na barra 10. Portanto verifica-se uma melhoria no nível mínimo de magnitude de tensão. Verifica-se que não houve alteração nos níveis mínimos de tensão em comparação do modelo exponencial de cargas com o modelo de cargas com potência constante em relação ao sistema de 14 barras.

6.2.2 SISTEMA DE 84 BARRAS

Na Tabela 14 apresentam-se os resultados da configuração inicial (CI) e as 5 das melhores configurações encontradas para o sistema de 84 barras utilizando o modelo exponencial de cargas. São apresentadas também as chaves normalmente abertas que compõe cada topologia e a respectiva redução de perdas da configuração encontrada em relação à configuração inicial do sistema.

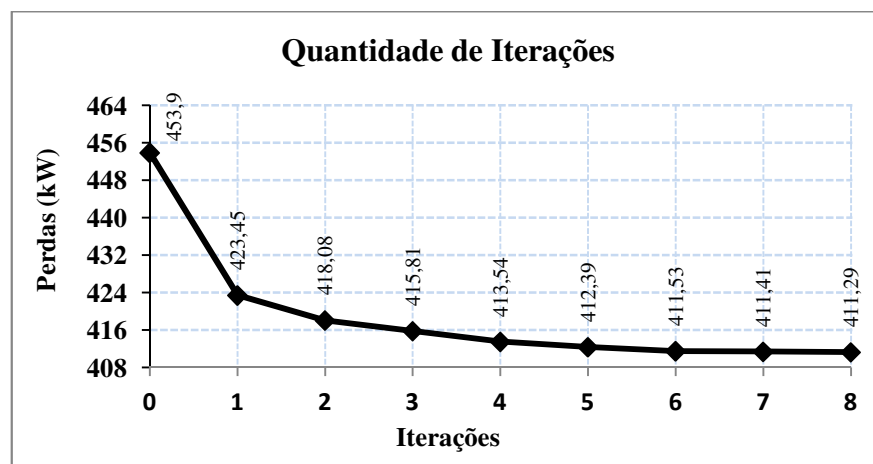
Tabela 14 – Reconfiguração do sistema de 84 barras: modelo exponencial de cargas

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de Perdas
CI	84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96	453,90	
01	13-34-39-42-55-62-72-83-85-86-89-90-92	411,29	9,38%
02	7-13-34-39-42-55-63-72-83-86-89-90-92	411,35	9,37%
03	7-13-34-39-42-55-62-72-83-86-89-90-92	411,36	9,37%
04	13-34-39-55-62-72-83-85q-86-89-90-92-95	411,41	9,36%
05	7-13-34-39-42-55-61-72-83-86-89-90-92	411,43	9,35%

Fonte: do próprio autor

A melhor solução do sistema de 84 barras apresenta um valor de perdas de 411,29 kW. Nota-se que houve uma redução no valor das perdas do modelo exponencial de cargas em comparação com o modelo de carga com potência constante. Verifica-se também que as topologias encontradas foram diferentes entre os dois modelos.

No gráfico da Figura 33 apresentam-se os valores de perdas em função da quantidade de iterações do algoritmo para o sistema de 84 barras. Salienta-se que foram necessárias 8 iterações para encontrar os resultados apresentados pelo algoritmo, com um tempo computacional de processamento de 3,885 segundos.

Figura 33 – Iterações: sistema de 84 barras com modelo exponencial de cargas

Fonte: do próprio autor

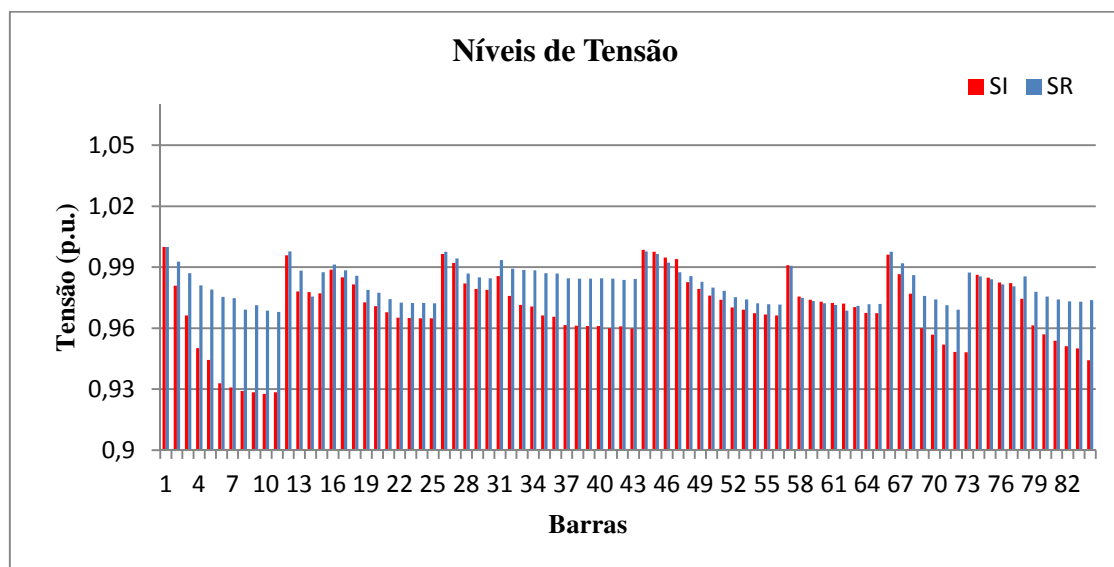
Na Tabela 15 apresentam-se os custos anuais das perdas do sistema de distribuição de 84 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

Tabela 15 – Custos anuais do sistema de 84 barras: modelo exponencial de cargas

Configurações	Chaves abertas	Custos (US\$)
CI	84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96	412.575,20
CO	13-34-39-42-55-62-72-83-85-86-89-90-92	373.080,42

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 34 comparam-se os níveis de tensão da configuração inicial e da melhor topologia encontrada após o processo de reconfiguração em relação ao sistema de 84 barras, utilizando o modelo exponencial de cargas.

Figura 34 – Níveis de tensão do sistema de 84 barras: modelo exponencial de cargas

Fonte: do próprio autor

O limite de tensão mínima é de 0,968 pu para o sistema reconfigurado, na barra 10 do sistema, enquanto que o sistema inicial possui um limite inicial de 0,927 pu, na barra 10 do sistema. Nota-se que houve um aumento significativo dos valores de tensão após a reconfiguração, como também houve um aumento destes valores no modelo exponencial de cargas, quando comparado com o modelo de cargas com potência constante.

6.2.3 SISTEMA DE 136 BARRAS

Na Tabela 16 apresentam-se os resultados da configuração inicial (CI) e das 5 melhores configurações encontradas para o sistema de 136 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

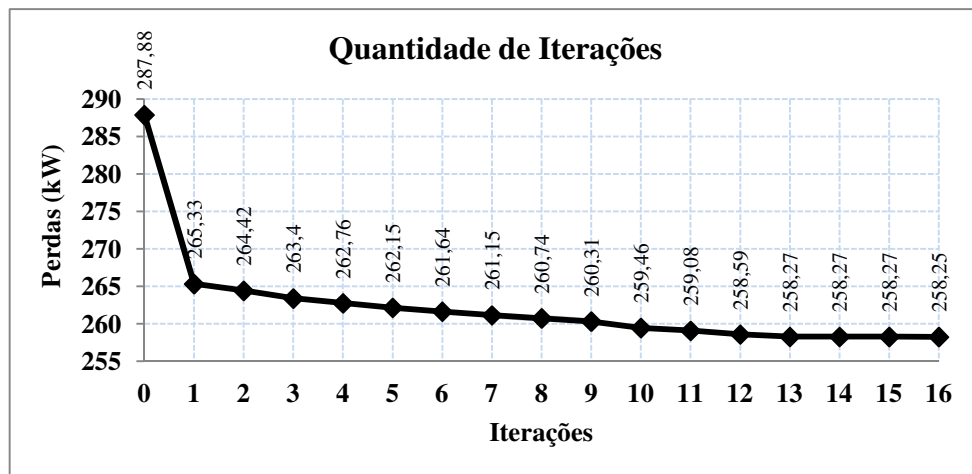
Tabela 16 - Reconfiguração do sistema de 136 barras: modelo exponencial de cargas

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de perdas
CI	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-147-148-149-150-151-152-153-154-155-156	287,88	
01	7-38-51-56-90-91-96-106-118-126-128-137-138-139-141-144-145-147-148-150-151	258,25	10,29%
02	7-38-51-56-90-91-96-106-118-126-137-138-139-141-144-145-147-148-150-151-155	258,26	10,29%
03	7-35-51-90-96-106-118-126-137-138-139-141-142-144-145-146-147-148-150-151-155	258,27	10,28%
04	7-35-51-58-90-96-106-118-126-137-138-139-141-144-145-146-147-148-150-151-155	258,35	10,25%
05	7-35-51-55-90-96-106-118-126-137-138-139-141-144-145-146-147-148-150-151-155	258,39	10,24%

Fonte: do próprio autor

A melhor topologia encontrada após o processo de reconfiguração apresenta perdas de 258,25 kW. Verifica-se que houve uma redução no valor de perdas entre os dois modelos, sendo que o modelo exponencial de cargas apresenta perdas inferiores ao modelo de carga com potência constante. Nota-se também que as topologias encontradas são diferentes entre os dois modelos.

No gráfico da Figura 35 apresentam-se os valores de perdas em função da quantidade de iterações do algoritmo proposto em relação ao sistema de 136 barras. Salienta-se que foram necessárias 16 iterações para encontrar os resultados apresentados. O tempo computacional do algoritmo é de 6,944 segundos.

Figura 35 – Iterações: sistema de 136 barras com modelo exponencial de cargas

Fonte: do próprio autor

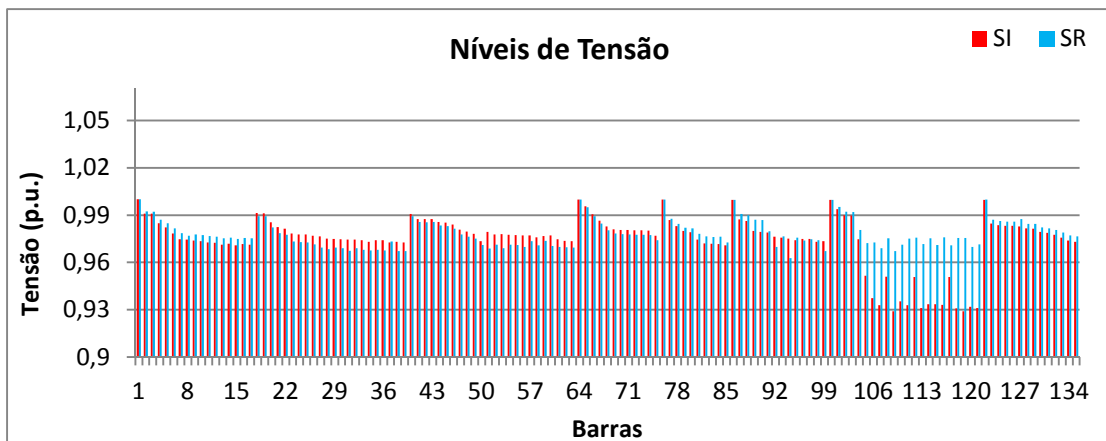
Na Tabela 17 apresentam-se os custos anuais das perdas do sistema de 136 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

Tabela 17 – Custos anuais do sistema de 136 barras: modelo exponencial de cargas

Configurações	Chaves abertas	Custos (US\$)
CI	136-137-138-139-140-141-142-143-144-145-146-	259.082,30
	147-148-149-150-151-152-153-154-155-156	
CO	7-38-51-56-90-91-96-106-118-126-128-137-138-	232.355,38
	139-141-144-145-147-148-150-151	

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 36 comparam-se os níveis de tensão da topologia do sistema inicial e reconfigurado em relação ao sistema de 136 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

Figura 36 – Níveis de tensão do sistema de 136 barras: modelo exponencial de cargas

Fonte: do próprio autor

O limite de tensão mínima é de 0,962 pu para o sistema reconfigurado, na barra 94 do sistema, enquanto que o sistema inicial possui um limite mínimo de 0,929 pu, na barra 109 do sistema. Nota-se que houve uma melhora significativa nos níveis de tensão do sistema, como também houve um aumento nos valores de tensão no modelo exponencial de cargas em relação ao modelo de potência constante após o processo de reconfiguração.

6.2.4 SISTEMA DE 202 BARRAS

Na Tabela 18 apresentam-se os resultados da configuração inicial (CI) e das 5 melhores configurações encontradas para o sistema de 202 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

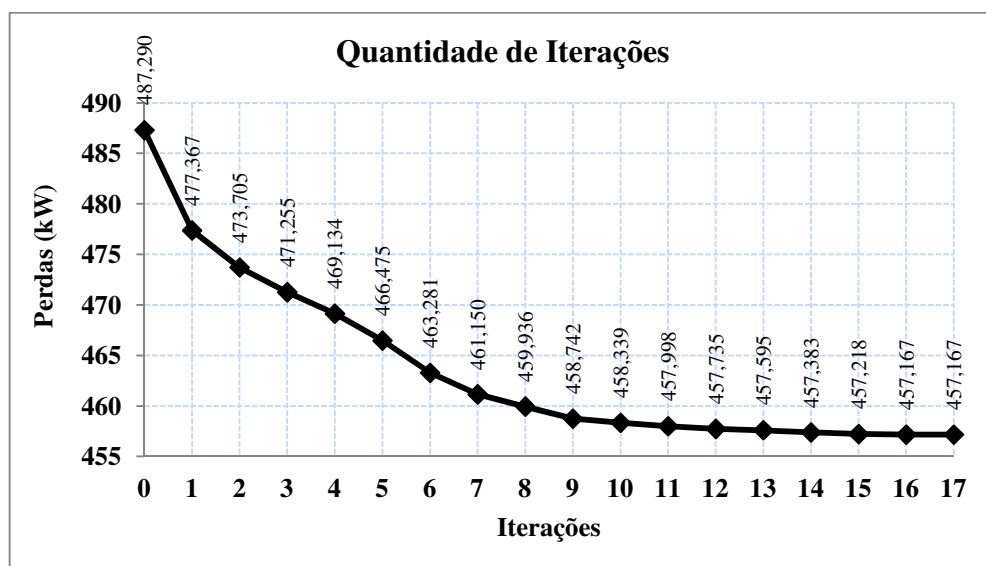
A melhor topologia encontrada apresenta perdas de 457,16 kW. Verifica-se que houve uma redução no valor de perdas entre os dois modelos, sendo que o modelo exponencial de cargas apresenta perdas inferiores ao modelo de carga com potência constante. Nota-se também que as topologias encontradas são diferentes com relação aos modelos citados.

Tabela 18 - Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	% Redução de perdas
CI	202-203-204-205-206-207-208-209-210-211-212-213-214-215-216	487,29	
01	27-53-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-200-202-208	457,16	6,18%
02	29-54-106-114-122-127-158-171-182-193-199-201-202-208-211	457,17	6,18%
03	29-54-106-114-122-127-158-171-182-193-199-200-202-208-211	457,18	6,17%
04	27-54-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-200-202-208	457,21	6,17%
05	27-54-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-201-202-208	457,23	6,16%

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 37 apresentam-se os valores de perdas em função da quantidade de iterações do algoritmo em relação ao sistema de 202 barras. Salienta-se que foram necessárias 17 iterações para encontrar os resultados apresentados. O tempo computacional do algoritmo é de 12,590 segundos.

Figura 37 – Iterações: sistema de 202 barras com modelo exponencial de cargas

Fonte: do próprio autor

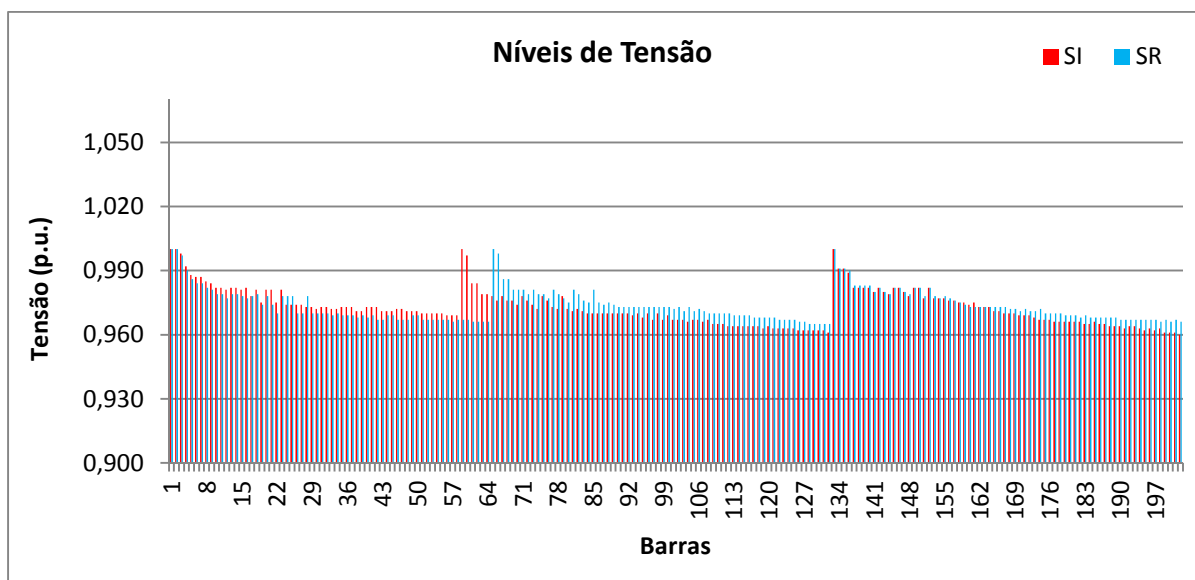
Na Tabela 19 apresentam-se os custos relacionados às perdas anuais para o sistema de 202 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

Tabela 19 – Custos anuais do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas

Configurações	Chaves abertas	Custos US\$
CI	202-203-204-205-206-207-208-	441.076,30
	209-210-211-212 213-214-215-216	
CO	27-53-106-114-122-127-137-158-	408.130,64
	171-182-193-199-200-202-208	

Fonte: do próprio autor

No gráfico da Figura 38 comparam-se os níveis de tensão da topologia inicial e da melhor topologia encontrada em relação ao sistema de 202 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

Figura 38 – Níveis de tensão do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas

Fonte: do próprio autor

O limite de tensão mínima é de 0,965 pu para o sistema reconfigurado, na barra 132 do sistema, enquanto que o sistema inicial possui um limite mínimo de 0,960 pu, na barra 202. Nota-se que houve uma melhora significativa nos níveis de tensão do sistema, como também houve um aumento nos valores de tensão no modelo exponencial de cargas em relação ao modelo de potência constante após a reconfiguração.

6.3 RECONFIGURAÇÕES BASEADAS NO AUMENTO DA DEMANDA DE CARGAS DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesta seção apresenta-se um estudo baseado no crescimento das cargas da rede de distribuição após um período específico de tempo. Considera-se um aumento de 10% nas cargas das barras 154 a 202 do sistema de 202 barras. São apresentados resultados utilizando o modelo de potência constante e o modelo exponencial de cargas. Na Tabela 20 apresentam-se os resultados da reconfiguração baseada no aumento da demanda de cargas para o modelo de potência constante. Apresenta-se a configuração inicial (CI) e a configuração ótima (CO) após o aumento da demanda de cargas.

Tabela 20 – Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo de potência constante

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	V_{min} (p.u)
CI	29-54-106-114-122-127-158-171-182-193-199-200-202-208-211	578,22	0.955
CO	27-53-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-200-202-208	574,53	0.964

Fonte: do próprio autor

Os custos das perdas anuais para o sistema é de US\$ 506.969,22, em que a topologia ótima para o sistema no período anual é a mesma apresentada na Tabela 20 (CO). Na Tabela 21 apresentam-se os resultados encontrados para o modelo exponencial de cargas devido ao crescimento das demandas de energia elétrica no sistema.

Tabela 21 – Reconfiguração do sistema de 202 barras: modelo exponencial de cargas

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	V_{min} (p.u)
CI	27-53-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-200-202-208	557,32	0.961
CO	27-54-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-201-202-208	554,09	0.967

Fonte: do próprio autor

Os custos das perdas anuais para o sistema é de US\$ 491.719,30 sendo a topologia ótima da reconfiguração anual a mesma topologia apresentada na Tabela 21 (CO) após o aumento das demandas de energia elétrica no sistema.

6.4 RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA RADIAL COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Nesta seção realiza-se a reconfiguração do sistema de 202 barras considerando a inserção de um gerador distribuído. Considera-se um gerador de 1.000 kW de potência ativa e 600 kVar de potência reativa inserido na barra 190 do sistema. Na Tabela 22 apresentam-se os resultados encontrados para o modelo de cargas com potência constante e geração distribuída, sendo que CI representa a configuração inicial e CO representa a topologia ótima com geração distribuída.

Tabela 22 – Reconfiguração do sistema de 202 barras com geração distribuída

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	V_{min} (p.u)
CI	29-54-106-114-122-127-158-171-182-193-199-200-202-208-211	508,47	0.963
CO	28-66-74-83-111-118-125-131-135-136-140-176-199-202-208	471,99	0.971

Fonte: do próprio autor

Os custos anuais relacionados as perdas são de US\$ 416.950,53, sendo a topologia ótima a mesma encontrada na Tabela 22 (CO). Na Tabela 23 apresentam-se os resultados com geração distribuída para o sistema de 202 barras utilizando o modelo exponencial de cargas.

Tabela 23 – Reconfiguração do sistema de 202 barras com geração distribuída

Nº.	Chaves abertas	Perdas (kW)	V_{min} (p.u)
CI	27-53-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-200-202-208	457,16	0.965
CO	29-54-106-114-122-127-137-158-171-182-193-199-201-202-208	422,62	0.972

Fonte: do próprio autor

Os custos das perdas anuais são de US\$ 383.496,92 sendo a topologia ótima para o período anual a mesma topologia ótima apresentada na Tabela 23 (CO).

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi proposto um algoritmo de busca dispersa (BD) dedicado ao problema de reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica, considerando como sistema de codificação a representação nó profundidade (RNP).

Os operadores PAO, CAO e EHR se mostraram adequados na implementação do algoritmo produzindo somente soluções radiais. O algoritmo também permitiu encontrar de forma rápida soluções de excelente qualidade utilizando os critérios de qualidade e diversidade que foram avaliadas através de um fluxo de carga do tipo varredura.

O algoritmo proposto se mostrou válido para a metodologia proposta, como também se mostrou rápido e eficaz. Os resultados apresentaram soluções de boa qualidade permitindo reduzir as perdas do sistema e aumentar os níveis de tensão nos pontos de carga após a reconfiguração.

O modelo exponencial de cargas permitiu mostrar que as perdas apresentam valores inferiores em um sistema de distribuição em comparação com o modelo de carga com potência constante, além do que, na maioria dos casos, são encontradas diferentes topologias ótimas em relação aos dois modelos. Consequentemente os custos relacionados às perdas anuais de energia, também apresentam valores inferiores utilizando o modelo exponencial de cargas. Nota-se também que o modelo exponencial de cargas apresenta níveis maiores de tensão nos pontos de carga do que o modelo de cargas com potência constante.

O aumento da demanda de cargas em alguns setores da rede forneceu outra topologia ótima para o sistema de distribuição operar no estado de mínimas perdas após o processo de reconfiguração. O gerador distribuído em um sistema de distribuição permitiu reduzir as perdas de energia no sistema, como também gerou outra configuração ótima para a rede de distribuição.

Apesar de não se garantir que as soluções sejam ótimas para os sistemas testados, pois não é possível analisar explicitamente todas as configurações radiais possíveis, salienta-se que os resultados obtidos utilizando o modelo de potência constante, foram exatamente iguais quando comparados com outras referências bibliográficas revisadas, conhecidas na literatura.

Portanto este trabalho permitiu uma nova metodologia de resolução do problema de reconfiguração de sistemas de energia elétrica, utilizando uma nova meta-heurística e atendendo a todas as restrições físicas e operacionais do problema.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

Propor melhorias no modelo do problema de reconfiguração considerando a relação entre custos com mão de obra e benefícios para reconfigurar à rede.

Incluir na função objetivo e restrições aspectos relacionados com a confiabilidade da rede e o sistema de controle e proteção.

Incluir no modelo a presença de geradores distribuídos e os impactos dos mesmos no problema de reconfiguração da rede.

Desenvolver o modelo de reconfiguração para redes desequilibradas.

REFERÊNCIAS

- ABUR, A. Determining the optimal radial network topology within the line flow constraints. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS – ISCAS, 96., 1996, Atlanta. *Anais...* New York: IEEE, 1996a. p. 673-676.
- ABUR, A. A modified linear programming method for distribution system reconfiguration. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Oxford, v. 18, n. 7, p. 469-474, 1996b.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANNEL. Módulo 8 - qualidade da energia elétrica. In: _____. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST*. Brasília: ANNEL, 2012. p. 1 – 71.
- AMASIFEN, J. C. *Algoritmo evolutivo dedicado à solução do problema de reconfiguração de sistemas de distribuição radiais*. 2003. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2003.
- AMASIFEN, J. C. ROMERO, R.; MANTOVANI, J. R. S. Algoritmos evolutivos dedicado a reconfiguração de redes de distribuição sob demandas fixas e variáveis- estudo dos operadores genéticos e parâmetros de controle. *Revista Controle & Automação*, Campinas, v. 16, n. 3, p. 303-317, 2005.
- ARCANJO, D. N.; PEREIRA, J. L. R.; GARCIA, P. A. N.; OLIVEIRA, E. J.; VARIZ, A. M. *Modelagem de carga a partir de dados de medição*. Bonito: Universidade Federal de Juiz de Fora, p. 1230-1236, 2010.
- BARAN, M. E.; Wu, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, 1989.
- BOROZAN, V.; RAJICIC, D.; ACKOVSKI, R. Improved method for loss minimization in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 10, n. 3, p. 1420-1425, August, 1995.
- BOUCHARD, D. Applications of hopfield neural-networks to distribution feeder reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Ontário, v. 4, n. 2, p. 311–316, 1993.
- CARREÑO, E. M.; MOREIRA, N.; ROMERO, R. Distribution network reconfiguration using an efficient evolutionary algorithm. In: IEEE PES GENERAL MEETING, 2007, Tampa, *Proceedings...* New York: IEEE, 2007. p. 1-6,
- CASARI, F. *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica para o planejamento da operação*. 1988. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 1988.
- CASPER, S. G. (Ed.). Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation. *IEEE Transactions on Power System*, Piscataway, v. 10, n. 1, p. 523–538, Feb. 1995.

CASTRO, C. A. *Reconfiguração automática de redes de distribuição de energia elétrica*. 1985. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1985.

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

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*, New York, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005.

DELBEM, A. C. B., CARVALHO, A. de; POLICASTRO, C. A.; PINTO, A. K. O.; HONDA, K.; GARCIA A. C. *Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design*. São Carlos: Escola de engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 2004. p. 678-687.

GLAMOCANIN, V. Optimal loss reduction of distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 72, n. 3, p. 774-782, 1990.

GONÇALVES, R. R. *Modelos de programação linear inteira mista para resolver problemas de otimização dos sistemas de distribuição de energia elétrica radiais*. 2013. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

GUIMARÃES, M. N. *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu*. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LAGUNA, M.; MARTÍ, R. *Scater search: methodology and implementations in C*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 1-291.

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

LIN, H. C. C. W. M. A new approach for distribution feeder reconfiguration for loss reduction and service restoration. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 13, n. 3, p. 870–875, 1998.

LIMA, T. W. *Estrutura de dados eficientes para algoritmos evolutivos aplicados a projetos de rede*. 2009. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MANTOVANI, J. R. S.; CASARI, F.; ROMERO R. Reconfiguração de sistema de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. *SBA Controle e Automação*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 150-159, 2000.

MARTÍ, R.; LAGUNA, M.; GLOVER, F. *Principles of scatter search*. Valência: Universidade de Valencia, 2003.

MENESES, C. A. P. *Desenvolvimento de técnicas e modelos matemáticos para solução do problema de planejamento da expansão e operação de sistemas de distribuição de energia elétrica com geradores distribuídos*. 2013. 183 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

MERLIN, A.; BACK, H. Search for a minimal-loss operating spanning tree configuration in an urban power distribution system. In: POWER SYSTEM COMPUTATION CONFERENCES, 1975, Zurich. *Proceedings...* Zurich: Cambridge, 1975. p. 1-18.

MONTICELLI, A. J. *Fluxo de carga em redes de energia elétrica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1983. p. 1-187.

NARA, K.; KITAGAWA, M. Distribution systems loss minimum re-configuration by simulated annealing method. In: ADVANCES IN POWER SYSTEM CONTROL, OPERATION AND MANAGEMENT, INTERNATIONAL CONFERENCE, 1991, Hon Kong. *Conference...* Hon Kong: [s.n.], 1991.

NARA, K. et al. Implementation of genetic algorithm for distribution systems loss minimum reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*, New York, v. 7, n. 3, p. 1044-1051, 1992.

OLIVEIRA, M. B. C. de. *Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição usando a meta-heurística GRASP*. 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

PEREIRA, F. S. *Reconfiguração ótima de sistema de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas*. 2010. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

ROMERO, R. Reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição de energia elétrica usando um algoritmo genético modificado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2001, Campos do Jordão. *Anais...* Campos do Jordão: [s.n.], 2001. p. 551-560

SANCHES, D. S. *Algoritmo evolutivo multi-objetivo para reconfiguração de redes em sistemas de distribuição de energia elétrica*. 2013. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

SANTOS, A. C. *Algoritmo evolutivo computacionalmente eficiente para reconfiguração de sistemas de distribuição*. 2009. 186 f. Tese (Doutorado em engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

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

SHIMOHAMMADI, D.; HONG, H. W. Reconfiguration of electric distribution for resistive line loss reduction. *IEEE Transactions on Power Delivery*, New York, v. 4, n. 2, p. 1492-1498, 1989.

SINGH, D; MISRA, R. K; SINGH, D. Effect of load models in distributed generation planning. *IEEE Transactions On Power Systems*, New York, v. 22, n. 4, p. 2204-2212, 2007.

SOUZA, S. S. F. *Algoritmo GRASP especializado aplicado ao problema de reconfiguração de alimentadores em sistemas de distribuição*. 2013. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

ZVIETCOVICH W. G. *Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando a meta-heurística busca em vizinhança variável*. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

ANEXO A - TRABALHO ACEITO PARA PUBLICAÇÃO PELO AUTOR

Neste anexo apresenta-se o artigo aceito para publicação relacionado com a pesquisa de mestrado.

RUPOLO, D.; MANTOVANI, J. R. S. Reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica através de um algoritmo de busca Dispersa. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 46, 2013, Natal. 2013. In: *Simpósio...* Natal: [s.n], 2013.

ANEXO B – DADOS DOS SISTEMAS TESTES

Neste anexo são apresentados os dados dos sistemas testes de 14, 84, 136 e 202 barras, utilizados no algoritmo de reconfiguração de redes de distribuição de energia elétrica.

SISTEMA DE 14 BARRAS

Sistema de 14 barras com 3 alimentadores, 13 chaves normalmente fechadas, 3 chaves normalmente abertas, tensão de 23 kV e potência base de 100 MVA.

Tabela 24 - Dados do sistema teste de 14 barras

Ramo/Barra	De	Para	Res. (p.u.)	Reat. (p.u.)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0.075	0.1	0.0	0.0
2	2	3	0.08	0.11	2000	1600.0
3	2	4	0.09	0.18	3000.0	400.0
4	4	5	0.04	0.04	2000.0	-400.0
5	1	6	0.11	0.11	1500.0	1200.0
6	6	7	0.08	0.11	4000.0	2700.0
7	6	8	0.11	0.11	5000.0	1800.0
8	7	9	0.11	0.11	1000.0	900.0
9	7	10	0.08	0.11	600.0	-500.0
10	1	11	0.11	0.11	4500.0	-1700.0
11	11	12	0.09	0.12	1000.0	900.0
12	11	13	0.08	0.11	1000.2	-1100.0
13	13	14	0.04	0.04	1000.0	900.0
14	3	9	0.04	0.04	2100.0	-800.0
15	8	12	0.04	0.04		
16	5	14	0.09	0.12		

Fonte: Cinvalar et al. (1988)

SISTEMA TESTE 84 BARRAS

Sistema de 84 barras com 11 alimentadores, 83 chaves normalmente fechadas, 13 chaves normalmente abertas, tensão de 11,4 kV e potência base de 100 MVA.

Tabela 25 - Dados do sistema teste de 84 barras

Ramo/Barra	De	Para	Res. (Ω)	Reat. (Ω)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0.1944	0.6624	0	0
2	2	3	0.2096	0.4304	0	0
3	3	4	0.2358	0.4842	100	50
4	4	5	0.0917	0.1883	300	200
5	5	6	0.2096	0.4304	350	250
6	6	7	0.0393	0.0807	220	100
7	7	8	0.0405	0.138	1100	800
8	8	9	0.1048	0.2152	400	320
9	8	10	0.2358	0.4842	300	200
10	8	11	0.1048	0.2152	300	230
11	1	12	0.0786	0.1614	300	260
12	12	13	0.3406	0.6944	0	0
13	13	14	0.0262	0.0538	1200	800
14	13	15	0.0786	0.1614	800	600
15	1	16	0.1134	0.3864	700	500
16	16	17	0.0524	0.1076	0	0
17	17	18	0.0524	0.1076	300	150
18	18	19	0.1572	0.3228	500	350
19	19	20	0.0393	0.0807	700	400
20	20	21	0.1703	0.3497	1200	1000
21	21	22	0.2358	0.4842	300	300
22	22	23	0.1572	0.3228	400	350
23	22	24	0.1965	0.4035	50	20
24	24	25	0.131	0.269	50	20
25	1	26	0.0567	0.1932	50	10
26	26	27	0.1048	0.2152	50	30
27	27	28	0.2489	0.5111	100	60
28	28	29	0.0486	0.1656	100	70
29	29	30	0.131	0.269	1800	1300
30	1	31	0.1965	0.396	200	120
31	31	32	0.131	0.269	0	0

32	32	33	0.131	0.269	1800	1600
33	33	34	0.0262	0.0538	200	150
34	34	35	0.1703	0.3497	200	100
35	35	36	0.0524	0.1076	800	600
36	36	37	0.4978	1.0222	100	60
37	37	38	0.0393	0.0807	100	60
38	38	39	0.0393	0.0807	20	10
39	39	40	0.0786	0.1614	20	10
40	40	41	0.2096	0.4304	20	10
41	39	42	0.1965	0.4035	20	10
42	42	43	0.2096	0.4304	200	160
43	1	44	0.0486	0.1656	50	30
44	44	45	0.0393	0.0807	0	0
45	45	46	0.131	0.269	30	20
46	46	47	0.2358	0.4842	800	700
47	1	48	0.243	0.828	200	150
48	48	49	0.0655	0.1345	0	0
49	49	50	0.0655	0.1345	0	0
50	50	51	0.0393	0.0807	0	0
51	51	52	0.0786	0.1614	200	160
52	52	53	0.0393	0.0807	800	600
53	53	54	0.0786	0.1614	500	300
54	54	55	0.0524	0.1076	500	350
55	55	56	0.131	0.269	500	300
56	1	57	0.2268	0.7728	200	80
57	57	58	0.5371	1.1029	0	0
58	58	59	0.0524	0.1076	30	20
59	59	60	0.0405	0.138	600	420
60	60	61	0.0393	0.0807	0	0
61	61	62	0.0262	0.0538	20	10
62	62	63	0.1048	0.2152	20	10
63	63	64	0.2358	0.4842	200	130
64	64	65	0.0243	0.0828	300	240
65	1	66	0.0486	0.1656	300	200
66	66	67	0.1703	0.3497	0	0
67	67	68	0.1215	0.414	50	30
68	68	69	0.2187	0.7452	0	0
69	69	70	0.0486	0.1656	400	360
70	70	71	0.0729	0.2484	0	0

71	71	72	0.0567	0.1932	0	0
72	72	73	0.0262	0.0528	2000	1500
73	1	74	0.324	1.104	200	150
74	74	75	0.0324	0.1104	0	0
75	75	76	0.0567	0.1932	0	0
76	76	77	0.0486	0.1656	1200	950
77	1	78	0.2511	0.8556	300	180
78	78	79	0.1296	0.4416	0	0
79	79	80	0.0486	0.1656	400	360
80	80	81	0.131	0.264	2000	1300
81	81	82	0.131	0.264	200	140
82	82	83	0.0917	0.1883	500	360
83	83	84	0.3144	0.6456	100	30
84	6	56	0.131	0.269	400	360
85	8	61	0.131	0.269		
86	12	44	0.131	0.269		
87	13	73	0.3406	0.6994		
88	14	77	0.4585	0.9415		
89	15	19	0.5371	1.0824		
90	17	27	0.0917	0.1883		
91	21	84	0.0786	0.1614		
92	29	33	0.0524	0.1076		
93	30	40	0.0786	0.1614		
94	35	47	0.0262	0.0538		
95	41	43	0.1965	0.4035		
96	54	65	0.0393	0.0807		

Fonte: Chiou, Chang e Su (2005)

SISTEMA DE 136 BARRAS

Sistema de 136 barras com 8 alimentadores, 135 chaves normalmente fechadas, 21 chaves normalmente abertas, tensão de 13,8 kV e potência base de 100 MVA.

Tabela 26 - Dados do sistema teste de 136 barras

Ramo/Barra	De	Para	Res. (Ω)	Reat. (Ω)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0.33205	0.76653	0.0	0.0
2	2	3	0.00188	0.00433	0.0	0.0
3	3	4	0.22324	0.51535	47.780	19.009
4	4	5	0.09943	0.22953	42.551	16.929
5	5	6	0.15571	0.35945	87.022	34.622
6	6	7	0.16321	0.37677	311.310	123.855
7	7	8	0.11444	0.26417	148.869	59.228
8	7	9	0.05675	0.05666	238.672	94.956
9	9	10	0.52124	0.27418	62.299	24.786
10	9	11	0.10877	0.10860	124.598	49.571
11	11	12	0.39803	0.20937	140.175	55.768
12	11	13	0.91744	0.31469	116.813	46.474
13	11	14	0.11823	0.11805	249.203	99.145
14	14	15	0.50228	0.26421	291.447	115.952
15	14	16	0.05675	0.05666	303.720	120.835
16	16	17	0.29379	0.15454	215.396	85.695
17	1	18	0.33205	0.76653	198.586	79.007
18	18	19	0.00188	0.00433	0.0	0.0
19	19	20	0.22324	0.51535	0.0	0.0
20	20	21	0.10881	0.25118	0.0	0.0
21	21	22	0.71078	0.37388	30.127	14.729
22	21	23	0.18197	0.42008	230.972	112.920
23	23	24	0.30326	0.15952	60.256	29.458
24	23	25	0.02439	0.05630	230.972	112.920
25	25	26	0.04502	0.10394	120.507	58.915
26	26	27	0.01876	0.04331	0.0	0.0
27	27	28	0.11823	0.11805	56.981	27.857
28	28	29	0.02365	0.02361	364.665	178.281
29	29	30	0.18954	0.09970	0.0	0.0
30	30	31	0.39803	0.20937	124.647	60.939
31	29	32	0.05675	0.05666	56.981	27.857

32	32	33	0.09477	0.04985	0.0	0.0
33	33	34	0.41699	0.21934	85.473	41.787
34	34	35	0.11372	0.05982	0.0	0.0
35	32	36	0.07566	0.07555	396.735	193.960
36	36	37	0.36960	0.19442	0.0	0.0
37	37	38	0.26536	0.13958	181.152	88.563
38	36	39	0.05675	0.05666	242.172	118.395
39	1	40	0.33205	0.76653	75.316	36.821
40	40	41	0.11819	0.27283	0.0	0.0
41	41	42	2.96288	1.01628	1.254	0.531
42	41	43	0.00188	0.00433	6.274	2.660
43	43	44	0.06941	0.16024	0.0	0.0
44	44	45	0.81502	0.42872	117.880	49.971
45	44	46	0.06378	0.14724	62.668	26.566
46	46	47	0.13132	0.30315	172.28	73.034
47	47	48	0.06191	0.14291	458.556	194.388
48	48	49	0.11444	0.26417	262.962	111.473
49	49	50	0.28374	0.28331	235.761	99.942
50	50	51	0.28374	0.28331	0.0	0.0
51	49	52	0.04502	0.10394	109.215	46.298
52	52	53	0.02626	0.06063	0.0	0.0
53	53	54	0.06003	0.13858	72.809	30.865
54	54	55	0.03002	0.06929	258.473	109.570
55	55	56	0.02064	0.04764	69.169	29.322
56	53	57	0.10881	0.25118	21.843	9.260
57	57	58	0.25588	0.13460	0.0	0.0
58	58	59	0.41699	0.21934	20.527	8.702
59	59	60	0.50228	0.26421	150.54	63.819
60	60	61	0.33170	0.17448	220.68	93.552
61	61	62	0.20849	0.10967	92.384	39.163
62	48	63	0.13882	0.32047	0.0	0.0
63	1	64	0.00750	0.01732	226.693	96.098
64	64	65	0.27014	0.62362	0.0	0.0
65	65	66	0.38270	0.88346	294.016	116.974
66	66	67	0.33018	0.76220	83.015	33.028
67	67	68	0.32830	0.75787	83.015	33.028
68	68	69	0.17072	0.39409	103.77	41.285
69	69	70	0.55914	0.29412	176.408	70.184
70	69	71	0.05816	0.13425	83.015	33.028

71	71	72	0.70130	0.36890	217.917	86.698
72	72	73	1.02352	0.53839	23.294	9.267
73	71	74	0.06754	0.15591	5.075	2.019
74	74	75	1.32352	0.45397	72.638	28.899
75	1	76	0.01126	0.02598	405.99	161.5235
76	76	77	0.72976	1.68464	0.0	0.0
77	77	78	0.22512	0.51968	100.182	42.468
78	78	79	0.20824	0.48071	142.52	60.417
79	79	80	0.04690	0.10827	96.042	40.713
80	80	81	0.61950	0.61857	300.45	127.366
81	81	82	0.34049	0.33998	141.238	59.873
82	82	83	0.56862	0.29911	279.847	118.631
83	82	84	0.10877	0.10860	87.312	37.013
84	84	85	0.56862	0.29911	243.84	103.371
85	1	86	0.01126	0.02598	247.750	105.025
86	86	87	0.41835	0.96575	0.0	0.0
87	87	88	0.10499	0.13641	89.878	38.101
88	87	89	0.43898	1.01338	1137.280	482.108
89	89	90	0.07520	0.02579	458.33	194.296
90	90	91	0.07692	0.17756	385.197	163.290
91	91	92	0.33205	0.76653	0.0	0.0
92	92	93	0.08442	0.19488	79.608	33.747
93	93	94	0.13320	0.30748	87.312	37.013
94	94	95	0.29320	0.29276	0.0	0.0
95	95	96	0.21753	0.21721	74.001	31.370
96	96	97	0.26482	0.26443	232.050	98.369
97	94	98	0.10318	0.23819	141.819	60.119
98	98	99	0.13507	0.31181	0.0	0.0
99	1	100	0.00938	0.02165	76.449	32.408
100	100	101	0.16884	0.38976	0.0	0.0
101	101	102	0.11819	0.27283	51.322	21.756
102	102	103	2.28608	0.78414	59.874	25.381
103	102	104	0.45587	1.05236	9.065	3.843
104	104	105	0.69600	1.60669	2.092	0.887
105	105	106	0.45774	1.05669	16.735	7.094
106	106	107	0.20298	0.26373	1506.522	638.634
107	107	108	0.21348	0.27737	313.023	132.694
108	108	109	0.54967	0.28914	79.831	33.842
109	109	110	0.54019	0.28415	51.322	21.756

110	108	111	0.04550	0.05911	0.0	0.0
111	111	112	0.47385	0.24926	202.435	85.815
112	112	113	0.86241	0.45364	60.823	25.784
113	113	114	0.56862	0.29911	45.618	19.338
114	109	115	0.77711	0.40878	0.0	0.0
115	115	116	1.08038	0.56830	157.07	66.584
116	110	117	1.09933	0.57827	0.0	0.0
117	117	118	0.47385	0.24926	250.14	106.041
118	105	119	0.32267	0.74488	0.0	0.0
119	119	120	0.14633	0.33779	69.809	29.593
120	120	121	0.12382	0.28583	32.072	13.596
121	1	122	0.01126	0.02598	61.084	25.894
122	122	123	0.64910	1.49842	0.0	0.0
123	123	124	0.04502	0.10394	94.622	46.260
124	124	125	0.52640	0.18056	49.858	24.375
125	124	126	0.02064	0.04764	123.164	60.214
126	126	127	0.53071	0.27917	78.350	38.304
127	126	128	0.09755	0.22520	145.475	71.121
128	128	129	0.11819	0.27283	21.369	10.447
129	128	130	0.13882	0.32047	74.789	36.564
130	130	131	0.04315	0.09961	227.92	111.431
131	131	132	0.09192	0.21220	35.614	17.411
132	132	133	0.16134	0.37244	249.295	121.877
133	133	134	0.37832	0.37775	316.722	154.842
134	134	135	0.39724	0.39664	333.817	163.199
135	135	136	0.29320	0.29276	249.295	121.877
136	8	74	0.13132	0.30315	0.0	0.0
137	10	25	0.26536	0.13958		
138	16	84	0.14187	0.14166		
139	39	136	0.08512	0.08499		
140	26	52	0.04502	0.10394		
141	51	97	0.14187	0.14166		
142	56	99	0.14187	0.14166		
143	63	121	0.03940	0.09094		
144	67	80	0.12944	0.29882		
145	80	132	0.01688	0.03898		
146	85	136	0.33170	0.17448		
147	92	105	0.14187	0.14166		
148	91	130	0.07692	0.17756		

149	91	104	0.07692	0.17756
150	93	105	0.07692	0.17756
151	93	133	0.07692	0.17756
152	97	121	0.26482	0.26443
153	111	48	0.49696	0.64567
154	127	77	0.17059	0.08973
155	129	78	0.05253	0.12126
156	136	99	0.29320	0.29276

Fonte: Mantovani, Casari e Romero (2000).

SISTEMA DE 202 BARRAS

Sistema de 202 barras com 3 alimentadores, 201 chaves normalmente fechadas, 15 chaves normalmente abertas, tensão de 13,8 kV e potência base de 100 MVA.

Tabela 27 - Dados do sistema teste de 202 barras

Ramo/Barra	De	Para	Res. (Ω)	Reat. (Ω)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1	2	0.00001	0.00001	0.00	0.00
2	2	3	0.0188300	0.0423200	0.00	0.00
3	3	4	0.0659050	0.1481200	38.25	23.70
4	4	5	0.0376600	0.0846400	0.00	0.00
5	5	6	0.0188300	0.0423200	63.75	39.50
6	6	7	0.00001	0.00001	0.00	0.00
7	7	8	0.0188300	0.0423200	0.00	0.00
8	8	9	0.0169470	0.0380880	38.25	23.70
9	9	10	0.0188300	0.0423200	95.20	58.99
10	10	11	0.00001	0.00001	63.75	39.50
11	11	12	0.0593500	0.0465400	0.00	0.00
12	10	13	0.0188300	0.0423200	510.00	316.02
13	13	14	0.00001	0.00001	0.00	0.00
14	10	15	0.00001	0.00001	0.00	0.00
15	15	16	0.0467050	0.0244500	0.00	0.00
16	16	17	0.0934100	0.0489000	63.75	39.50
17	17	18	0.0747280	0.0391200	127.50	79.01
18	17	19	0.1868200	0.0978000	63.75	39.50
19	19	20	0.0747280	0.0391200	63.75	39.50
20	14	21	0.0376600	0.0846400	255.00	158.01
21	21	22	0.0414260	0.0931040	0.00	0.00
22	22	23	0.00001	0.00001	0.00	0.00
23	23	24	0.0065900	0.0148120	255.00	158.01
24	24	25	0.0065900	0.0148120	255.00	158.01
25	25	26	0.00001	0.00001	382.50	237.02
26	26	27	0.0244790	0.0550160	0.00	0.00
27	25	28	0.00001	0.00001	191.25	118.51
28	28	29	0.0653870	0.0342300	0.00	0.00
29	29	30	0.0467050	0.0244500	51.00	31.60
30	30	31	0.0467050	0.0244500	95.63	59.25
31	31	32	0.0467050	0.0244500	95.63	59.25

32	32	33	0.0594160	0.0202600	0.00	0.00
33	32	34	0.0891240	0.0303900	350.63	217.26
34	29	35	0.0934100	0.0489000	350.63	217.26
35	35	36	0.00001	0.00001	0.00	0.00
36	36	37	0.0373640	0.0195600	0.00	0.00
37	35	38	0.00001	0.00001	63.75	39.50
38	38	39	0.0373640	0.0195600	0.00	0.00
39	27	40	0.0094150	0.0211600	95.63	59.25
40	40	41	0.0371350	0.0126625	0.00	0.00
41	40	42	0.0094150	0.0211600	255.00	158.01
42	42	43	0.0094150	0.0211600	0.00	0.00
43	43	44	0.0094150	0.0211600	191.25	118.51
44	42	45	0.0594160	0.0202600	95.63	59.25
45	45	46	0.00001	0.00001	0.00	0.00
46	46	47	0.0371350	0.0126625	0.00	0.00
47	45	48	0.00001	0.00001	63.75	39.50
48	48	49	0.0371350	0.0126625	0.00	0.00
49	44	50	0.0141220	0.0317400	605.63	375.27
50	50	51	0.0131810	0.0296240	573.75	355.52
51	51	52	0.0112980	0.0253920	191.25	118.51
52	52	53	0.0112980	0.0253920	255.00	158.01
53	53	54	0.0112980	0.0253920	765.00	474.03
54	54	55	0.0112980	0.0253920	255.00	158.01
55	55	56	0.0742700	0.0253250	0.00	0.00
56	56	57	0.00001	0.00001	0.00	0.00
57	57	58	0.1039780	0.0354550	318.75	197.51
58	1	59	0.0000001	0.0000001	318.75	197.51
59	59	60	0.0159700	0.0409500	0.00	0.00
60	60	61	0.0990140	0.2538900	25.50	15.80
61	61	62	0.00001	0.00001	0.00	0.00
62	62	63	0.0415220	0.1064700	0.00	0.00
63	63	64	0.00001	0.00001	0.00	0.00
64	63	65	0.0191640	0.0491400	0.00	0.00
65	65	66	0.00001	0.00001	95.63	59.25
66	66	67	0.0159700	0.0409500	0.00	0.00
67	67	68	0.00001	0.00001	38.25	23.70
68	68	69	0.1336860	0.0455850	0.00	0.00
69	64	70	0.0188300	0.0423200	102.00	63.20
70	70	71	0.1114050	0.0379875	0.00	0.00

71	70	72	0.00001	0.00001	89.25	55.30
72	72	73	0.1336860	0.0455850	0.00	0.00
73	73	74	0.0816970	0.0278575	0.00	0.00
74	70	75	0.0207130	0.0465520	38.25	23.70
75	75	76	0.00001	0.00001	0.00	0.00
76	76	77	0.1633940	0.0557150	0.00	0.00
77	75	78	0.0112980	0.0253920	510.00	316.02
78	78	79	0.0075320	0.0169280	595.00	368.69
79	79	80	0.00001	0.00001	0.00	0.00
80	79	81	0.0094150	0.0211600	0.00	0.00
81	81	82	0.0112980	0.0253920	382.50	237.02
82	80	83	0.1262590	0.0430525	0.00	0.00
83	82	84	0.00001	0.00001	350.63	217.26
84	84	85	0.0131810	0.0296240	0.00	0.00
85	84	86	0.0047070	0.0105800	38.25	23.70
86	86	87	0.0056490	0.0126960	255.00	158.01
87	87	88	0.0094150	0.0211600	446.25	276.52
88	79	89	0.00001	0.00001	382.50	237.02
89	89	90	0.1782480	0.0607800	0.00	0.00
90	90	91	0.0000001	0.0000001	0.00	0.00
91	91	92	0.1114050	0.0379870	0.00	0.00
92	90	93	0.00001	0.00001	95.63	59.25
93	93	94	0.0560460	0.0279240	191.25	118.51
94	94	95	0.0280230	0.0139620	216.75	134.31
95	95	96	0.0280230	0.0139620	95.63	59.25
96	96	97	0.0280230	0.0139620	191.25	118.51
97	97	98	0.0513750	0.0255970	63.75	39.50
98	88	99	0.0207130	0.0465520	382.50	237.02
99	99	100	0.00001	0.00001	0.00	0.00
100	100	101	0.0141220	0.0317400	0.00	0.00
101	100	102	0.0056490	0.0126960	63.75	39.50
102	102	103	0.00001	0.00001	0.00	0.00
103	103	104	0.0742700	0.0253250	0.00	0.00
104	102	105	0.0047070	0.0105800	63.75	39.50
105	105	106	0.0056490	0.0126960	127.50	79.01
106	102	107	0.0065900	0.0148120	95.63	59.25
107	107	108	0.0103560	0.0232760	106.25	65.84
108	106	109	0.0112980	0.0253920	127.50	79.01
109	109	110	0.00001	0.00001	95.63	59.25

110	110	111	0.0075320	0.0169280	0.00	0.00
111	111	112	0.0075320	0.0169280	127.50	79.01
112	112	113	0.0075320	0.0169280	127.50	79.01
113	113	114	0.00001	0.00001	0.00	0.00
114	113	115	0.0056490	0.0126960	0.00	0.00
115	115	116	0.0075320	0.0169280	318.75	197.51
116	116	117	0.0094150	0.0211600	350.63	217.26
117	114	118	0.0519890	0.0177270	446.25	276.52
118	113	119	0.0075320	0.0169280	63.75	39.50
119	119	120	0.0075320	0.0169280	127.50	79.01
120	120	121	0.0065900	0.0148120	63.75	39.50
121	121	122	0.0056490	0.0126960	382.50	237.02
122	122	123	0.00001	0.00001	0.00	0.00
123	122	124	0.00001	0.00001	76.50	47.40
124	124	125	0.0150640	0.0338560	255.00	158.01
125	123	126	0.0653870	0.0300300	191.25	118.51
126	125	127	0.0094150	0.0211600	255.00	158.01
127	127	128	0.0094150	0.0211600	233.75	144.84
128	127	129	0.0150640	0.0338560	573.75	355.52
129	129	130	0.0131810	0.0296240	276.25	171.18
130	130	131	0.0131810	0.0296240	255.00	158.01
131	131	132	0.0169470	0.0380880	393.13	243.60
132	1	133	0.00001	0.00001	510.00	316.02
133	133	134	0.0696710	0.1565840	0.00	0.00
134	134	135	0.00001	0.00001	0.00	0.00
135	135	136	0.0150640	0.0338560	0.00	0.00
136	136	137	0.0602560	0.1354240	0.00	0.00
137	137	138	0.0094150	0.0211600	0.00	0.00
138	137	139	0.00001	0.00001	0.00	0.00
139	139	140	0.0207130	0.0465520	63.75	39.50
140	140	141	0.00001	0.00001	0.00	0.00
141	140	142	0.0094150	0.0211600	0.00	0.00
142	142	143	0.0056490	0.0126960	38.25	23.70
143	141	144	0.0280230	0.0146700	38.25	23.70
144	137	145	0.00001	0.00001	63.75	39.50
145	145	146	0.0747280	0.0391200	0.00	0.00
146	146	147	0.0560460	0.0293400	63.75	39.50
147	147	148	0.0000000	0.0000000	0.00	0.00
148	148	149	0.0373640	0.0195600	0.00	0.00

149	146	150	0.00001	0.00001	95.63	59.25
150	150	151	0.0467050	0.0244500	0.00	0.00
151	143	152	0.0056490	0.0126960	63.75	39.50
152	152	153	0.00001	0.00001	0.00	0.00
153	152	154	0.0056490	0.0126960	0.00	0.00
154	154	155	0.0056490	0.0126960	63.75	39.50
155	155	156	0.0056490	0.0126960	212.50	131.68
156	153	157	0.0373640	0.0195600	63.75	39.50
157	156	158	0.0056490	0.0126960	63.75	39.50
158	158	159	0.0280230	0.0146700	0.00	0.00
159	159	160	0.0467050	0.0244500	63.75	39.50
160	158	161	0.0094150	0.0211600	38.25	23.70
161	161	162	0.0112980	0.0253920	63.75	39.50
162	162	163	0.00001	0.00001	0.00	0.00
163	163	164	0.00001	0.00001	0.00	0.00
164	164	165	0.0188300	0.0423200	95.63	59.25
165	165	166	0.00001	0.00001	0.00	0.00
166	165	167	0.0056490	0.0126960	0.00	0.00
167	167	168	0.0056490	0.0126960	446.25	276.52
168	168	169	0.0075320	0.0169280	191.25	118.51
169	166	170	0.0653870	0.0342300	255.00	158.01
170	169	171	0.00001	0.00001	605.63	375.27
171	171	172	0.0712200	0.0558480	63.75	39.50
172	171	173	0.0094150	0.0211600	127.50	79.01
173	173	174	0.0094150	0.0211600	63.75	39.50
174	174	175	0.0094150	0.0211600	191.25	118.51
175	175	176	0.00001	0.00001	0.00	0.00
176	176	177	0.0747280	0.0391200	0.00	0.00
177	175	178	0.0037660	0.0084640	208.25	129.04
178	178	179	0.0037660	0.0084640	191.25	118.51
179	179	180	0.0056490	0.0126960	127.50	79.01
180	180	181	0.0000001	0.0000001	127.50	79.01
181	181	182	0.00001	0.00001	0.00	0.00
182	181	183	0.0467050	0.0244500	0.00	0.00
183	182	184	0.0607165	0.0317850	255.00	158.01
184	181	185	0.0056490	0.0126960	127.50	79.01
185	185	186	0.0056490	0.0126960	850.00	526.70
186	186	187	0.0056490	0.0126960	127.50	79.01
187	187	188	0.0056490	0.0126960	510.00	316.02

188	188	189	0.00001	0.00001	0.00	0.00
189	188	190	0.00001	0.00001	0.00	0.00
190	190	191	0.0385775	0.0302510	0.00	0.00
191	189	192	0.0504475	0.0395590	191.25	118.51
192	188	193	0.0225960	0.0507840	448.38	277.83
193	193	194	0.0653870	0.0342300	255.00	158.01
194	193	195	0.0467050	0.0244500	510.00	316.02
195	195	196	0.0467050	0.0244500	382.50	237.02
196	196	197	0.0467050	0.0244500	255.00	158.01
197	193	198	0.0094150	0.0211600	191.25	118.51
198	198	199	0.0094150	0.0211600	446.25	276.52
199	197	200	0.0467050	0.0244500	133.88	82.96
200	200	201	0.1120920	0.0586800	95.63	59.25
201	200	202	0.0934100	0.0489000	382.50	237.02
202	4	136	0.0000	0.000	1030.20	638.36
203	10	160	0.0000	0.0000		
204	17	172	0.0000	0.0000		
205	21	183	0.0000	0.0000		
206	25	194	0.0000	0.0000		
207	55	201	0.0000	0.0000		
208	2	59	0.000	0.0000		
209	34	22	0.0000	0.0000		
210	57	41	0.0000	0.0000		
211	62	137	0.0000	0.0000		
212	108	162	0.0000	0.0000		
213	117	162	0.0000	0.0000		
214	126	165	0.0000	0.0000		
215	128	171	0.0000	0.0000		
216	132	202	0.0000	0.0000		

Fonte: Castro (1985).